



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ELIANA DANTAS RIBEIRO

**ESTUDO DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE EFLUENTE E DOS
RECALQUES DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM ENSAIOS REALIZADOS
EM LISÍMETROS**

FORTALEZA

2024

ELIANA DANTAS RIBEIRO

ESTUDO DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE EFLUENTE E DOS RECALQUES
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM ENSAIOS REALIZADOS EM LISÍMETROS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ribeiro, Eliana Dantas.

Estudo de parâmetros físico-químicos de efluente e dos recalques de resíduos sólidos urbanos em ensaios realizados em lisímetros / Eliana Dantas Ribeiro. – 2024.

133 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

1. Aterros sanitários. 2. Biodegradação. 3. Parâmetros físico-químicos. 4. Recalques. I. Título.

CDD 624.15

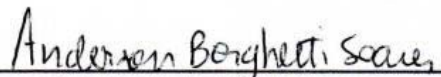
ELIANA DANTAS RIBEIRO

ESTUDO DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE EFLUENTE E DOS RECALQUES
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM ENSAIOS REALIZADOS EM LISÍMETROS

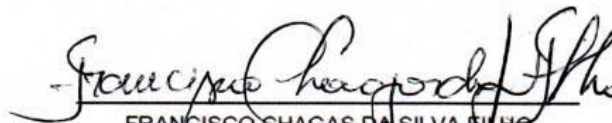
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 04/06/2024

BANCA EXAMINADORA



ANDERSON BORGHETTI SOARES
UFC - Orientador



FRANCISCO CHAGAS DA SILVA FILHO
UFC - Examinador Interno



JOSÉ CARLOS ALVES BARROSO JUNIOR
UFC - Examinador Interno



GEMELLE OLIVEIRA SANTOS
IFCE - Examinador Externo à Instituição

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha família, em especial, à minha mãe Erandir Dantas, por tudo.

Ao professor Dr. Roberto, do laboratório de Mecânica dos Solos da UFC, grande amigo, sempre disposto a ajudar no que for preciso.

Ao professor Dr. Gemmelle Oliveira, meu orientador da graduação, agradeço todas as contribuições e conhecimentos repassados, durante toda minha jornada acadêmica.

Ao professor Dr. Anderson Soares, meu orientador, por todo o acompanhamento, pela sua compreensão e paciência em todas as etapas deste longo trabalho.

Ao técnico Anselmo pelo auxílio nos ensaios, Ana (Aninha) e Fabíola, por todo o apoio, carinho, pelos momentos de risos no Laboratório, que tornaram a caminhada mais fluida.

Ao responsável do setor de Manutenção da UFC, Sr. Gadelha, em que seu auxílio na parte prática de montagem dos lisímetros foi essencial.

À equipe do Laboratório de Saneamento – Labosan, doutorandos Plínio e Marcos Mourão, ao Dr. Ricardo Mendes, e à tecnóloga de Saneamento Ambiental Emanuelle.

Aos Senhores Crisóstomo (*in memoriam*) e Dr. Arnaldo Farias do Departamento de Engenharia Agrônoma da UFC.

Aos outros professores de Geotecnia do Deha: Dr. Silvrano Dantas; Dr. Francisco Chagas; Dr. Alfran Sampaio, Dr(a) Mariana Silveira, Dr. Rosiel Leme.

Aos grandes amigos que encontrei ao longo do curso, em especial, Airlis Mendes; Wana Souza e Lucas Nogueira.

À Shirley e à Edineuza, por toda a sua disponibilidade em ajudar em tudo o que foi preciso, no que se refere aos assuntos administrativos da Pós.

À direção do Aterro Sanitário ASMOC.

Ao coordenador do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Prof Dr. Iran Lima.

À UFC e à Funcap, pelo apoio financeiro.

“O caminho só existe, quando você passa.”
(Samuel Rosa)

RESUMO

A geração de lixiviado de aterro sanitário traz consequências poluidoras para o solo e corpos hídricos, e isso é um dos maiores fatores motivacionais para o estudo aprofundado das características do chorume gerado. Parâmetros físico-químicos de lixiviados como demanda química de oxigênio (DQO), condutividade elétrica, pH, íons etc., são úteis para a investigação das fases de biodegradação de resíduos sólidos urbanos (RSU). Tendo em vista que a biodegradação é responsável por grande parte dos recalques que ocorrem em aterros de RSU, é importante monitorar as fases de biodegradação em que se encontra a massa de resíduos. Esses parâmetros não se comportam de forma individual, pois estão interligados. A utilização de lisímetros de campo, expostos às condições ambientais, permite simular o comportamento biodegradativo do RSU. Neste trabalho, foram construídos 3 lisímetros: lisímetro L1 (contendo RSU), lisímetro L2 (com recirculação de chorume e contendo resíduo sólido orgânico - RSO), lisímetro L3 (sem recirculação de chorume e contendo RSO), sendo cobertos por uma camada de cobertura intermediária de aterros sanitários do estado do Ceará. No lisímetro L3, sem recirculação, observou-se decréscimos na DQO, em relação ao lisímetro L2 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. O lisímetro L1 (RSU) apresentou menores valores de DQO que os lisímetros L2 e L3. Os recalques para os lisímetros de RSO foram maiores que os recalques para o lisímetro de RSU, onde L1 (RSU) apresentou recalque de 25 cm, L2 (RSO e com recirculação) 40 cm e L3 (RSO e sem recirculação) 39 cm, em um período de 6 meses de monitoramento. Apesar dos ajustes do modelo de Ling *et al.* (1998) terem se aproximado dos recalques medidos na maioria do período de monitoramento, sua utilização deve ser feita com cautela, em previsões de recalques de longo prazo. Este modelo não considera as variáveis que influenciam na biodegradação como pH, DQO, tipos de bactérias envolvidas, e isso pode subestimar os recalques na massa de resíduos. O lisímetro L1 (de RSU) no final de 6 meses de monitoramento, ainda estava em uma fase aeróbia inicial de geração de gases de RSU. O lisímetro L2 (com recirculação), no final do monitoramento, estava com pH menor que 5, indicando que ele estava na fase anaeróbia ácida. O lisímetro L3 (sem recirculação), as condições anaeróbias estavam em estágio inicial ao final do monitoramento, sugerindo que estava em um processo de transição da fase aeróbia para anaeróbia, e começando a fase ácida no último mês de monitoramento. Os resultados indicaram que a utilização de uma camada de cobertura intermediária, no período construtivo

de um aterro, influencia no intervalo das fases de biodegradação do RSU, bem como nos parâmetros físico-químicos do lixiviado.

Palavras-chave: aterros sanitários, biodegradação, parâmetros físico-químicos, recalques.

ABSTRACT

The generation of landfill leachate has polluting consequences for the soil and water bodies, and this is one of the major motivating factors for the in-depth study of the characteristics of the leachate generated. Physico-chemical leachate parameters such as chemical oxygen demand (COD), electrical conductivity, pH, ions, etc. are useful for investigating the biodegradation phases of municipal solid waste (MSW). Given that biodegradation is responsible for a large part of the settlements that occur in MSW landfills, it is important to monitor the biodegradation phases in which the mass of waste is found. These parameters do not behave individually, as they are interconnected. The use of field lysimeters, exposed to environmental conditions, makes it possible to simulate the biodegradation behavior of MSW. In this work, three lysimeters were built: lysimeter L1 (containing MSW), lysimeter L2 (with leachate recirculation and containing organic solid waste - OSR), lysimeter L3 (without leachate recirculation and containing OSR), covered by a layer of intermediate cover from landfills in the state of Ceará. In lysimeter L3, without recirculation, there was a decrease in COD compared to lysimeter L2 with recirculated slurry. The recirculation of leachate contributed to greater settlements and to making the leachate more concentrated with salts such as chlorides, which directly influenced the increase in electrical conductivity. The Lysimeter L1 (MSW) showed lower COD values than lysimeters L2 and L3. The settlements for the RSO lysimeters were greater than the settlements for the MSW lysimeter, where L1 (MSW) showed a settlement of 25 cm, L2 (RSO and with recirculation) 40 cm and L3 (RSO and without recirculation) 39 cm, over a 6-month monitoring period. Although the adjustments to the Ling et al. (1998) model were close to the measured settlements over the majority of the monitoring period, it should be used with caution when forecasting long-term settlements. This model does not take into account the variables that influence biodegradation, such as pH, COD and the types of bacteria involved, and this may underestimate the settlements in the mass of waste. Lysimeter L1 (of MSW) at the end of 6 months of monitoring, was still in an initial aerobic phase of MSW gas generation. Lysimeter L2 (with recirculation), at the end of monitoring, had a pH lower than 5, indicating that it was in the acid anaerobic phase. In lysimeter L3 (without recirculation), anaerobic conditions were at an early stage at the end of monitoring, suggesting that it was in a process of transition from the aerobic to the anaerobic phase, and starting the acid phase in the last month of monitoring. The results indicate that the use of an intermediate cover layer in the construction period of a

landfill influences the range of MSW biodegradation phases, as well as the physicochemical parameters of the leachate.

Keywords: landfills; biodegradation; physico-chemical parameters; settlements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Brasil em 2020.	26
Figura 2 - Ranking global de materiais recicláveis.	27
Figura 3 - Resíduos sólidos gerados pelos Estados Unidos em 2018.....	28
Figura 4 - Variação da densidade seca e da Capacidade de campo.	30
Figura 5 - Distribuição granulométrica dos resíduos de um aterro antigo e novo.....	32
Figura 6 - Esquema ilustrativo da camada de cobertura.....	34
Figura 7 - Fase de execução - camadas intermediárias.	35
Figura 8 - Coeficientes de permeabilidade (k)	36
Figura 9 - Comparativo das curvas de retenção para diferentes tipos de solo.....	36
Figura 10 - Fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDX)	38
Figura 11 - Espectro típico de uma amostra de solo qualquer.	39
Figura 12 - Demonstração de um lisímetro experimental de pequeno porte.....	40
Figura 13 - Lisímetros para simular camada de cobertura de aterros sanitários	41
Figura 14 - Modelo de lisímetro de experimento em campo.....	41
Figura 15 - Interações dos fenômenos que podem gerar recalques.	44
Figura 16 – Fases de compressão dos resíduos em função do tempo.....	45
Figura 17 - Modelo hiperbólico - Ling et al. (1998)	47
Figura 18 - Calibração do Modelo de Ling et al. (1998).....	48
Figura 19 - Comparação de modelos.....	49
Figura 20 – Geração de gases em função da degradação do RSU	53
Figura 21 – Fortaleza - Ceará – Brasil	56
Figura 22 - Pátio da Estação de Transbordo – Jangurussu	56
Figura 23 – ASMOC - Caucaia – Ceará	57
Figura 24-Localização dos Lisímetros no Campus-Pici da UFC.	58
Figura 25 - Fluxograma da Pesquisa	58
Figura 26- Projeto do Experimento	59
Figura 27- Etapa de montagem dos lisímetros	61
Figura 28 - Suportes de aço	61
Figura 29 – Ajustes finais do lisímetros experimentais.....	62
Figura 30 - Instrumentação dos lisímetros	63
Figura 31- Camada Intermediária ASMOC.....	64
Figura 32- Execução de ensaios	66
Figura 33 - Preparação da base dos lisímetros	66
Figura 34 - Pátio da Estação de Transbordo Jangurussu – Fortaleza-Ce.	67

Figura 35- Preparação dos materiais para preenchimento dos lisímetros	67
Figura 36- Balança digital	68
Figura 37 – Compactação dos resíduos com o compactador de concreto	69
Figura 38 - Lisímetros instalados no campo experimental.....	70
Figura 39 - Coleta do lixiviado.....	71
Figura 40 - Variação da cor do lixiviado ao longo dos meses.	72
Figura 41- Equipamentos utilizados nos ensaios físico-químicos.....	73
Figura 42 - Medição manual dos recalques.	73
Figura 43 - Distância entre a Estação Meteorológica-UFC e os lisímetros.....	74
Figura 44 - Estação Meteorológica - UFC	74
Figura 45 - Análise granulométrica	76
Figura 46 - Curvas de compactação	79
Figura 47 – Demonstração de crescimento de plantas.	80
Figura 48 - Spectrum das amostras P1, P2 e P3.	81
Figura 49 - Composição gravimétrica lisímetros 1,2,3 - Resíduos recém-chegados.	83
Figura 50 - Geração de lixiviado/quinzena – Lisímetros 1,2 e 3.....	85
Figura 51 - Volume acumulado de lixiviado para os lisímetros L1, L2 e L3.	87
Figura 52 - Dados de precipitação e evaporação total.....	87
Figura 53- Evolução da DQO e do pH dos lisímetros L1, L2 e L3.....	90
Figura 54 - Condutividade elétrica uS/cm.....	91
Figura 55 - Íons - Cloretos.....	92
Figura 56 - Recalques medidos em L1 , L2 e L3	95
Figura 57 - Fases de recalques dos lisímetros L1, L2 e L3	96
Figura 58 - Gráfico de calibração modelo Ling et al. (1998).....	99
Figura 59- Recalques ajustados ao modelo de Ling et al.(1998) – Lisímetro 1	101
Figura 60 - Recalques ajustados ao modelo de Ling et al.(1998)- Lisímetro 2.....	102
Figura 61-Recalques ajustados ao modelo de Ling <i>et al.</i> (1998)- Lisímetro 3	103
Figura 62 - Composição dos gases - Lisímetro 1	104
Figura 63 - Composição dos gases - Lisímetro 2	105
Figura 64 - Composição dos gases - Lisímetro 3	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados no Brasil.	25
Tabela 2 - Peso específico dos resíduos sólidos em função do seu estado.....	31
Tabela 3 - Monitoramento de recalques em lisímetros.....	43
Tabela 4 – Alguns modelos de previsão de recalques.	46
Tabela 5 - Valores de Condutividade elétrica	52
Tabela 6 - Quantitativo de materiais.....	60
Tabela 7 - Quantitativo para instrumentação.....	63
Tabela 8 - Ensaio realizados.....	65
Tabela 9 - Massas de resíduos dos lisímetros	68
Tabela 10 – Dados do solo utilizado no lisímetro	69
Tabela 11 – Cronograma das coletas de lixiviados dos lisímetros.	71
Tabela 12- Parâmetros Físico-químicos	72
Tabela 13- Frações em porcentagem (%)	76
Tabela 14 - Densidade Real dos grãos (δ).....	77
Tabela 15 – Densidade natural e seca.....	78
Tabela 16 – Dados do ensaio de compactação	79
Tabela 17 – Teor de matéria orgânica.....	80
Tabela 18 – Composição mineralógica do solo de cobertura intermediária.....	81
Tabela 19 - Coeficientes de permeabilidade (k) – Carga constante.....	83
Tabela 20 - Densidade de resíduo dos lisímetros	84
Tabela 21 - Parâmetros físico-químicos -2022	88
Tabela 22 - Parâmetros físico-químicos -2023	89
Tabela 23- Nitrogênio Amoniacal - Setembro a Dezembro de 2022.....	93
Tabela 24- Nitrogênio Amoniacal - Janeiro a Fevereiro de 2023.....	94
Tabela 25 – Resultados de tempo/recalque $\Delta T/\Delta h$ (cm).	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
APHA	American Public Health Association
ASMOC	Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia-Ce
CEMPRE	Compromisso empresarial para reciclagem
CPTU	Piezocone Penetration testing
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EDXRF	Fluorescência de raios X por energia dispersiva
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LABOSAN	Laboratório de Sanemanto
L1	Lisímetro 1
L2	Lisímetro 2
L3	Lisímetro 3
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
PET	Polietilenotereftalato
USEPA	United States of Environmental Protection Agency
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RSO	Resíduos Sólidos Orgânicos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
SWA	Solid Waste Analysis
SPT	Standard Penetration Testing

LISTA DE SÍMBOLOS

k	Coefficiente de condutividade hidráulica
%	Porcentagem
ρ	Densidade
ρ_s	Densidade seca
S_{ult}	Recalque último
Δh	Variação de recalques
ΔT	Variação de tempo
μS	Micro Siemens
W	Teor de umidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo Geral	16
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>16</i>
1.2	Metodologia geral empregada	16
1.3	Estrutura da dissertação	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).	18
2.2	Propriedades Físicas dos Resíduos Sólidos Urbanos	23
<i>2.2.1</i>	<i>Composição Gravimétrica</i>	<i>23</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Massa Específica</i>	<i>28</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Granulometria</i>	<i>31</i>
2.3	Camadas de cobertura final e intermediária	33
2.4	Análise de elementos químicos do solo através da técnica de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF)	37
2.5	Modelos experimentais de campo e laboratório incluindo lisímetros	39
2.6	Recalques em resíduos sólidos urbanos	42
2.6.1	Modelos de previsão de recalques de aterro de RSU	46
2.7	Análises Físico-químicas de lixiviado de RSU	49
2.8	Geração de gases em aterros de RSU	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1	Seleção da área para a pesquisa	56
3.2	Local para a realização da coleta do material	56
<i>3.2.1</i>	<i>Coleta dos resíduos</i>	<i>56</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Coleta de solo da camada intermediária do ASMOC</i>	<i>57</i>

3.3	Localização dos lisímetros.....	57
3.4	Desenvolvimento da pesquisa	58
3.5	Construção dos lisímetros	59
3.5.1	Projeto do Experimento.....	59
3.5.2	Material para a confecção.....	60
3.5.3	Montagem e teste de estanqueidade dos lisímetros	60
3.5.4	Instrumentação dos lisímetros	62
3.6	Caracterização da camada de cobertura intermediária dos lisímetros.....	64
3.6.1	Ensaio geotécnicos e de fluorescência por energia dispersiva.....	65
3.7	Preenchimento dos lisímetros	66
3.7.1	Preparação das amostras e compactação do material.....	67
3.7.2	Implantação e monitoramento dos lisímetros.....	69
3.8	Medições in situ.....	70
3.8.1	Medição do volume do chorume	70
3.8.2	Análises Físico-químicas do lixiviado.....	72
3.8.3	Medição de recalques	73
3.8.4	Dados meteorológicos.....	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
4.1	Caracterização física do solo de camada intermediária de Aterro Sanitário	75
4.1.1	Análise granulométrica por peneiramento	75
4.1.2	Densidade real dos grãos.....	77
4.1.3	Densidade, teor de umidade e compactação	77
4.1.4	Teor de matéria orgânica, mineralogia.....	79
4.1.5	Limites de Atterberg: Plasticidade e Liquidez	82
4.1.6	Permeabilidade	82
4.2	Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos.....	83

4.3 Monitoramento dos Lisímetros	85
<i>4.3.1 Monitoramento da geração do lixiviado</i>	<i>85</i>
<i>4.3.2 Parâmetros Físico-químicos</i>	<i>88</i>
<i>4.3.3 Dqo , pH , Condutividade Elétrica</i>	<i>89</i>
<i>4.3.4 Compostos nitrogenados: Amônia, Nitrito, Nitrato.....</i>	<i>93</i>
4.4 Recalques	94
<i>4.4.1 Evolução dos recalques no tempo</i>	<i>94</i>
<i>4.4.2 Comparação dos recalques medidos com os estimados pelo modelo de Ling et al. (1998).....</i>	<i>97</i>
4.5 Qualidade dos gases.....	103
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
5.1 Conclusões	108
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	110
REFERÊNCIAS	111

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos demanda uma correta gestão desse material. Essa gestão se refere ao momento que eles são produzidos até a sua disposição final e armazenamento. Uma correta gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) contribui para atenuar danos ao meio ambiente devido à poluição; prejuízos à saúde pública; impactos visuais negativos, devido à acomodação inadequada de resíduos a céu aberto, mau odor; dentre outros.

É esperado que a o aumento da densidade populacional de uma cidade, estado ou país influenciem diretamente na produção exacerbada de resíduos. Os hábitos de uma população também contribuem para o aumento da produção de RSU. Conforme estudos da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2022), o formato de trabalho “home office” adotado por muitas empresas, após a pandemia da COVID-19, em 2020, foi um dos fatores que mais impactaram no aumento da produção de resíduo doméstico no período pós pandemia.

Uma das principais problemáticas que envolvem o RSU é a forma como ele pode estar disposto no meio ambiente. Caso os resíduos sejam acomodados em um espaço, sem o mínimo de controle ambiental, há prejuízos severos aos recursos naturais. A disposição final do RSU em aterros sanitários não cessa o problema da gestão dos resíduos sólidos, mas mitigam a poluição ambiental. Os aterros sanitários são empreendimentos que necessitam de controles ambientais e geotécnicos, tanto na fase de preenchimento das células com a sobreposição de camadas intermediárias, quanto na fase em que as células são finalmente cobertas com camadas impermeáveis.

A degradação da parcela putrescível acarreta a formação de lixiviado; a geração de gases e os recalques devido à acomodação do material, todos esses são eventos que necessitam de avaliação constantemente.

A investigação dos produtos, dentre eles o chorume, resultantes de reações que ocorrem na fase de biodegradação, auxilia no entendimento dos resultados de parâmetros físico-químicos. Esses parâmetros físico-químicos podem ser a demanda química de oxigênio (DQO), potencial de hidrogênio (pH), condutividade elétrica, Cloretos, Nitratos, Sulfatos, Amônia, dentre outros. Todos eles podem ser analisados através das amostras de lixiviado gerado nas fases de preenchimentos das células. É possível fazer esse estudo, mesmo antes dos resíduos receberem a cobertura final, estando sob a cobertura intermediária.

A presença ou não de oxigênio influi diretamente nas fases de biodegradação da

parcela orgânica em aterros de RSU. Na fase de sobreposição de camadas finais de baixa permeabilidade, em torno de 10^{-9} m/s (Bosco, 2008), a penetração do oxigênio no interior da massa de resíduos é dificultada, isso é um importante fator para a ocorrência das fases anaeróbias, que não utilizam o oxigênio para a conversão da matéria carbonácea. Já nas fases de sobreposição das camadas intermediárias (geralmente areias) mais permeáveis, a penetração do oxigênio é facilitada, fazendo-se com que exista um meio predominantemente aeróbio.

As fases de biodegradação são importantes indicativos das ocorrências de recalques em RSU, tendo em vista que a maior causa das reduções de volume da massa de resíduos, neste ambiente, é devido à remoção da matéria orgânica.

Neste aspecto, o monitoramento geotécnico da massa de RSU é tão importante e necessário, quanto o monitoramento ambiental. O estudo do comportamento dos recalques influenciados pela biodegradação pode auxiliar no entendimento dos intervalos em que ocorrem as reduções de altura de um aterro. Dependendo da fase de cobertura dos resíduos, os parâmetros físico-químicos do lixiviado gerado no aterro podem apresentar resultados que refletem em qual fase de biodegradação a parcela orgânica está.

As deformações de volume da massa de RSU são consequências da incidência desses recalques. Em aterros de grande porte, podem ser constatadas reduções volumétricas de até 10 mil metros cúbicos (Mello; Simões, 2023). Do ponto de vista da segurança do trabalho, essa redução de volume pode não ser segura, dependendo da velocidade que o recalque pode ocorrer, principalmente quando existem operários trabalhando rotineiramente sobre o aterro.

Diante disso, este trabalho fez um estudo do comportamento físico-químico de RSU cobertos por uma camada de cobertura intermediária (mais permeável que a camada de cobertura final), para verificar relações que ocorrem nos diferentes parâmetros, como os recalques, os volumes e a qualidade de chorume, do biogás, dentre outros.

Para a realização da pesquisa, foram projetados 3 lisímetros de pequeno porte em campo, contendo RSU com diferentes composições, diferentes condições de contorno na superfície (com e sem recirculação de chorume), sendo cobertos por uma camada de cobertura intermediária, representativa de aterros de RSU e expostos às condições ambientais (precipitações, radiação solar, etc.).

1.1 Objetivo Geral

Estudar o comportamento da degradação de resíduos sólidos urbanos confinados em lisímetros, cobertos por uma camada de cobertura intermediária, representativa de aterros sanitários do estado do Ceará.

1.1.1 *Objetivos específicos*

- Analisar a vazão e a influência das interações físico-químicas do lixiviado ao longo do tempo;
- Correlacionar os comportamentos dos recalques com as fases de biodegradação;
- Fazer a aplicação do modelo empírico de Ling *et al.* (1998), para estimar recalques de RSU;
- Analisar a qualidade dos gases gerados no processo biodegradativo

1.2 Metodologia geral empregada

A verificação do comportamento dos recalques de um maciço que envolve uma composição de solo-resíduo exige um monitoramento acompanhado de instrumentações específicas para esta pesquisa.

Antes da coleta do solo e do resíduo foi planejada a produção dos lisímetros, de modo que comportassem determinado volume de material (solo e resíduo), em condições ambientais locais por um determinado espaço de tempo. No que se refere ao início do preenchimento dos lisímetros, foram coletadas amostras de solo da camada intermediária de cobertura dos RSU's do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste da Caucaia - ASMOC, já os resíduos sólidos foram coletados de uma estação de transbordo de Fortaleza-Ce.

O solo coletado foi analisado através de ensaios geotécnicos realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Ceará (UFC). Dentre os ensaios realizados destacam-se: granulometria, limites de consistência, densidade real dos grãos, compactação, teor de matéria orgânica, permeabilidade, peso específico. Os ensaios físico-químicos realizados com o lixiviado gerado nos lisímetros foram: demanda química de oxigênio; sólidos voláteis, amônia, condutividade, alcalinidade e potencial de hidrogênio.

Com o objetivo de correlacionar os parâmetros físico-químicos do chorume gerado com os recalques do material existente nos 3 lisímetros, foram monitoradas as variações de deformações volumétricas ao longo de 6 (seis) meses de monitoramento.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O próximo capítulo de número 2 (dois) trata da revisão bibliográfica, que tem como função dar um embasamento teórico.

No Capítulo 3(três) está escrita a metodologia, detalhando-se a seleção da área da pesquisa; o pré-projeto dos lisímetros experimentais e a forma como foi desenvolvido o experimento (desde a montagem até a instalação). Neste capítulo também está descrita a etapa de monitoramento, bem como todas as instrumentações.

O Capítulo 4 (quatro) mostra os resultados dos ensaios realizados para com o solo e o lixiviado, além disso é realizada uma discussão dos resultados verificados ao longo do tempo para o monitoramento dos três lisímetros.

Por fim, no Capítulo 5 (cinco) estão descritas as conclusões a respeito desta pesquisa, neste tópico também são reunidas algumas sugestões para a continuidade desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, estão apresentados conceitos sobre o que são os aterros sanitários, bem como as características dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) presentes nestes tipos de empreendimentos, tais como composição gravimétrica, massa específica e granulometria. Também são abordados conceitos sobre camadas de cobertura e modelos experimentais de campo e laboratório, descritos na literatura, utilizados para entender o comportamento hidromecânico de resíduos sólidos urbanos. Ao Final deste capítulo, será discutido o comportamento hidromecânico dos resíduos sólidos em aterros sanitários, incluindo temas relacionados a influência dos parâmetros físico-químicos do chorume no comportamento dos recalques.

2.1 Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

A Norma Brasileira - NBR nº 8.419 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1992) define um aterro sanitário como uma forma de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo, de modo que se atenuem os danos saúde pública e ao meio ambientais. Além disso, a norma cita tem em sua regulamentação a instrução de que os resíduos sólidos sejam compactados em um menor volume possível e posteriormente sejam cobertos com camada de solo impermeável.

Os aterros sanitários necessitam de uma impermeabilização da base, pois caso isso não seja bem executado, poderá ocorrer a contaminação do solo e das águas subterrâneas, por causa da infiltração do chorume.¹

De acordo com Santos (2012, p. 23):

O aterro sanitário é um empreendimento projetado de acordo com normas específicas de engenharia que permite reduzir danos e riscos à saúde pública, à segurança de seu entorno e ao ambiente natural. Mesmo assim, sua operação, ou um simples descuido, pode ocasionar impactos ambientais negativos em função da geração de resíduos líquidos e gasosos poluentes.

Segundo Santos (2008) fatores como o crescimento populacional, avanços tecnológicos e o aumento do consumo influenciam na geração e diversidade de resíduos

¹ Os resíduos sólidos são capazes de gerar um líquido escuro, denominado chorume, que é uma substância malcheirosa e muito poluidora, produzida pela decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos (Lanza *et al.*, 2010).

sólidos. Isso constitui um problema que necessita de uma forma de disposição adequada desses resíduos para se evitar problemas ambientais e de saúde pública. Segundo Lanza *et al.* (2010), a má disposição dos resíduos no solo tem grande possibilidade de alterar as características físicas, químicas e biológicas do solo, e, conseqüentemente isso causa danos à saúde pública.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (BRASIL, 2010) apresenta os seguintes objetivos (Artigo 7º, II): a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem e o tratamento dos resíduos sólidos, além da destinação final ambientalmente adequada dos rejeitos. No que se refere à disposição final destes resíduos, estes devem ser alocados em aterros sanitários (Artigo 3º, VIII). No entanto, no Brasil, atualmente ainda existem em operação formas de disposição inadequadas tais como em lixões e aterros controlados.

Segundo dados da ABRELPE (2021), de 100% dos resíduos sólidos brasileiros, 60% são enviados para os aterros sanitários, mas existem ainda 40% destes sendo enviados para os lixões e aterros controlados.

Para Araújo Neto (2016), os aterros sanitários são obras de engenharia muito complexas, onde existem materiais heterogêneos de várias dimensões, em que muitos desses materiais sofrem a perda de massa sólida, por causa do processo de biodegradação. Nestas obras de engenharia, o resíduo sólido é o principal material constituinte e existem muitos desafios enfrentados pelos responsáveis técnicos, que vão desde a estabilização dos taludes, recalques ocasionados pelo rearranjo dos resíduos e questões ambientais (Abreu; Gandolfo; Vilar, 2016).

O crescimento das cidades e a demanda por boas áreas para uma correta disposição de resíduos sólidos urbanos, a rejeição da população em morar próximo a um local desse tipo e a valorização crescente das áreas urbanas no entorno das cidades impactam diretamente na necessidade do estudo da implantação dos aterros sanitários, e mais ainda que os mesmos possam operar de eficientemente, regulamentados e com um bom monitoramento desse sistema (Van Elk; Boscov, 2020; Santos, 2004). Segundo Alberte, Carneiro e Kan (2005) existem ações consideradas básicas para a estruturação de um aterro e para a realização do tratamento dos seus resíduos. Dentre elas estão a preparação da infraestrutura de acessos e circulação do aterro; drenagem de águas pluviais; formação de células; cobertura do lixo compactado; drenagem e retenção de chorume e drenagem e captação de gases.

A NBR 13.896/1997 destaca que a área escolhida para esse tipo de obra deve levar em consideração aspectos da topografia do local, a sua geologia, as características do solo presente na superfície do terreno, a vida útil do empreendimento, os recursos hídricos da

localidade, a vegetação, assuntos relacionados aos custos envolvidos com a construção do aterro e a distância mínima dos centros das cidades, sendo que esta deve ser de no mínimo 500 metros. No projeto de um futuro aterro sanitário, é importante fazer uma apuração dos seguintes pontos: o relevo do local, dados climatológicos da região (precipitação, temperatura, evaporação, radiação solar e velocidade dos ventos), geologia e hidrogeologia e dados geotécnicos a partir da realização de ensaios (Batista, 2010).

Alguns decretos estaduais, como do Ceará (Decreto Nº 26.604, 2002 e Lei Nº 13.103, 2001), de São Paulo (Decreto Nº 32.955, 1991 e Lei Nº 6.134, 1988), de Goiás (Lei Nº 13.583, 2000) dentre outros determinam que os resíduos sólidos podem ser dispostos em aterros, desde que existam cuidados para não se poluírem as águas subterrâneas. Por isso esses decretos destacam que nos projetos de aterros deve-se ter a caracterização hidrogeológica da área de localização, justamente para verificar a vulnerabilidade dos recursos hídricos ou de áreas protegidas da natureza.

Rohde (1989 *apud* Lino, 2007) comenta que estudos hidrológicos e hidrogeológicos devem estar presentes em um planejamento de um aterro, para caracterizar a região e a área, as bacias e sub-bacias, os cursos d'água, cristas e talvegues, poços, fontes, e surgências, que existam naquela região. Ainda sobre as exigências que envolvem problemas hidrogeológicos, a fase preliminar de seleção do local deve prever a construção sobre uma base de argila, já que a argila possui baixíssima permeabilidade, isso vai dificultar a infiltração do lixiviado no solo (Russo, 2003).

Na literatura, autores como Catapreta e Simões (2016) defendem o monitoramento de aterros sanitários, haja vista que o mesmo permite o controle operacional e contribui para a minimização dos impactos ambientais provocados por essas unidades. Algumas formas realizar monitoramentos ambientais é acompanhar a geração do lixiviado, bem como estudar a sua caracterização, fazer ensaios físico-químicos e analisar os resultados conforme a legislação ambiental (Lentz, 2023).

A realização de ensaios geolétricos para análise da direção horizontal de plumas de contaminação é outra forma de investigação muito interessante, quando se trata de avaliar os impactos causados pela infiltração do lixiviado no subsolo (Mondelli *et al.*, 2007). Além disso, o monitoramento possibilita uma melhor manutenção dos aterros sanitários, prevendo possíveis processos de instabilização dos maciços. Os monitoramentos são importantes, pois eles contribuem significativamente para o entendimento do comportamento geotécnico dos resíduos sólidos urbanos (Martins, 2006).

No estudo de Costa (2015), foi verificado que um determinado tipo de solo, classificado como silte de baixa plasticidade, quando misturado com produtos compostados, influencia no aumento da capacidade de retenção de água no solo, conseqüentemente isso serve como uma barreira de infiltração de água, que futuramente pode contribuir na diminuição da produção de lixiviados no interior do aterro sanitário.

Diante disso, conhecer o comportamento do solo e suas propriedades é de suma importância na manutenção dos aterros sanitários, mesmo após a desativação. Os monitoramentos geotécnicos, por exemplo, ao serem realizados continuamente podem prever situações de riscos, tais como as instabilidades de taludes. Uma das formas de se realizar esse tipo de monitoramento é fazer análises do solo do aterro, através de ensaios para se descobrir os parâmetros de resistência (como ângulo de atrito, coesão).

Juntamente com esses ensaios, para se encontrar os parâmetros de resistência, podem ser realizadas modelagens numéricas através de softwares capazes de simular os possíveis fatores de segurança, em análises com drenagem e sem drenagem do solo estudado. Além disso, também podem ser realizados ensaios de sondagens de simples reconhecimento com Standard Penetration Test - SPT (Batali *et al.*, 2017; Rocha; Zanon; Portelinha, 2023).

A composição volumétrica dos resíduos sólidos urbanos é de grande importância para prever a área que será ocupada por esses materiais, o que pode contribuir futuramente para a avaliação do comportamento geotécnico do maciço e melhorar as suas condições de vida útil (Corrêa, 2013).

Para Oliveira (2002), um engenheiro geotécnico enfrenta grandes desafios, quando se depara com solos de aterros sanitários, devido às características peculiares inerentes a estes materiais. Por isso é tão importante a realização de ensaios *in situ* e o monitoramento desses empreendimentos, a fim de se estudar os mecanismos existentes nesse conjunto de solo e resíduos sólidos urbanos. Araújo Neto (2016) explica que um dos indicadores que melhor expressa o comportamento dos resíduos ao longo do tempo, em aterros sanitários, é o recalque, que corresponde à redução da altura e volume da massa de resíduos.

Os aterros sanitários apresentam uma compressibilidade muito superior à dos solos naturais, deve-se atentar ainda que essa característica muda de aterro para aterro. Salamoni (2019) e Klink (2019) observaram pontos importantes em seus estudos, quando comparam o comportamento do recalque, ao utilizarem marcos superficiais no topo do

empreendimento. Nesta verificação, os dois autores perceberam que para o modelo de Meruelo (1995) em cerca de 1000 dias, os recalques tinham uma tendência a se estabilizarem.

Os recalques podem ser atenuados, desde que seja feita a execução de uma compactação dinâmica dos resíduos, onde isso corrobora a redução do volume, fazendo com que sejam melhoradas as características mecânicas desses materiais (Oliveira, 2002).

A compactação do solo de aterro de RSU visa reduzir os espaços vazios existentes entre a interface solo e resíduo. Alcântara (2007) cita que o ato do espalhamento e da passagem de equipamentos apropriados sobre as camadas possibilita um melhor rearranjo das partículas dos resíduos, propiciando o aumento da vida útil do aterro. Com a compactação, pode ser possível tornar os resíduos com melhores características mecânicas e assim poder diminuir a incidência de recalques na área, já que é um processo mecânico usado para aumentar a densidade do solo, densificação, através da eliminação do ar (Fredlund; Rahardjo; fredlund, 2012).

Marques (2001) verificou que uma compactação adequada gera uma maior densidade, aumentando em torno de 30 a 40% a densidade dos resíduos em relação às obtidas com resíduos brutos em condições anteriores de compactação. Esse aumento da densidade ocorre como resultado da quebra, deformação e rearranjo das partículas existentes nesse tipo de material (Worrel; Vesilind, 2012).

A degradação do RSU é um processo comum que ocorre no aterro sanitário, onde alguns componentes dos resíduos depositados sofrem perdas de massa, que originam espaços vazios, que sofrem deformações, devido à ação da carga atuante (peso próprio), gerando uma redução na altura do aterro de RSU. Essa degradação de matéria orgânica também contribui para alguns riscos geotécnicos ao aterro sanitário, em função da formação de depressões e deslocamentos de solo da cobertura final para o interior dos resíduos (Jucá, 2003; Boscov, 2008).

Oliveira *et al.* (2016) afirmam que as deformações em aterros sanitários são muito complexas, porque os materiais presentes nesses empreendimentos podem ser naturais, artificiais ou com a mistura de ambos de várias categorias. Além do mais, são materiais que se diferenciam em forma e volume.

Conforme Denardin (2013), a densidade dos resíduos sólidos urbanos depende da composição gravimétrica e dos materiais com composição leve ou putrescível oferecerem menor peso específico. No que se refere à distribuição granulométrica, os resíduos triturados

tendem a formar um melhor entrosamento das partículas, permitindo assim a formação de um material mais denso.

2.2 Propriedades Físicas dos Resíduos Sólidos Urbanos

2.2.1 Composição Gravimétrica

Em um aterro sanitário, existe uma heterogeneidade de materiais constituintes e o tipo de material influenciará diretamente nas propriedades mecânicas. Estudar a composição gravimétrica dos resíduos é de fundamental importância para se conhecer os materiais que estão presentes nesse sistema. Segundo o Instituto Brasileiro de Administração Municipal – IBAM (2001), a composição gravimétrica revela o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de RSU analisada.

Na determinação da composição gravimétrica é comum haver a variabilidade dos materiais conforme ocorre o aumento da profundidade da coleta (Gadelha, 2021). Em uma pesquisa realizada por Santos (2012), onde os resíduos eram recém-chegados ao aterro sanitário, foram encontrados restos de alimentos; resíduos de jardim, papel; papelão; jornal; plástico rígido; plástico flexível (filme); PET; ferro; alumínio; embalagem cartonada (tetrapak); vidros; tecidos; areia; isopor; pilhas; baterias, entre outros.

Conforme a Lei 12.305 (BRASIL, 2010) os resíduos sólidos brasileiros são classificados quanto à periculosidade, em não perigosos e perigosos. Os resíduos perigosos são aqueles que apresentam caráter inflamável, corrosivo, reativo, tóxico, patogênico, carcinogênico, teratogênico e mutagênico. Já em relação à sua origem, têm a classificação conforme a subdivisão a seguir:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nos itens "a" e "b";
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nos itens "b", "e", "g", "h" e "j";
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos no item "c";
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;

- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

A Comissão Europeia para Análises de Resíduos Sólidos Urbanos prefixa 12 categorias de tipos de resíduos sólidos, dentre eles estão: materiais orgânicos; madeira; papéis; plásticos; vidros; têxteis; metais; materiais tóxicos; materiais de difícil classificação; materiais inertes; materiais de cuidados; de higiene pessoal e os finos. Sendo que cada uma dessas categorias é dividida ainda em subcategorias de tipo de resíduos (SWA, 2004).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (Environmental Protection Agency) apresenta vários tipos de resíduos sólidos em sua legislação, dentre eles estão: lixos provenientes de caixas de leite; resíduos oriundos de metal, placas de parede; lodos de estação de tratamento, resíduos industriais, resíduos provenientes de mineração, agricultura e atividades comunitárias. Além disso, os resíduos não se limitam apenas àqueles visualmente sólidos, pois o órgão americano traz nessa definição líquidos e gases contidos em materiais provenientes de processos industriais (USEPA, 2014).

Os resíduos sólidos têm boa parcela do seu volume total gerado, em grande escala, por ambientes residenciais dos centros urbanos (Demajorovic, 1995). Esse volume é influenciado, substancialmente, devido ao aumento populacional e aos padrões de consumo da sociedade (Silva, 2016). O rápido crescimento das indústrias aliado ao desenvolvimento dos países tem causado uma enorme extração dos recursos da natureza. Esses recursos passam por processos de fabricação artificial, são utilizados pela população, depois retornam ao meio ambiente sob forma de resíduo (Zaytsev, 1985).

De acordo com o Relatório do Instituto de Pesquisas Econômica Aplicada – IPEA (2012) a quantificação dos resíduos sólidos no país é bastante dificultosa, devido a motivos

como a disposição irregular, a coleta informal ou a insuficiência do sistema de coleta pública. Muitas vezes, o poder público recorre à terceirização de serviços de coleta, com empresas especializadas e bem estruturadas, por causa da impossibilidade de fazer uma coleta regular de resíduos domiciliares, em regiões de difícil acesso (IBGE, 2010).

A urbanização acelerada, junto ao consumo crescente de produtos menos duráveis, ou descartáveis, provocou um aumento do volume e diversificação do RSU gerado e sua concentração espacial (CEMPRE, 2018). O RSU, comumente estudado na literatura, pode ser apresentando sob diversas composições, dentre as quais estão demonstradas na Tabela 1:

Tabela 1 – Composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados no Brasil.

Materiais	Participação	Quantidade	
		2000	2008
	%	t/dia	t/dia
Material reciclável	31,9	47.558,5	58.527,4
Metais	2,9	4.301,5	5.293,5
Papel, papelão e tetrapak	13,1	19.499,9	23.997,4
Plástico	13,5	20.191,1	24.847,9
Vidro	2,4	3.566,1	4.388,6
Matéria orgânica	51,4	76.634,5	94.309,5
Total coletado	100,0	149.094,3	183.481,5

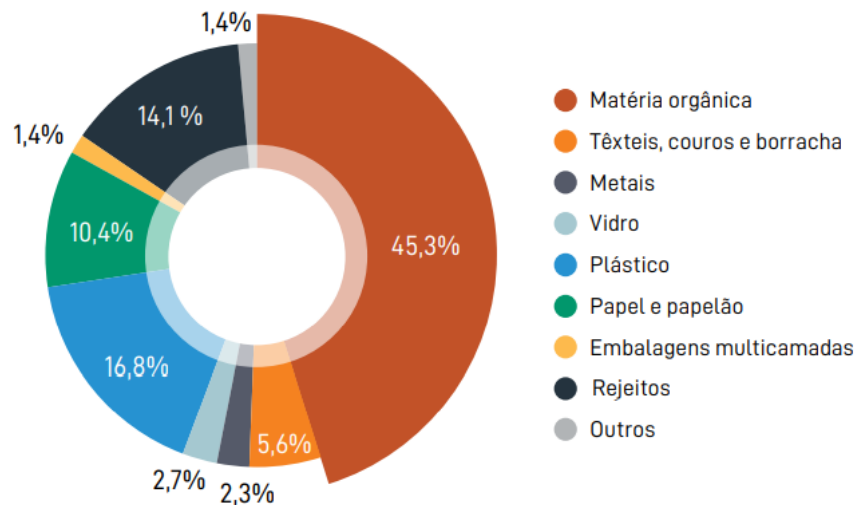
Fonte: IBGE (2010a) Adaptado por IPEA (2012).

Percebe-se pela Tabela 1 acima que a geração de resíduos sólidos, especificamente, matéria orgânica superou em quantidade os outros materiais presentes, como metais, plásticos, vidros e papeis. Em uma pesquisa realizada por Rezende *et al.* (2013) em uma cidade do interior do estado de São Paulo, o percentual de matéria orgânica foi cerca de 49,1% em 2001 e 49,4% em 2010, enquanto a quantidade de rejeitos aumentou de 23,3% para 25,1%, e os percentuais de embalagem longa vida, PET, plástico duro, papel, papelão, metais ferrosos e vidro foram menores. Já na cidade de São Paulo, as análises de composição gravimétrica indicaram no ano de 2012 a predominância de matéria orgânica (51%), sendo também observados 35% de resíduos secos recicláveis e 14% de rejeitos (Pinto *et al.*, 2014). No

mesmo ano de 2012 em Fortaleza resultados apontaram que, em média, 47,5% (em massa) dos resíduos sólidos domiciliares depositados no aterro sanitário são de matéria orgânica também (SANTOS, 2012). Em outro trabalho realizado por Silva (2022) em Fortaleza, o percentual de resíduos de origem orgânica foi cerca de 46%, um valor muito aproximado para a mesma cidade, quando comparado à pesquisa de Santos (2012).

O perfil de consumo dos brasileiros vem mudando com o decorrer dos anos, materiais como o plástico e alumínio têm apresentado um aumento, no que se refere às taxas de coleta seletiva e reciclagem, com destaque para as regiões Sudeste e Sul do país (Santos; Rovaris, 2017). Segundo Yugue (2020) estima-se que o volume de embalagens plásticas flexíveis pós-consumo irá aumentar nos próximos anos no Brasil, isso é perceptível ao fazer uma comparação com o percentual de plástico gerado em 2010, cerca de 13,5% como está demonstrado na Tabela 1 acima, e em 2020 o percentual esse percentual aumentou para aproximadamente 17,0 %, como está demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Brasil em 2020.

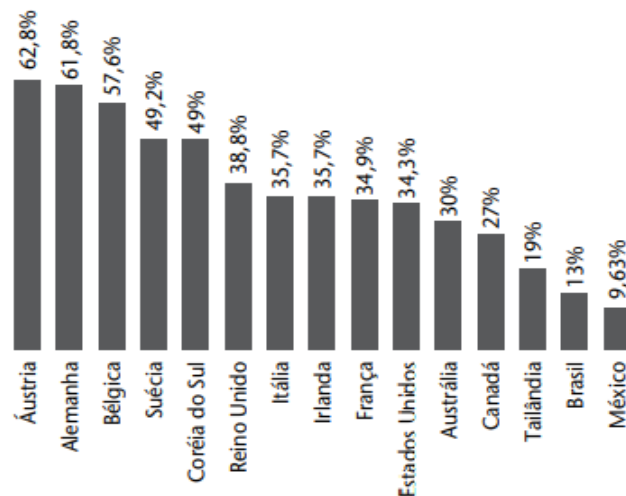


Fonte: ABRELPE (2020).

Outro ponto importante observado na composição gravimétrica dos resíduos sólidos brasileiros, apresentado pela ABRELPE (2020) é o surgimento de uma nova categoria nas estatísticas, a de rejeitos, não apresentada nas edições dos panoramas dos anteriores como 2017, 2018 e 2019. Segundo este órgão, os rejeitos são definidos como resíduos não identificáveis, assim como materiais recicláveis contaminados em que não foi possível fazer a separação.

Como foi observado por Costa *et al.* (2012), em locais com famílias de maior poder aquisitivo e melhor grau de instrução, há maior incidência de resíduos como o plástico e o vidro. Quando se compara isso aos locais mais periféricos das cidades brasileiras, o percentual desse mesmo resíduo é um pouco menor. Conforme a Figura 2, no ano de 2013, nota-se que enquanto a Áustria e a Alemanha recuperaram mais de 60% do RSU gerado; e os Estados Unidos 34%, o Brasil apenas reciclou cerca de 13% (CEMPRE, 2018).

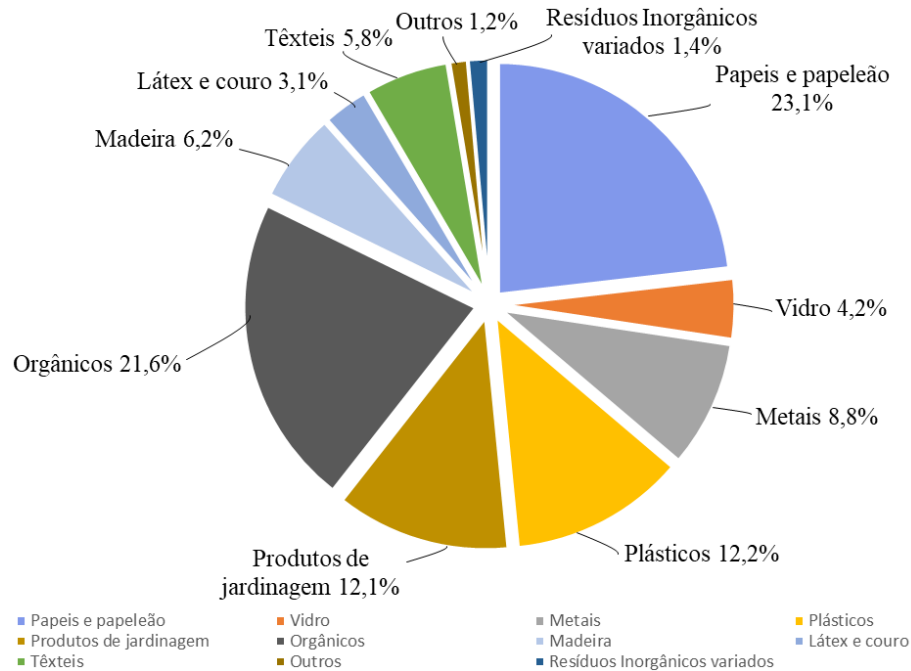
Figura 2 - Ranking global de materiais recicláveis.



Fonte: European Environment Agency (EEA) 2013, US Environmental Protection Agency (EPA) 2013, Planet Aid 2015, Sustenta, Tipmse, Cempre 2013 *apud* Cempre (2018).

O Brasil tem uma tendência a ter resíduos sólidos com a maior porcentagem de matéria orgânica, quando comparado a outros países como os Estados Unidos. Um estudo realizado pela ABRELPE, em parceria com a ONU – Meio Ambiente, confirmou que em 2017 50 % dos resíduos sólidos municipais gerados pelos países da América Latina eram de origem orgânica (UNEP, 2017). Já nos Estados Unidos, essa realidade se apresenta diferente, conforme pode ser visto na Figura 3, dos 100 % dos resíduos gerados pelos Estados Unidos, aproximadamente 21,6% são de origem orgânica, ao contrário de países como o Brasil que em 2018, do total da massa de resíduos domiciliares, aproximadamente 50 % eram só de matéria orgânica (SNIS, 2019).

Figura 3 - Resíduos sólidos gerados pelos Estados Unidos em 2018.



Fonte: Adaptado de USEPA (2018).

2.2.2 Massa Específica

O estudo da massa específica dos resíduos sólidos é de grande importância para se investigar mais profundamente a composição heterogênea desse material. Além disso, com informações obtidas a partir da massa específica pode-se estudar outras grandezas físicas como índice de vazios, massa específica seca, dentre outros. Algo importante a ser observado é que essa grandeza física auxilia no dimensionamento de instalações, como um aterro sanitário. Ela pode ser definida como o peso do RSU solto em função do volume ocupado sem compactação (IBAM, 2001).

Para Catapreta, Simões e Barros (2006) o estudo da densidade dos resíduos dispostos em um aterro sanitário é um dos parâmetros operacionais mais importantes, já que influenciará em todo o sistema de disposição, tanto do ponto de vista ambiental quanto geotécnico. Estudos realizados por Costa (2019) evidenciaram que a massa específica aumenta com o aterramento dos resíduos ao longo do tempo, e isso influenciará diretamente nos parâmetros de resistência e estabilidade do empreendimento.

Segundo Alcântara (2007) a determinação da massa específica dos resíduos antes deles chegarem ao aterro, através da coleta de uma amostra representativa, não é tão complicado, quando se compara a determinação desse parâmetro no aterro sanitário, pois neste ambiente é muito difícil conseguir retirar as amostras indeformadas, infelizmente a

obtenção desse parâmetro não é tão fácil assim (Franklin, 2002). Além do mais, deve-se atentar que as metodologias tradicionais de cálculo da obtenção deste dado levariam em consideração apenas as características de solos, como é tratado da NBR 6508/1984 para determinação da massa específica, e na prática ao se trabalhar com resíduos sólidos de aterros sanitários, aplicar metodologias que levam em consideração só o solo seria um equívoco (Escandiel *et al.*, 2019).

Carvalho (1999) verificou que há diferenças nas densidades dos resíduos de acordo com o tipo de aterro sanitário. Quando se trata de um aterro que recebe resíduos previamente triturados, os mesmos podem atingir densidades até 35% maiores, se comparadas aos resíduos de aterros convencionais, que não recebem os materiais previamente triturados.

Para a determinação do peso específico, há diferentes trabalhos na literatura como o de Escandiel *et al.* (2019), onde foram coletadas amostras de resíduos sólidos domiciliares em diferentes profundidades, uma delas em torno de 1,40m. As amostras foram transportadas para o laboratório, onde os autores adaptaram a NBR 6508 (1984), para o ensaio de determinação da massa específica dos RSU. Além disso podem ser feitas com o uso de trincheiras, com radiações gama; ensaios em poços escavados, porém vale ressaltar que estes métodos não oferecem dados precisos, visto que não há ensaios normalizados para a determinação de materiais dessa natureza (Gotteland *et al.*, 1955 *apud* Carvalho, 1999; Boscov, 2008).

Segundo Soyez e Plickert (2003) um aterro sanitário quando compactado, pode apresentar a densidade de seus resíduos úmidos (novos) próximo de 1.5 tons/m³. Densidades maiores que 0.85 t/m³ podem ser obtidas com a utilização de equipamentos modernos, já densidades menos que 0,6 -0,7 t/m³ podem reduzir a eficiência dos aterros sanitários (ISWA, 2019).

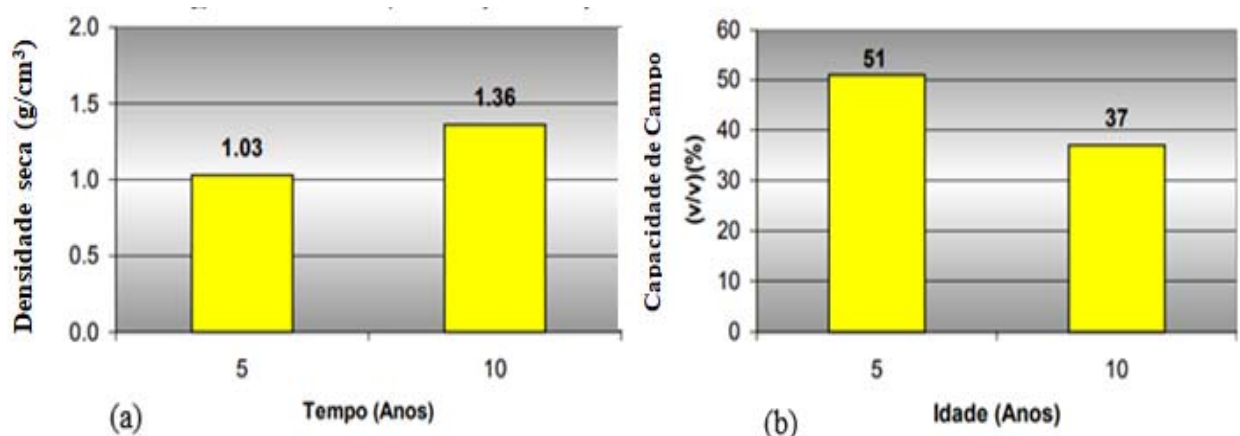
Segundo Borgatto (2010) a massa específica dos RSU é influenciada pela granulometria do material. Santos, Zanella e Silva (2009) explicam que os RSU gerados em bairros mais ricos de uma cidade, se apresentam secos, havendo possibilidade de serem reciclados, já em bairros mais periféricos de população baixa renda, os resíduos são mais úmidos, ou seja, a quantidade de lixo de origem orgânica supera a de origem inorgânica.

Fungaroli e Steiner (1979) verificaram, em experimentos com lísímetros, que a densidade e a profundidade onde se encontram os resíduos influenciam na capacidade de campo. Rocha (2008) define este parâmetro é definido como a medida do teor de umidade

volumétrico em um meio poroso, que significa o máximo de água que um material pode armazenar sem haver percolação vertical. A capacidade de campo é um dos principais requisitos para um bom projeto de sistema de drenagem do lixiviado. Um fator importante observado por Lins (2003), em amostras de resíduos para análises da capacidade de campo em função da massa específica seca, foi que essas duas grandezas são inversamente proporcionais, pois à medida que os resíduos vão se tornando mais antigos, a massa específica aumenta e a capacidade de campo diminui, como pode ser visto nas Figura 4a e 4b.

Figura 4 - Variação da densidade seca e da Capacidade de campo.

a) Densidade seca g/cm^3 b) Capacidade de Campo (V/V)



Fonte: Lins (2003)

Bosco (2008) apresenta alguns fatores que podem influenciar no peso específico, tais como: o grau de degradação dos resíduos; granulometria e o grau de compactação, o que foi comprovado na pesquisa de Oweis (1993), cujos resultados são apresentados na Tabela 2, onde os resíduos com compactação excelente tiveram seu valor de peso específico superior aos que tiveram compactação moderada.

Tabela 2 - Peso específico dos resíduos sólidos em função do seu estado.

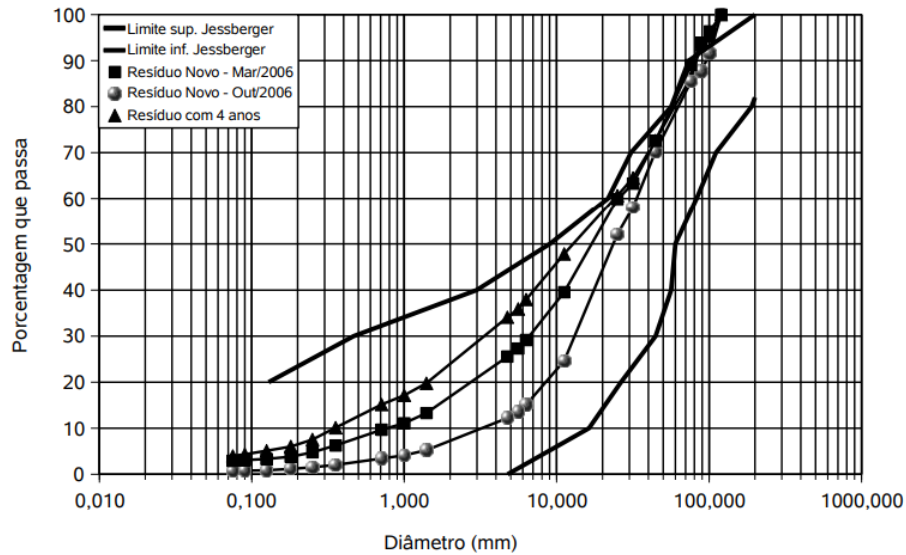
Estado dos Resíduos Sólidos Municipais	Peso específico (KN/m³)
Compactação moderada a boa	4,7-6,3
Compactação boa a excelente	8,6-9,4
Fardo de lixo	8,6-14,1
Aterro ativo com chorume	6,6
Aterro antigo	9,7
Ensaio em poço	8,9-16,2
Após degradação e recalque	9,9-11
Resíduos de incinerador	7,2-12,7
Resíduos de incinerador com densidade seca máxima	13,5
Resíduos de incinerador -antigos e recentes (in situ)	14,9-16,6
Pedaços de madeira (seca)	2,3
Pedaços de madeira (64% de umidade)	3,8
Composto com folhas	2,6
Compostagem	5,2
Produto final	3,5

Fonte: NSWMA (1985), Landva e Clark (1986), Schoenberger e Fungaroli (1971), l'oran e Ali (1989), Oweis e Khera (1990), *apud* Oweis (1993).

2.2.3 Granulometria

Os resíduos sólidos têm a sua distribuição granulométrica muito influenciada pelo tempo que estão dispostos no aterro sanitário. Inicialmente eles se apresentam como um material mais grosso, posteriormente adquire uma granulometria com grãos mais finos, com o aumento da fração fina do material com o decorrer dos anos, como resultado da degradação da matéria orgânica (Bosco, 2008; Abreu, 2015). Assim como na mecânica dos solos, para a determinação da granulometria dos RSU, são realizados os ensaios de peneiramento para traçar as curvas granulométricas, cujos resultados podem ser vistos na Figura 5.

Figura 5 - Distribuição granulométrica dos resíduos de um aterro antigo e novo.



Fonte: Nascimento (2007).

Nos estudos realizados por Carvalho (1999), no Aterro Sanitário de Bandeirantes, a autora verificou uma perda de massa das partículas dos resíduos sólidos, com idade de 15 anos de aterramento, estando esses materiais em um estágio avançado de degradação de seus constituintes. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Nascimento (2007), conforme Figura 6, onde os resíduos mais antigos apresentaram maior porcentagem de grãos de fração mais fina, quando comparado aos resíduos mais novos.

Conforme Russo (2003), na composição dos RSU há variadas dimensões de materiais de difícil reconhecimento, o que merece uma medição particular desses objetos. Produtos que se apresentam com pequena granulometria, tais como: sachês de alimentos e papeis picados são bem difíceis de ser separados nas esteiras de triagens comuns (CEMBRANEL *et al.*, 2021). Devido a heterogeneidade do material, a medição das partículas feita no laboratório também não é tão fácil, principalmente quando se tem materiais como fios e arames, que têm dimensões muito pequenas em algumas direções e grande dimensão em outra direção (Worrel; Vesilind, 2012).

Para Corrêa (2020) e Alcântara (2007), devido a composição dos resíduos ser muito heterogênea, não existe uma forma padronizada para a realização desse tipo de análise, especificamente, no que se refere aos resíduos sólidos. Existem casos que devido às dificuldades de peneiramento e sedimentação, são utilizadas régua para fazer a medição direta das partículas maiores observadas no material (Cardim, 2008).

Carvalho, Machado e Rocha (2004) afirmam que o RSU em sua fase sólida pode conter materiais inertes estáveis como vidros e metais, o que confere aos resíduos sólidos um comportamento similar de um solo heterogêneo. Na fase sólida, também existem materiais como restos de tecidos, papelões e uma variabilidade de plásticos, sendo que todos esses materiais têm uma grande capacidade de provocar recalques. Além disso, resíduos de origem orgânica sofrem reações físico-químicas, em que a consequência disso será reduções de volumes do material, acompanhadas de geração de gases.

Em experimentos realizados por Pereira *et al.* (2020), com biorreatores preenchidos com resíduos sólidos orgânicos, mostraram-se mais satisfatórios quanto à produção de gás metano, em reatores preenchidos com resíduos de granulometria mais fina, do que com resíduos de granulometria maior. A maior geração de metano ocorreu devido à presença de quantidades consideráveis de oxigênio dos resíduos ainda novos (granulometria maior), que interfere na degradação anaeróbia e, por consequência, geração de metano. Foi constatado em ensaios realizados com reatores por Viriato *et al.* (2015), que quanto maior a granulometria do RSU, maior a influência no decréscimo da produção de biogás.

Com relação aos parâmetros de resistência, Borgatto (2010) verificou que RSU com maiores diâmetros de grãos apresentaram baixos valores de parâmetros de resistência. Ensaios realizados em amostras de partículas passantes na peneira nº 19 mm, consideradas mais grosseiras, resultaram em valores mais baixos de ângulo de atrito e coesão, respectivamente 35° e 15,0 kN/m², que foram inferiores aos obtidos para as amostras com granulometrias mais finas (2,0 mm e 9,50 mm).

2.3 Camadas de cobertura final e intermediária

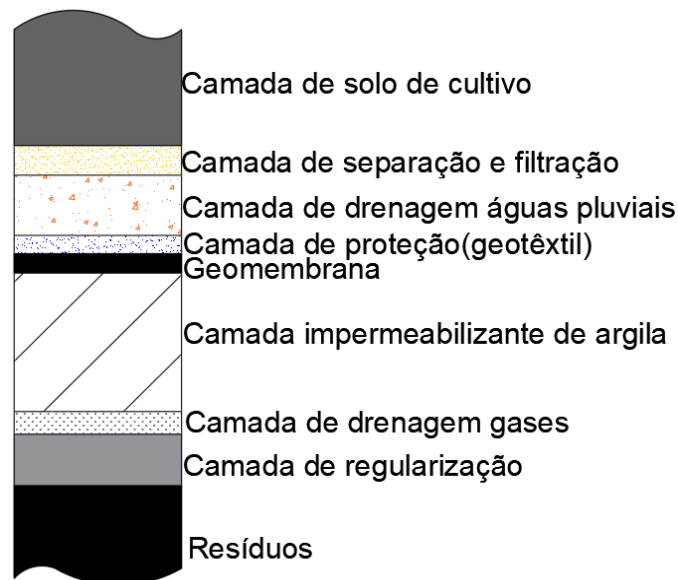
As camadas de cobertura têm como de uma das suas funcionalidades fazer o revestimento final das camadas de resíduos dispostos no aterro sanitário. Ela é importantíssima, pois evita a fuga descontrolada de gases gerados pela biodegradação da matéria orgânica para a camada atmosférica. Segundo Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012), ela é uma camada intermediária entre a atmosfera e as subcamadas abaixo do solo de cobertura. Nessa perspectiva, é imprescindível a escolha de bons materiais para constituir esse sistema de revestimento.

As camadas de cobertura, além de isolar os resíduos do meio ambiente, servem de controle da entrada e saída de gases gerados pela decomposição dos resíduos orgânicos, para a

prevenção de erosões, para controle de odores e vetores de doenças e a redução da quantidade de água que percola para o interior dos resíduos (Bosco, 2008; USEPA, 2003; Escobar; Abichou, 2016).

Na Figura 6, é apresentada uma configuração típica de uma camada de cobertura que pode ser aplicada em aterros sanitários (Bosco, 2008). De acordo com a Figura 6 pode-se identificar as seguintes subcamadas: de solo de cultivo; camada de separação e filtração; camada de drenagem de águas pluviais; camada de proteção da geomembrana; camada de impermeabilização, composta por geomembrana ou argila; camada de drenagem de gases; camada de regularização.

Figura 6 - Esquema ilustrativo da camada de cobertura



Fonte: Adaptado de Bosco (2008).

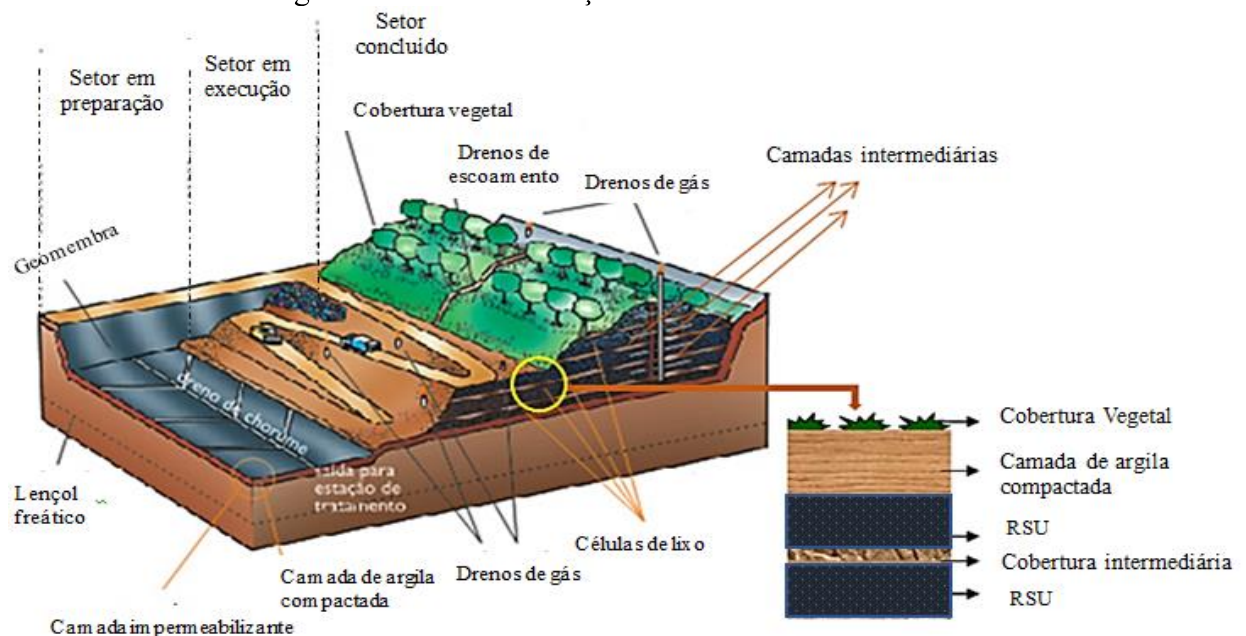
Uma das grandes problemáticas no que concerne à execução das camadas de coberturas em aterros sanitários brasileiros é que as normas vigentes nacionais não especificam as técnicas de execução dessas camadas (Araújo, 2017). Se o sistema de camada de cobertura superior não for eficaz, com a existência de camadas drenantes, isso implicará em elevados volumes acumulados de percolado no interior do aterro. Além disso, deve-se atentar que o clima local, com regime de chuvas intensas ou períodos de grande evaporação podem influenciar no desempenho dessa cobertura (Guizelini, 2011; Fredlund; Rahardjo; Fredlund, 2012).

Conforme está previsto na NBR 13.896/1997, a cobertura final deve minimizar a infiltração de água, exigir pouca manutenção, ter resistência à erosão, não apresentar fissuras

e possuir um coeficiente de permeabilidade adequado à funcionalidade dessa obra. Araújo (2017) menciona que o coeficiente de permeabilidade pode ser na ordem de 10^{-8} cm/s. Boscov (2008) sugere que o coeficiente de permeabilidade deve ser menor ou igual a 10^{-9} cm/s. Mesmo que a norma brasileira citada acima recomende que a camada de cobertura tenha pouca manutenção, faz-se necessária uma ressalva quanto a isso, pois segundo os estudos de Escobar e Abichou (2016), barreiras de argilas compactadas podem perder sua função de impermeabilização com o tempo, principalmente em regiões de clima semiárido.

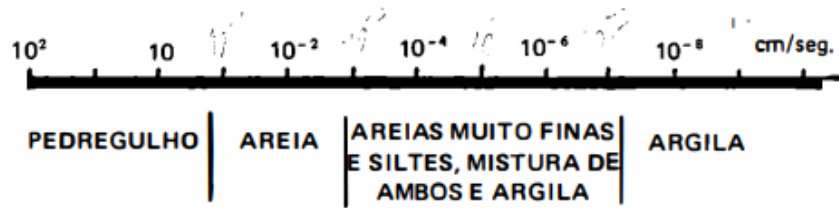
As camadas intermediárias são sobrepostas entre uma camada de resíduo e outra na fase de execução do aterro sanitário, como mostra a Figura 7. É importante que essas camadas facilitem a percolação do o lixiviado gerado pelo RSU, além disso, que facilitem a percolação dos volumes de precipitação que infiltram através da camada de cobertura final. O ideal é que nas camadas intermediárias o chorume não se acumule, e que seja drenado o suficiente para dissipar a pressão do líquido, evitando confinamentos entre a massa de resíduo (Belfort *et al.*, 2019). Portanto, as camadas intermediárias precisam ser do tipo areia, ter coeficientes de permeabilidade maiores que os coeficientes das camadas impermeabilizantes, como exemplo, estarem num intervalo entre 10^{-2} cm/s e 10^{-5} cm/s (Caputo, 1996), como está demonstrado na Figura 8.

Figura 7 - Fase de execução - camadas intermediárias.



Fonte: Adaptado de Andrade (2018) e Mariano (2008).

Figura 8 - Coeficientes de permeabilidade (k)



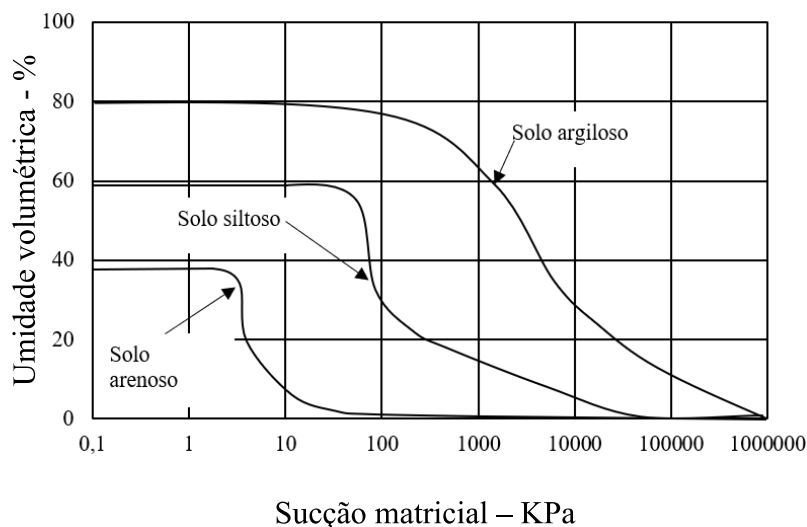
Fonte: Caputo (1996).

Dependendo do tamanho do aterro e do volume de resíduos recebidos, a fase de execução e alteamento das células podem demorar determinados intervalos de tempo. Então as camadas intermediárias podem ficar um período ainda sob a ação das intempéries como chuva e evaporação. Borba *et al.* (2018) citam que, em alguns aterros, não todos, esse período pode durar de 2 a 3 anos.

É importante que na fase de execução do aterro, não exista a fuga de gases decorrentes do processo de biodegradação, senão esta fase pode ser muito prejudicial ao meio ambiente, pois as camadas intermediárias possuem vias preferências para o fluxo ascendentes de gases, tais como: gás carbônico (CO₂), metano (CH₄), dentre outros (Ferreira *et al.*, 2022).

No planejamento de uma camada de cobertura, deve-se levar em conta a curva de retenção de água no solo, cujo formato é apresentado na Figura 9. Esta curva representa a relação entre o teor de umidade com a sucção, em outras palavras, tem-se a unidade de massa ou de volume de água, e a sucção medida em KPa. As curvas de retenção são importantes para a determinação das propriedades dos solos não saturados (Fredlund; Rahardjo; Fredlund, 2012).

Figura 9 - Comparativo das curvas de retenção para diferentes tipos de solo.



Fonte: Adaptado de Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012).

A classificação do solo tem influência no comportamento da inclinação das curvas de retenção. Ao observar a curva da Figura 8, nota-se que os três tipos de solo (argila, silte e areia) apresentam comportamentos de sucção diferentes. Nos solos argilosos, é possível perceber que a curva é mais gradual, que nos solos siltosos e nos arenosos, isso acontece porque em solos argilosos a retenção de água é maior, devido à elevada umidade presente nesses solos. Como as argilas possuem o rearranjo de suas partículas em forma de lamelas, os vazios ficam quase imperceptíveis, o que dificulta a drenagem da água no solo. Já em solos arenosos e siltosos, percebe-se que a curva possui uma inclinação mais acentuada, ou seja, a variação entre a sucção e o teor de umidade é maior. Segundo Araújo (2017), solos granulares possuem macroporos, o que explica a dificuldade de eles reterem água, por isso neste tipo de solo há maior percolação de lixiviado.

Fatores como o histórico de tensões, a estrutura dos grãos do solo, mineralogia, umidade, índice de vazios e métodos de compactação influenciam diretamente na configuração dessa curva (Fredlund; Rahardjo; Fredlund, 2002; Cardoso Costa, 2015).

2.4 Análise de elementos químicos do solo através da técnica de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF)

A técnica de fluorescência de raios x por energia dispersiva permite a obtenção informações sobre os elementos químicos presentes em uma determinada amostra de solo, de forma rápida e não destrutiva.

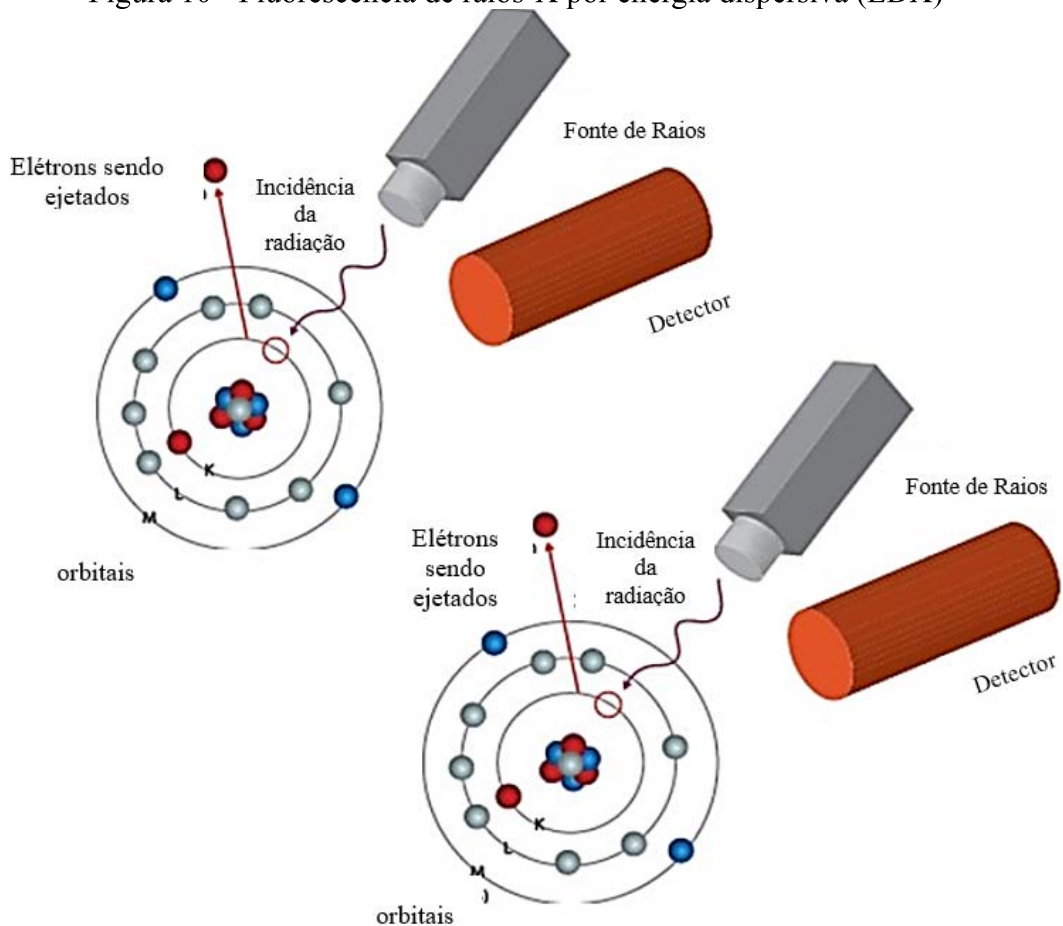
Segundo Elias (2018), os raios X são uma forma de radiação eletromagnética, onde ao incidirem com uma alta energia em uma matéria, eles têm a capacidade de perturbar os elétrons dos orbitais mais internos dos átomos, como está demonstrado na Figura 10. Na prática, acontece um deslocamento de elétrons, de forma que os átomos se tornem instáveis, Como na natureza os fenômenos tendem ao equilíbrio, os elétrons dos orbitais externos do átomo se movem para os novos espaços vagos nos orbitais internos. No deslocamento de elétrons de orbitais externos para internos, acontece perda de energia, e esta energia é emitida na forma de um fóton de raio. Cada elemento químico possui energia característica e bem definida. O ensaio de EDXRF consiste em três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios X (Nascimento Filho, 1999).

Este ensaio não tem uma norma pré-definida, no caso para a realização desta

técnica são utilizadas metodologias de livros, como de Nascimento Filho (1999), para o entendimento e execução das etapas da técnica de radiação eletromagnética.

Na Figura 10, está apresentada uma demonstração de como a radiação incide em um átomo de um elemento químico qualquer.

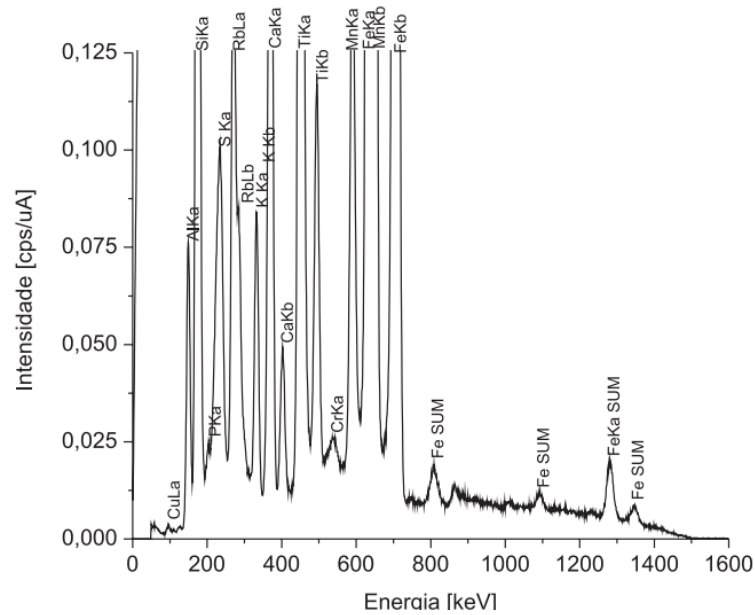
Figura 10 - Fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDX)



Fonte: Adaptado de Blondel (2020).

A técnica da (EDXRF), pode ser utilizada para avaliação dos teores de elementos químicos presentes no solo, tais como potássio (K), fósforo (P), cálcio (Ca), enxofre (S), alumínio (Al), cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn), ferro (Fe), dentre outros. No espectro típico de uma amostra de solo, o equipamento utilizado na EDXRF gera um gráfico, com dados sobre a intensidade da energia, medida em quiloelétron-volt (keV), emitida por cada elemento químico (Wastowski *et al.*, 2010). Um exemplo de um espectro típico de uma amostra pode ser observado na figura 11.

Figura 11 - Espectro típico de uma amostra de solo qualquer.



Fonte: Wastowski *et al.* (2010).

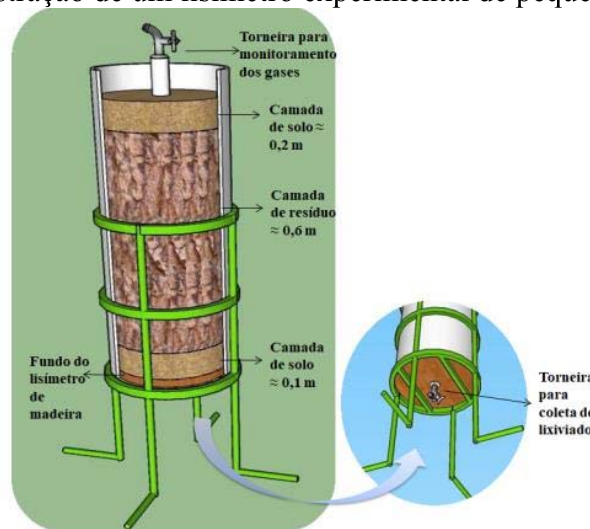
2.5 Modelos experimentais de campo e laboratório incluindo lisímetros

Na Literatura existem trabalhos como o de Fungaroli e Steiner (1979), Coelho *et al.* (2005), Alcântara (2007), Cunha (2009), Santos (2015), Santos e Matos (2017), Guedes *et al.* (2021) onde os autores buscaram simular as condições de um comportamento de uma massa de resíduos sólidos urbanos de um aterro sanitário em lisímetros. Já outros autores, como Catapreta (2008) e Souza (2018) buscaram simular camadas de cobertura. Os lisímetros são conhecidos como projetos experimentais, pois apresentam-se como recipientes que contém resíduos (oriundos de coleta urbana) e solo no seu interior. Além disso, com os lisímetros, é possível avaliar o comportamento geomecânico dos RSU, pois eles são uma alternativa de simulação de um aterro sanitário real

Segundo Fungaroli e Steiner (1979), a realização de ensaios com lisímetros proporciona observações a respeito das características do lixiviado gerado pelos resíduos sólidos ao longo do tempo, e como a percolação desse lixiviado pode influenciar na vida útil do aterro sanitário. De acordo com Cunha (2009), lisímetros podem ser considerados como ensaios de campo que procuram simular circunstâncias reais do ambiente, levando-se em consideração a temperatura da localidade, a pluviosidade, a insolação, o vento, etc. Catapreta (2008) lembra que o uso de células experimentais de dimensões relativamente maiores contribui para resultados mais fidedignos, para representar comportamentos de um aterro real.

Na Figura 12, tem-se um exemplo de lisímetro experimental de pequeno porte, preenchido com resíduo sólido urbano e solo, onde esta coluna foi produzida de modo que o lisímetro fosse exposto em condições meteorológicas locais. Uma célula experimental deste modelo possibilita o monitoramento da biodegradação dos resíduos sólidos com o tempo, em que o pesquisador pode avaliar o volume de chorume gerado; recalques; geração de gases, dentre outras informações.

Figura 12 - Demonstração de um lisímetro experimental de pequeno porte.



Fonte: Guedes *et al.* (2021)

Catapreta (2008), em seus experimentos, utilizou lisímetros para simular camadas de coberturas de aterros sanitários, em laboratório. Os recipientes das células experimentais mostradas na Figura 13 foram feitos de plástico, de aproximadamente 55 cm de altura e 32 cm de diâmetro. Na parte inferior foi colocada uma camada de 7 cm de “brita 0”, acima desta camada foi colocado um geotêxtil (Bidim) e acima do geotêxtil foi colocada a camada de solo de cobertura. Nestes lisímetros, o autor buscou obter, de forma indireta, parâmetros de curva característica de retenção de água no solo. No experimento, foram realizados os seguintes procedimentos: determinação das condições iniciais de umidade, logo após a compactação dos materiais nos lisímetros; registro diário dos volumes utilizados na simulação de precipitações e dos volumes de líquidos percolados produzidos; pesagem diária dos lisímetros; determinação do volume de água armazenado e transformação dos registros de sucção dos tensiômetros em teores de umidade.

Figura 13 - Lisímetros para simular camada de cobertura de aterros sanitários



Fonte: Catapreta (2008).

Existem trabalhos na literatura, como o de Santos e Matos (2017), em que os lisímetros de pequeno porte são preenchidos apenas com matéria orgânica e solo de cobertura. Os autores conseguiram medir temperatura, volume de lixiviado e recalques nas células experimentais.

Os lisímetros também podem ser de grande porte, construídos em alvenaria, como nos experimentos de Alcântara (2007), demonstrado na Figura 14. Nesse tipo de lisímetro, foi realizada a análise da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados. O autor conseguiu realizar o monitoramento de gases, de temperatura, além disso fez análises químicas com o lixiviado gerado, e conseguiu verificar a influência do lixiviado gerado no comportamento dos recalques.

Figura 14 - Modelo de lisímetro de experimento em campo.



Fonte: Alcântara (2007)

A degradação dos materiais, principalmente de origem orgânica, propicia a geração de biogás, e nesta composição encontram-se o metano; o hidrogênio; o sulfeto de hidrogênio, gás carbônico, entre outros. Alcântara (2007) fez o monitoramento não só de

metano, como também de outros gases como dióxido de carbono, monóxido de carbono, oxigênio e sulfeto de hidrogênio.

Conforme a USEPA (2003), com o uso do lisímetro é possível monitorar a percolação que ocorre para o interior de um aterro, como também diferentes parâmetros com o uso de instrumentação específica (umidade, sucção, etc.), como também o progresso da biodegradação. Vale ressaltar que assiduidade na maneira de monitorar os experimentos oferece melhor confiabilidade nas medidas e observações realizadas nestas células (ABREU, 2015).

Jeffery, Marshman e Salomons (1988) verificaram com ensaios em lisímetros na condição aeróbia, que a oxidação ativa dos resíduos ocorre durante um período de 5 a 8 anos. Na pesquisa de Bareither *et al.* (2012c) foi estudado o comportamento de resíduo sólido municipal em um lisímetro fechado de metal, dimensões de 8 m de altura por 2,4 m de diâmetro. Neste tipo de lisímetro, na condição anaeróbia, os autores buscaram estudar o comportamento químico, físico e biológico da massa de RSU, quando é adicionado volume extra de lixiviado na célula do experimento. Em 1000 dias de experimento, aproximadamente 3 anos, o pH do efluente aumentou, enquanto que a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a demanda química de oxigênio (DQO) diminuíram, durante a dosagem do lixiviado. Fungaroli e Steiner (1979) também verificaram acidez elevada, em um período de 1000 dias, em amostras de lixiviado coletado em lisímetros com RSU.

2.6 Recalques em resíduos sólidos urbanos

Os recalques em RSU ocorrem devido aos processos biodegradativos, que ao longo dos anos podem contribuir para a formação de espaços vazios entre a massa de solo e resíduo. Com isso, há um desnivelamento da superfície, onde esse desnível não acontece de forma igual em um mesmo aterro.

De acordo com Carvalho (1999), as deformações em aterros sanitários acontecem em dois momentos, sendo o primeiro relacionado à fase inicial da disposição dos resíduos, e o segundo momento à degradação química e biológica. Segundo Qian, Koerner e Gray (2001) os recalques podem se estender até um certo período, até se estabilizarem, a ordem do seu valor final pode chegar a 30% da espessura total inicial dos aterros sanitários.

Da Silva (2013) fez medições de recalques em 3 lisímetros de RSU de grande porte, dimensões de 3 m de altura e 1 m de diâmetro interno. O lisímetro (L1) foi preenchido

com 100% de RSU conforme chega no aterro sanitário; o lisímetro (L2) com 50% de matéria orgânica e 50% de RSU conforme chega no aterro e o lisímetro (L3) com 100% de matéria orgânica. A autora fez a medição de recalques de forma manual, com réguas métricas, onde constatou deslocamentos verticais sucessivos e bruscos. Após um determinado período de tempo, esses deslocamentos tenderam a diminuir entre 90 e 120 dias, como pode ser visto na Tabela 3. Isso pode ser motivado pela acentuada atividade metabólica, seguida do surgimento dos espaços vazios entre os constituintes do material.

Tabela 3 - Monitoramento de recalques em lisímetros.

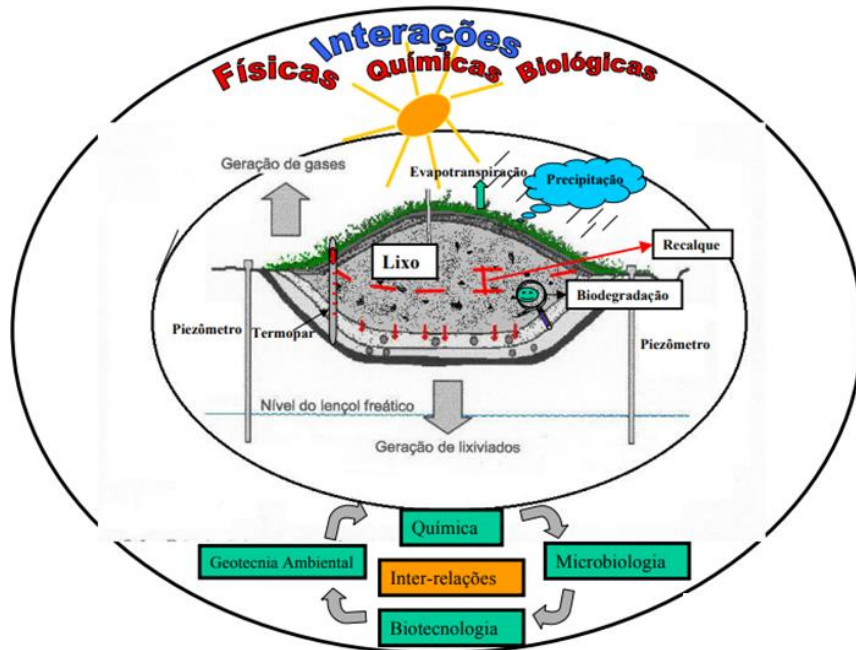
Lisímetro/Tempo	Recalque (cm)			
	7 dias	15 dias	90 dias	120 dias
L1	0	20	30	30
L2	10	40	50	53
L3	20	50	60	66

Fonte: Da Silva (2013).

O conhecimento a respeito das variáveis que interferem nos recalques dos resíduos sólidos muito interessa ao engenheiro geotécnico, tendo em vista que o conhecimento disso é indispensável à segurança de um aterro sanitário. Os recalques em aterros de RSU ocorrem devido a uma série de eventos: químicos, biológicos e físicos que estão interligados entre si.

Na Figura 15, observa-se um aterro sanitário convencional, onde a precipitação influencia no volume de lixiviado gerado, a própria composição dos resíduos mantém relação tanto com as características físico-químicas do lixiviado, quanto com a geração de gases. À medida que o lixiviado é gerado, há a degradação dos materiais, gerando espaços vazios, como consequência há um rearranjo entre as partículas de solo e resíduo, gerando deslocamentos verticais. Os processos de degradação biológica do lixo influenciam na deformabilidade desse material, fazendo com que o RSU possa variar em forma e em volume (Monteiro, 2003).

Figura 15 - Interações dos fenômenos que podem gerar recalques.



Fonte: Castlhos Júnior (2003) *apud* Monteiro (2003).

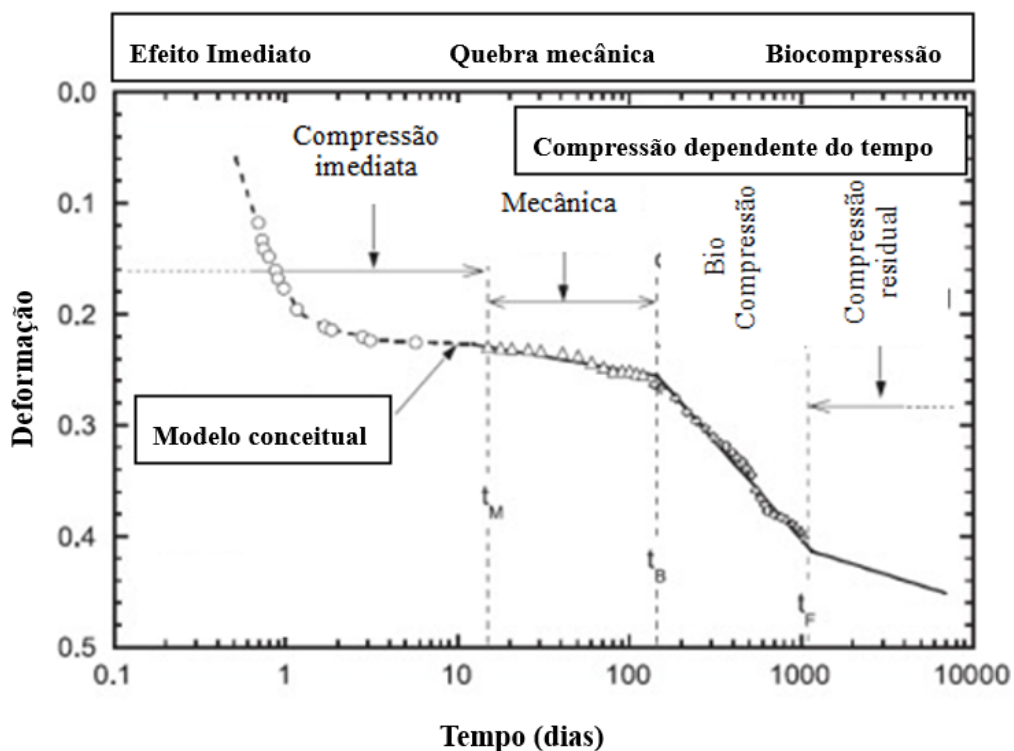
Segundo Gomes e Martins (2006), a ocorrência dos recalques gera um volume livre adicional que pode possibilitar o aumento da vida útil de uma trincheira de um aterro, sendo interessante do ponto de vista econômico. Araújo (2017) alerta que a ocorrência desses deslocamentos verticais pode ser um indicativo da instabilidade dos resíduos aterrados, que se não forem corretamente monitorados, com a adoção de medidas corretivas, podem conduzir a rupturas de taludes e bermas do aterro sanitário. Na verdade, não se pode evitar esses deslocamentos, é impossível afirmar que eles nunca vão acontecer, pois enquanto houver resquícios de matéria orgânica, acontecerá movimentações na massa de resíduos.

Em um aterro sanitário, com o decorrer do tempo, a matéria orgânica presente nos resíduos tende a ser removida pela ação de microrganismos, como alguns grupos de bactérias. A atividade microbiana dessas bactérias contribui para a formação de vazios na massa de resíduos, o que pode provocar reduções de volume da massa, e conseqüentemente a diminuição da altura do aterro. Grisolia e Napoleoni (1996) explicam que a velocidade de degradação depende da quantidade e do tipo de matéria orgânica que chega ao aterro. Os autores ainda mencionam que a velocidade de degradação está condicionada ao tempo de transição da fase de biodegradação aeróbia para a fase de biodegradação anaeróbia; bem como a evolução das transformações químicas que ocorrem durante essas fases.

Os recalques dos resíduos em sucessões de eventos de compressões: que podem

ser imediatas, mecânicas, bio-compressões e compressões residuais (Bareither; Benson; Edil, 2013). As compressões imediatas, que acontecem entre os 10 primeiros dias, como pode ser observado na Figura 16, são as que ocorrem aproximadamente nas primeiras semanas, por ser a fase inicial de recebimento do material no aterro. As compressões mecânicas são devido ao reajuste das partículas entre o solo e o resíduo. Já na biocompressão, ocorrem os deslocamentos verticais, devido à biodegradação da parcela orgânica do aterro, nota-se pelo gráfico da Figura 16 que a magnitude dos recalques são maiores nesta fase. Após 1000 dias de implantação, ocorrem as compressões residuais.

Figura 16 – Fases de compressão dos resíduos em função do tempo.



Fonte: Adaptado de Bareither, Benson e Edil (2013).

Os recalques estão intimamente ligados à ação física de compressão dos resíduos, e segundo Edill, Ranguette e Wuellner (1990), o fenômeno da compressão do resíduo é bem complexo, onde as curvas de recalque x tempo diferem de uma curva de um solo argiloso, por exemplo, porém são semelhantes em solos turfosos. Existem modelos de previsão de recalques que podem ser utilizados em resíduos sólidos urbanos, e esses modelos podem levar em consideração o comportamento da compressão dos resíduos, o comportamento da biodegradação da matéria, recalques primários e recalques secundários, calibração de dados de recalques por meio de funções hiperbólicas, dentre outros.

2.6.1 Modelos de previsão de recalques de aterro de RSU

A existência de modelos que podem ser readaptados para a previsão de recalques, em RSU, auxilia de forma representativa nos estudos do monitoramento geotécnico de um aterro sanitário. A previsão dos recalques auxilia na correta manutenção do aterro, tendo em vista que os deslocamentos verticais podem comprometer uma série de componentes. Dentre esses componentes estão a camada de cobertura, que se tiver desnivelada, pode comprometer a contenção dos gases gerados (CH₄, H₂S, CO₂, etc.); além disso, pode comprometer a tubulação de drenagem do lixiviado que se localiza em camadas inferiores, dentre outros comprometimentos.

Diante disso, existem alguns modelos na literatura para fazer uma previsão do comportamento dos recalques em aterros de RSU. Esses modelos podem ser aplicados conforme as categorias demonstradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Alguns modelos de previsão de recalques.

Categoria	Destinação	Autores
Modelos Reológicos	Comportamento de compressão de resíduos	Edil <i>et al.</i> (1990); Gibson e Lo (1961), Marques (2001)
Modelos de Regressão ou Ajuste de curvas	Calibração de dados de recalque, por meio de funções logarítmicas; hiperbólicas; bi linear e multilinear.	Ling <i>et al.</i> (1998), Gandola <i>et al.</i> (1992)
Modelo de Adensamento Clássico	Cálculo do recalque inicial, primário e secundário do solo, através da aplicação da teoria de Terzaghi	Sowers (1973) ; Bjarngard e Edgers (1990) , Hossain e Gabr (2005)
Modelo de Biodegradação	Comportamento da decomposição da matéria orgânica (no caso dessa pesquisa, de aterro de RSU)	Park e Lee (1997), Marques <i>et al.</i> (2003), Meruelo (1996), Oweis (2006).

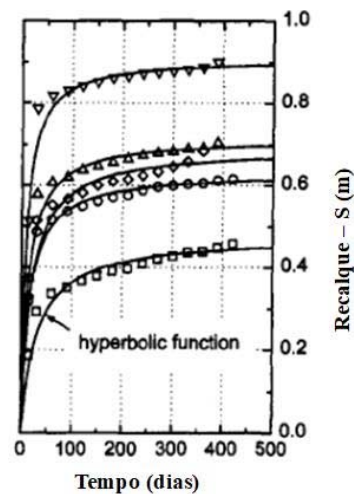
Fonte: Ling et al (1998), Edil *et al.* (1990) ; Gibson e Lo (1961); Gandola *et al.* (1992) *apud* Klink (2019), Sowers (1973) ; Bjarngard e Edgers (1990) ; Hossain e Gabr (2005); Park e Lee (1997), Marques *et al.* (2003), Meruelo (1996); Oweis (2006) *apud* Corrêa (2017).

Como pode ser visto na Tabela 4, das 4 categorias para a previsão de recalques em aterros, tem-se do modelo de adensamento, que leva em consideração os cálculos de recalque primário e secundário. Nesta categoria, tem-se o modelo de Sowers (1973). Boscov (2008) explica sobre a existência de um modelo para estimativa de recalques, o modelo de Sowers, que surgiu em 1973, o mesmo foi adaptado à realidade da compressão em RSU's, é também conhecido como modelo clássico de compressão. O modelo é subdividido em três fases ao

longo do tempo: compressão inicial; compressão primária e compressão secundária. O modelo de Sowers (1973) utiliza hipóteses simplificadoras da teoria de adensamento de Terzaghi, que podem não se adequar à natureza dos resíduos sólidos urbanos.

O modelo de Ling *et al.* (1998), utilizado neste trabalho, baseou-se em simulações que adotam funções logarítmicas e de potência, como pode ser demonstrado na Figura 17. Neste gráfico, o eixo das ordenadas (y) refere-se ao recalque calculado e o eixo das abscissas (x) refere-se aos dias de monitoramento.

Figura 17 - Modelo hiperbólico - Ling *et al.* (1998)

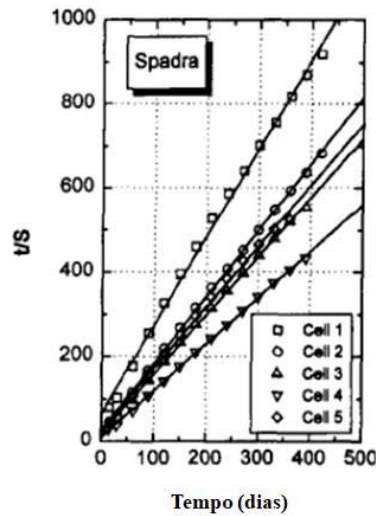


Fonte: Ling *et al.* (1998)

Para a obtenção dessas curvas, os autores fizeram simulações com funções hiperbólicas, onde os parâmetros de entrada de dados foram: S (recalque total); t (diferença entre o instante 0 e o início das medições); ρ_0 (taxa inicial de recalque $S_t/\Delta T$, para $t=t_0$) e Sult (recalque último). Este modelo é empírico e está representado pela Equação 1, com ele é possível fazer previsões de recalques para longos períodos.

$$S = \frac{t}{\frac{1}{\rho_0} + S_{ult}t} \quad (1)$$

Os valores de ρ_0 e de S(ult) podem ser obtidos através de uma calibração por regressão linear, demonstrada no gráfico da Figura 18. Para a obtenção deste gráfico, deve-se fazer uma relação entre o tempo e o recalque medidos (t/S). A relação (t/S) resultará em valores que serão plotados no eixo y, os dias de monitoramentos serão plotados no eixo x.

Figura 18 - Calibração do Modelo de Ling *et al.* (1998)

Fonte: Ling *et al.* (1998)

Com esses valores, é feita uma reta de função afim, para a obtenção de uma equação de 1º grau. Ao verificar o gráfico, o intercepto da inclinação da reta será o inverso da taxa inicial de recalque (ρ_0) e o coeficiente angular da reta será inverso do recalque último esperado S_{ult} , como pode ser visualizado na Equação 2.

$$\frac{t}{S} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{S_{ult}} \quad (2)$$

A equação 2, será transformada na Equação 3 de 1º grau:

$$y = b + ax \quad \text{ou} \quad y = ax + b \quad (3)$$

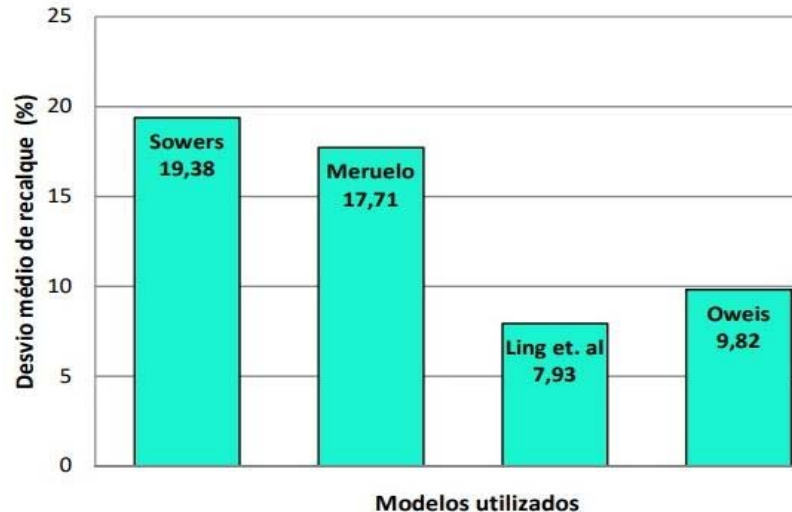
onde:

$$\begin{aligned} y &= t/S \\ b &= \frac{1}{\rho_0} \\ a &= \frac{1}{S_{ult}} \\ x &= t \end{aligned}$$

Na pesquisa de Corrêa (2017), para uma investigação de 12 células de RSU, os recalques simulados com o modelo de Ling *et al.* (1998), para um período de 50 anos, foi o que apresentou menor desvio médio de resultados, quando comparados aos modelos de Sowers, Meruelo, Oweis também utilizados pelo pesquisador. O modelo de Sowers, que

considera a teoria clássica de adensamento, foi o que apresentou maior desvio dos recalques medidos nas células de RSU, conforme está apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Comparação de modelos.



Fonte: Corrêa (2017).

Outros pesquisadores também estudaram este modelo, como Barbosa (2016), na previsão de recalques da camada de solo de cobertura do ASMOC. Já Marques (2001), Catapreta (2008), Salomoni (2019), Van Elk, Correia e Ritter (2019) e Klink (2019) também estudaram esse modelo, sendo para previsão de recalques em RSU. Esses mesmos autores também verificaram que para os 200 dias de monitoramento, as curvas de ajuste eram muito próximas à linha de tendência dos recalques medidos. Já Marques (2001) obteve boa concordância do modelo para recalques de RSU, monitorados por um tempo mais longo, em torno de 1000 dias, quase 3 anos.

Catapreta (2008) utilizou esse modelo para um monitoramento de 714 dias, porém ele percebeu que a partir do 1º ano de monitoramento, por volta de 360 dias, o modelo não se ajustava bem aos recalques que foram medidos no campo. O autor ainda comenta que modelos hiperbólicos como o do Ling *et al.* (1998), que não levam em conta variáveis como a degradação dos compostos orgânicos, não são muito adequados para monitoramentos de recalques a longo prazo.

2.7 Análises Físico-químicas de lixiviado de RSU

Algumas das análises laboratoriais, para a investigação dos parâmetros físico-químicos do lixiviado são: potencial de hidrogênio (pH); demanda bioquímica de oxigênio (DBO); demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais, metais pesados, nitrogênio

amoniaco, alcalinidade, condutividade elétrica, dentre outros.

Devido ao lixiviado de RSU possuir agentes microbiológicos em sua composição, é recomendável fazer as análises laboratoriais desses parâmetros o mais breve possível, caso não, é necessário congelar as amostras para que não haja a oxidação das mesmas.

Cunha (2009) fez uma breve explicação sobre alguns parâmetros:

DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio): demanda de oxigênio para degradar a matéria orgânica através da biodegradação aeróbia. Quando a DBO está alta nos resultados, entende-se que há muita matéria orgânica nas amostras, quando esse parâmetro está baixo, há pouca matéria orgânica. É uma análise demorada, em torno de 5 dias.

DQO (Demanda Química de Oxigênio): demanda necessária de oxigênio para degradar quimicamente a matéria orgânica. Quando a DQO está alta, entende-se que existe uma poluição do local onde foram retiradas as amostras. Para esta análise, os procedimentos são mais rápidos em torno de 1,5 h, além disso permite-se maior tempo para conservação da amostra. (VALENTE; PADILHA; DA SILVA, 1997).

pH (Potencial de Hidrogênio): Os valores de pH dos RSU são influenciados pelos produtos formados durante as fases de degradação da matéria orgânica. No interior da massa de resíduos, acontecem reações anaeróbias. É um parâmetro importante, pois afeta biologicamente os microrganismos.

Sólidos totais: Indica o conjunto de substâncias de natureza orgânica e inorgânica dissolvidas em suspensão. São classificados conforme a natureza química ou física. Quimicamente, são divididos em sólidos voláteis e fixos. Os voláteis se volatilizam em temperatura menor que 65°C, já os fixos se volatilizam após a evaporação da água.

Metais pesados: Elementos químicos que apresentam número atômico maior de 22, e são prejudiciais à saúde humana. São encontrados em RSU, devido à variedade de objetos que são descartados pela população. Mondelli *et al.* (2007), ao estudarem plumas de contaminação do subsolo de um aterro controlado, verificaram a existência de Cádmio; Níquel, Chumbo, Zinco.

Amônia: Um dos subprodutos gerados pela degradação dos RSU, em fase anaeróbia. Também é um dos componentes do Biogás gerado em aterros sanitários.

Condutividade elétrica: É um parâmetro que está relacionado com a dissolução de ácidos orgânicos do lixiviado. A concentração da condutividade elétrica de amostras de

lixiviado pode variar em função da quantidade de água das chuvas, que percolam o aterro e do nível de decomposição da matéria orgânica presente no RSU (Riguetti *et al.*, 2014).

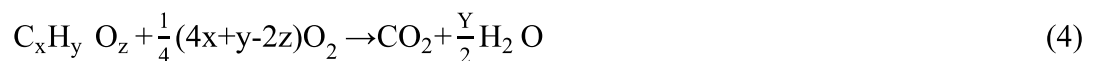
Alcalinidade: Parâmetro inverso ao de PH, amostras de lixiviado, quando tendem a apresentar valor de pH acima de 8,00 demonstram-se amostras alcalinas, em que nessa fase a produção do (CH₄) gás metano pode ser prejudicada, porque as bactérias metanogênicas dependem do pH da amostra.

Silva e Santos (2010) alertam que deve haver cuidado com os resultados obtidos em laboratório, quando se compara com outros trabalhos realizados em outras cidades. O motivo disso é que pode haver diferença na idade dos resíduos; nas formas de operação das áreas de recepção dos resíduos, no ponto de coleta, no tempo de digestão, dentre outros.

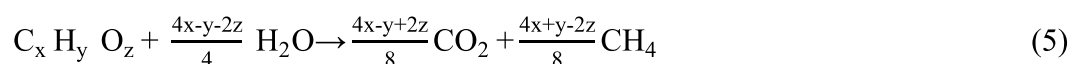
Santos (2012) explica que a geração de produtos líquidos ou gasosos no interior de um aterro sanitário é consequência das interações biológicas, físicas e químicas, entre os diversos componentes presentes na massa de resíduos.

No que tange às reações químicas, físicas e biológicas que ocorrem no interior de um aterro de RSU, estas influem diretamente na geração e na composição do Biogás, nesta composição podem ser encontrados: metano (CH₄); o gás hidrogênio (H₂); o sulfeto de hidrogênio (H₂S), dióxido de carbono (CO₂), entre outros.

Na fase aeróbia de digestão da matéria orgânica, ocorre uma reação química na presença de oxigênio, onde a matéria carbonácea é transformada em gás carbônico e água, como está demonstrado na Equação 4. Segundo Sperling (1996), esta equação é genérica e representa a oxidação da matéria orgânica carbonácea. Nesta fase o que é gerado é o lixiviado contendo água proveniente da umidade dos resíduos e da água infiltrada, devido à precipitação da água da chuva pelas coberturas do aterro (final e intermediária).



Já na fase anaeróbia, as reações ocorrem sem a presença do oxigênio. Nesta fase a matéria carbonácea é convertida em gás carbônico e metano, como mostra a Equação 5.



Os gases e líquidos gerados são produtos resultantes da decomposição dos RSU. Entende-se de Brito Filho (2005), que um aterro molhado terá a decomposição da matéria mais rápida, que um aterro seco, por isso que em estações secas a produção de biogás é mais

lenta. O autor faz menção a alguns pontos que auxiliam o aterro a se manter úmido, tais como a incidência de chuvas; a temperatura local; as condições da camada de cobertura do aterro, dentre outros.

A umidade de um aterro sanitário influencia diretamente na produção do chorume, este contém líquidos de composições variadas, dentre eles a água. A água é um potente transportador de metais tóxicos, além de possuir a capacidade de transportar determinados elementos, ela é um importante meio de dissolução de elementos tipo Ferro, Cadmio, Silício, Níquel, dentre outros (Solomons; Forstner, 1988). A dissolução de alguns desses metais junto ao lixiviado, contribui para variações de valores de condutividade elétrica.

A condutividade elétrica é representada pela medida, em que um líquido consegue conduzir eletricidade. Segundo Alcântara (2007), esse parâmetro auxilia na investigação da contaminação de um meio aquoso, e está relacionado à dissolução de íons numa determinada amostra, especificamente, a amostra é o chorume. Os íons podem ser de Cloretos (Cl^-), Sulfatos (SO_4^{2-}), amônio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-), dentre outros.

Em um estudo de caso realizado por Mondelli *et al.* (2007), os autores perceberam diferenças de comportamento de condutividade elétrica, ao longo da profundidade do solo de um aterro controlado. Verificaram que em profundidades, entre 5 e 10 metros, a condutividade elétrica foi maior, que em profundidades menores, entre 1 e 4 metros. As zonas com maior presença de lixiviado foram justamente as áreas em que a condutividade elétrica foi maior. Os autores utilizaram este parâmetro para indicativo de contaminação de reservas hídricas do subsolo próximo do aterro sanitário.

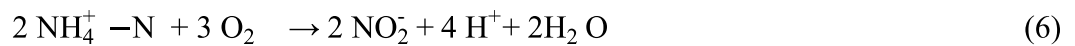
As fases de degradação dos resíduos influenciam na diferença dos valores de condutividade elétrica, como pode ser visto na Tabela 5. Worrel e Vesilind (2012) e Alcântara (2007) explicam que na fase ácida pH com valores mais baixos, menores que 7,0, influencia na solubilização de sais, o que impacta no aumento da condutividade elétrica nessa fase, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de Condutividade elétrica

Fases de Degradação	Transição	Ácidogênica	Metanogênica	Maturação
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2450–3310	1600–17100	2900–7700	1400–4500
pH	6.7	4.7–7.7	6.3–8.8	7.1–8.8

Fonte: Worrel e Vesilind (2012).

Na fase aeróbia, acontece a oxidação da matéria nitrogenada, onde o substrato inorgânico denominada amônia (NH_3) é convertido em nitritos e estes em nitratos, essa reação química recebe o nome de nitrificação, e acontece em 2 etapas. Na primeira etapa, as bactérias chamadas Nitrossomonas são responsáveis pela transformação da amônia em nitritos, como pode ser visto na Equação 6. Na segunda etapa, as bactérias do tipo Nitrobacter são responsáveis pela redução do nitrito em nitrato, como pode ser visto na Equação 7 (Sperling, 1996).



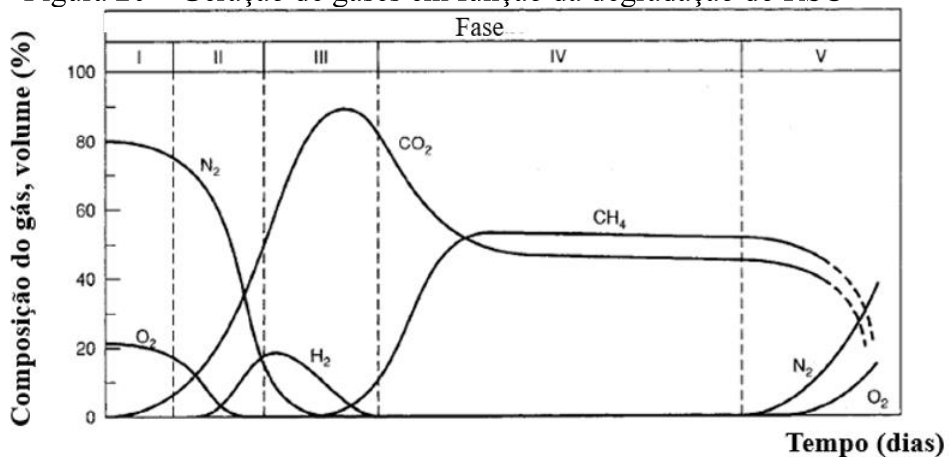
Em condições anaeróbias, onde o oxigênio é escasso, ainda há a presença de nitratos e estes são consumidos por microrganismos heterotróficos, nesta etapa ocorre a desnitrificação, onde o nitrato é transformado em nitrogênio gasoso (H_2) (Sperling, 1996). Essa reação química está demonstrada na Equação 8.



2.8 Geração de gases em aterros de RSU

Existe um diagrama de fases, Figura 20, que faz uma explanação de como acontece a geração dos principais gases em um aterro de RSU. A geração de gases é consequência da biodegradação que ocorre com os resíduos, no decorrer do tempo. Portanto, a biodegradação se desenvolverá em 5 fases: fase inicial (I), fase de transição (II), fase acidogênica (III), fase metanogênica (IV) e fase de maturação (V) (Farquhar; Rovers, (1973); Parker (1983); Pohland (1987); POhland (1991) *Apud* O'leary; Tchobanoglous, 2002).

Figura 20 – Geração de gases em função da degradação do RSU



Fonte: Farquhar e Rovers, (1973), Parker (1983), Pohland, (1987) e Pohland, (1991) *apud* O'leary e Tchobanoglous (2002).

Os autores Worrel e Vesilind (2012) e O'leary e Tchobanoglous (2002) explicam

os mecanismos que acontecem, em cada uma dessas fases, da seguinte forma:

Fase I: É a fase inicial. A decomposição biológica do RSU ocorre em condições aeróbicas (na presença de oxigênio - O_2), pois o oxigênio consegue penetrar em camadas superficiais do aterro. As principais fontes de organismos aeróbicos e anaeróbicos são encontradas na própria camada de solo de cobertura, tais como restos de plantas; lixiviado recirculado, animais que morrem em cima da camada de cobertura, dentre outros.

Fase II: É a fase de transição, em que o oxigênio é consumido e as condições anaeróbicas se desenvolvem. Nesta fase anaeróbica, nitratos e sulfatos surgem, onde acontecem reações biológicas que podem reduzir o gás nitrogênio (N_2) e o Sulfeto de hidrogênio (H_2S). Nesta fase, de acordo com a Figura 20, percebe-se o aumento das concentrações de dióxido de carbono CO_2 . Há a diminuição dos valores de pH, devido à presença de organismo ácidos e o efeito da elevada concentração de CO_2

Fase III: É a fase ácida. A atividade bacteriana começa a ser acelerada. Nesta fase, percebe-se pela Figura 13 que o gás hidrogênio é reduzido e o gás carbônico apresenta-se em grande quantidade. Os microrganismos existentes nessa etapa são denominados acidogênicos. Devido à produção dos ácidos, um deles é o ácido acético (CH_3COOH) o pH do lixiviado é baixo, menor que 5. Nesta fase, a DBO; DQO, Condutividade Elétrica apresentam-se altas, devido à dissolução dos ácidos orgânicos no chorume. Materiais inorgânicos, como metais pesados podem ser solubilizados nesta fase.

Fase IV: Fase conhecida como metanogênica. Aqui, um grupo de microrganismos converte ácido acético e gás hidrogênio em metano e gás carbônico. Existem casos que os microrganismos só irão se desenvolver no final da fase III. As bactérias responsáveis pela conversão são anaeróbicas. Neste momento, o pH do lixiviado tende a ficar perto da neutralidade, valor de 6,8 a 8,0. A DBO, a DQO e a Condutividade elétrica tendem a diminuir. Aqui, muitos constituintes inorgânicos são solubilizados, por isso que nesse momento alguns metais pesados, como cádmio, chumbo e outros apresentam suas concentrações reduzidas.

Fase V: Fase conhecida como fase de maturação, acontece depois que a da biodegradação do material orgânico é convertida em metano e gás carbônico. Aqui, percebe-se a diminuição da geração de gás metano, isso pode acontecer, pois muitos nutrientes podem ter sido carregados juntamente com o lixiviado. Nesta fase, podem ser encontrados também: gás nitrogênio e oxigênio.

Segundo Augstein e Pacey apud Maciel (2003), existe um intervalo de tempo para

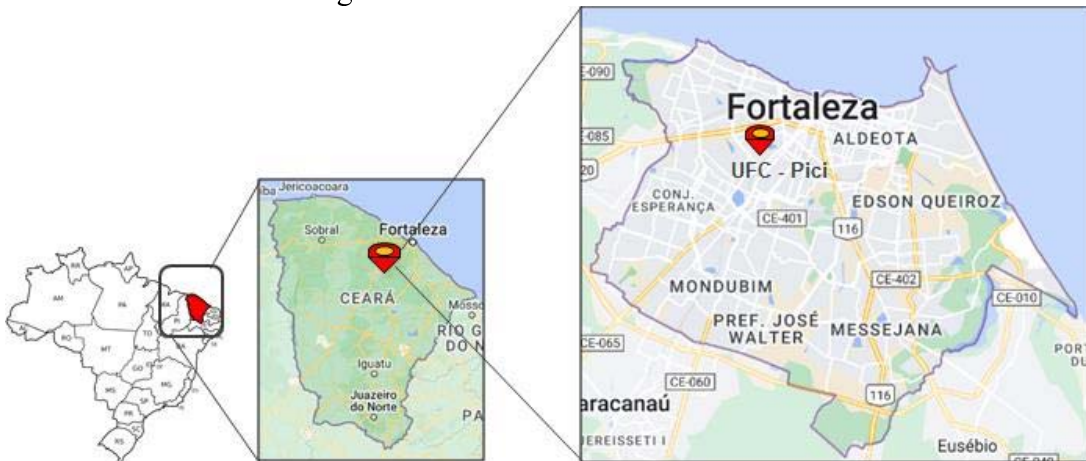
cada uma dessas fases. A fase I pode durar horas ou até uma semana; a fase II ocorre entre 1 mês a 6 meses, a fase III pode ocorrer de 3 meses a 3 anos , a fase IV entre 8 anos a 40 anos e a fase V entre 1 ano a mais de 40 anos. É importante lembrar que mesmo com essa informação, os aterros de RSU podem se comportar diferentes, com isso apresentar pequenas alterações nas durações das fases. Isso depende do tipo e da concentração do resíduo existente no aterro, a porcentagem de matéria orgânica que foi recebida no momento da disposição, até mesmo do tempo em que RSU fica, ainda, sob camadas intermediárias facilmente suscetíveis às condições aeróbias.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Seleção da área para a pesquisa

A área disponibilizada para a pesquisa foi um laboratório de energia solar localizado na Universidade Federal do Ceará – UFC, situada na cidade de Fortaleza-Ceará, Brasil, como está demonstrado no mapa da Figura 21.

Figura 21 – Fortaleza - Ceará – Brasil



Fonte: Google Maps (2022)

3.2 Local para a realização da coleta do material

3.2.1 Coleta dos resíduos

A coleta dos resíduos sólidos urbanos foi realizada dentro do Pátio da Estação de Transbordo do Jangurussu, próximo ao antigo aterro do Jangurussu, na cidade de Fortaleza-Ceará, conforme está demonstrado na Figura 22.

Figura 22 - Pátio da Estação de Transbordo – Jangurussu

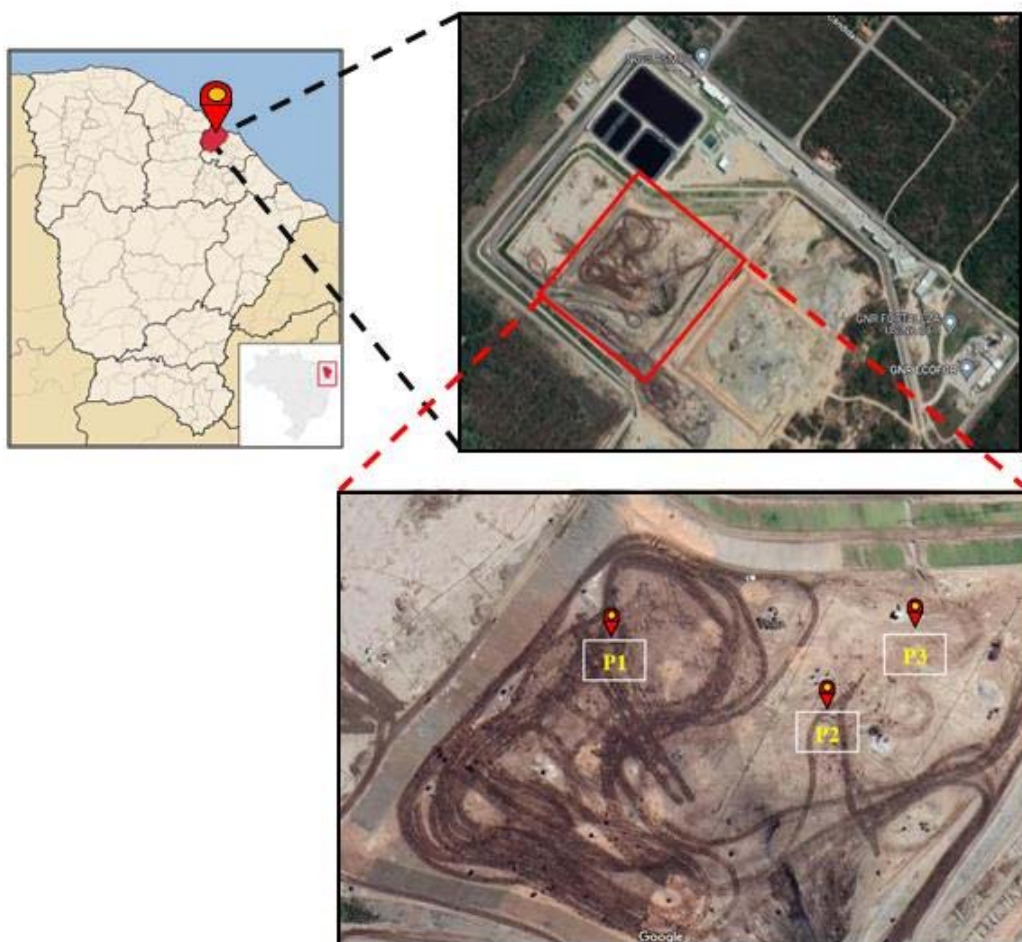


Fonte: Google Maps (2022).

3.2.2 Coleta de solo da camada intermediária do ASMOC

Para a camada de cobertura, foram retiradas três amostras de solo das camadas intermediárias do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia-CE (ASMOC), no período da tarde, onde a localização está demonstrada na Figura 23. Na mesma figura, estão apresentados três pontos de coleta, com as seguintes coordenadas; P1: 3°47'35.0952" latitude sul e 38°41'07.0512" longitude oeste; P2: 3°47'36.1392" latitude sul e 38°41'04.1748" longitude oeste; P3: 3°47'35.142" latitude Sul e 41'02.9148" longitude oeste.

Figura 23 – ASMOC - Caucaia – Ceará

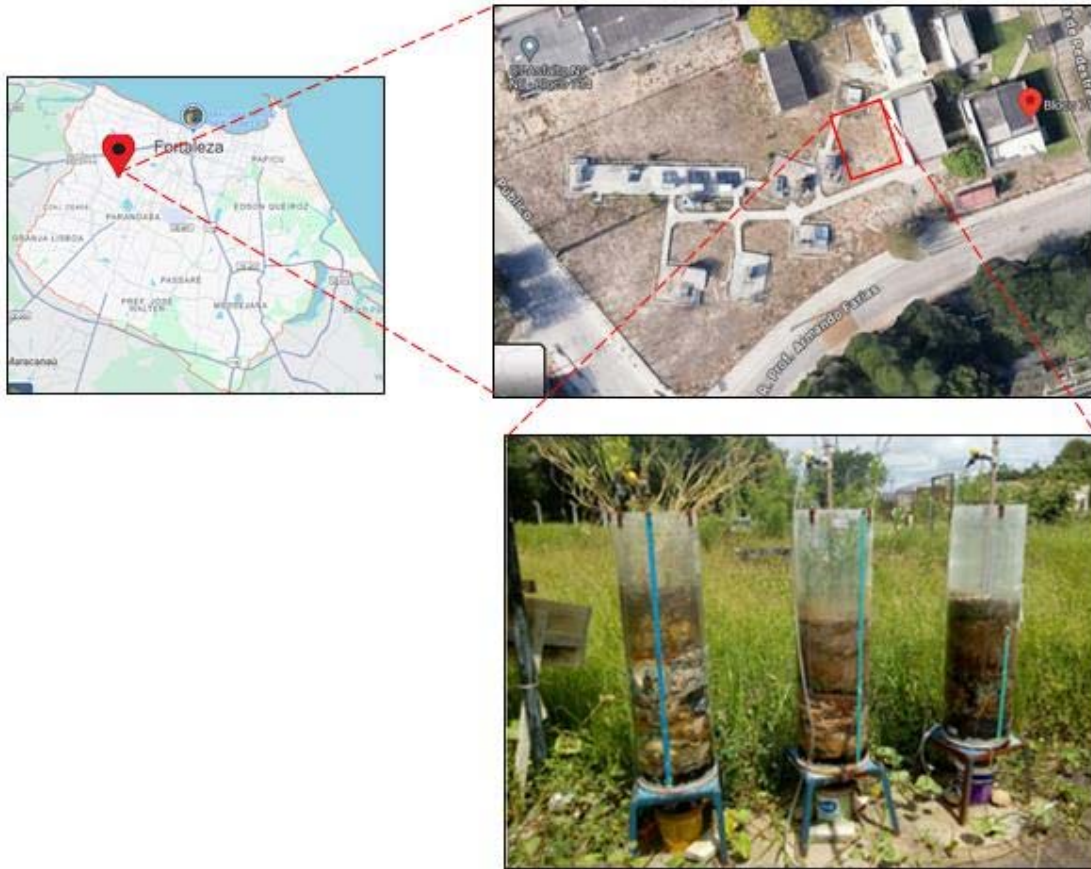


Fonte: Google Earth (2022).

3.3 Localização dos lisímetros

A instalação dos lisímetros foi realizada no interior do campo experimental de energia solar da UFC, coordenadas 3° 44'42.2448" de latitude sul e 38° 34'39.1188" de longitude oeste, como está em destaque na Figura 24.

Figura 24-Localização dos Lisímetros no Campus-Pici da UFC.

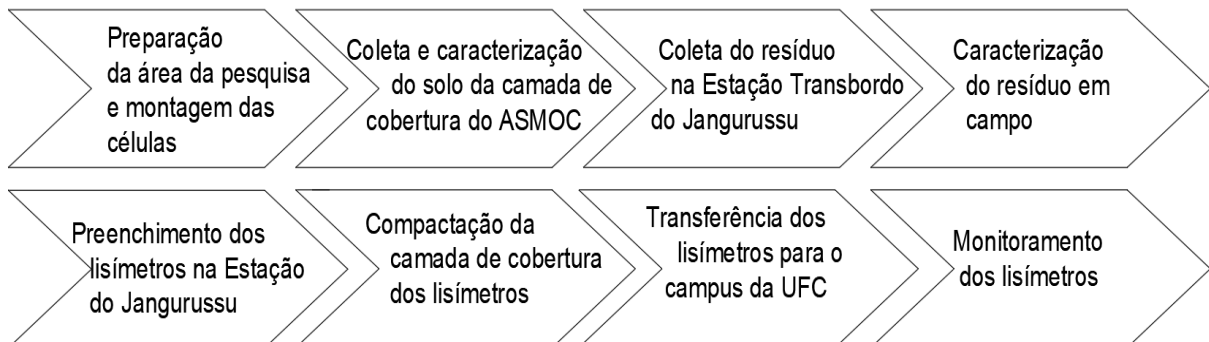


Fonte: Autora (2023).

3.4 Desenvolvimento da pesquisa

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram realizadas as seguintes ações demonstradas na Figura 25.

Figura 25 - Fluxograma da Pesquisa



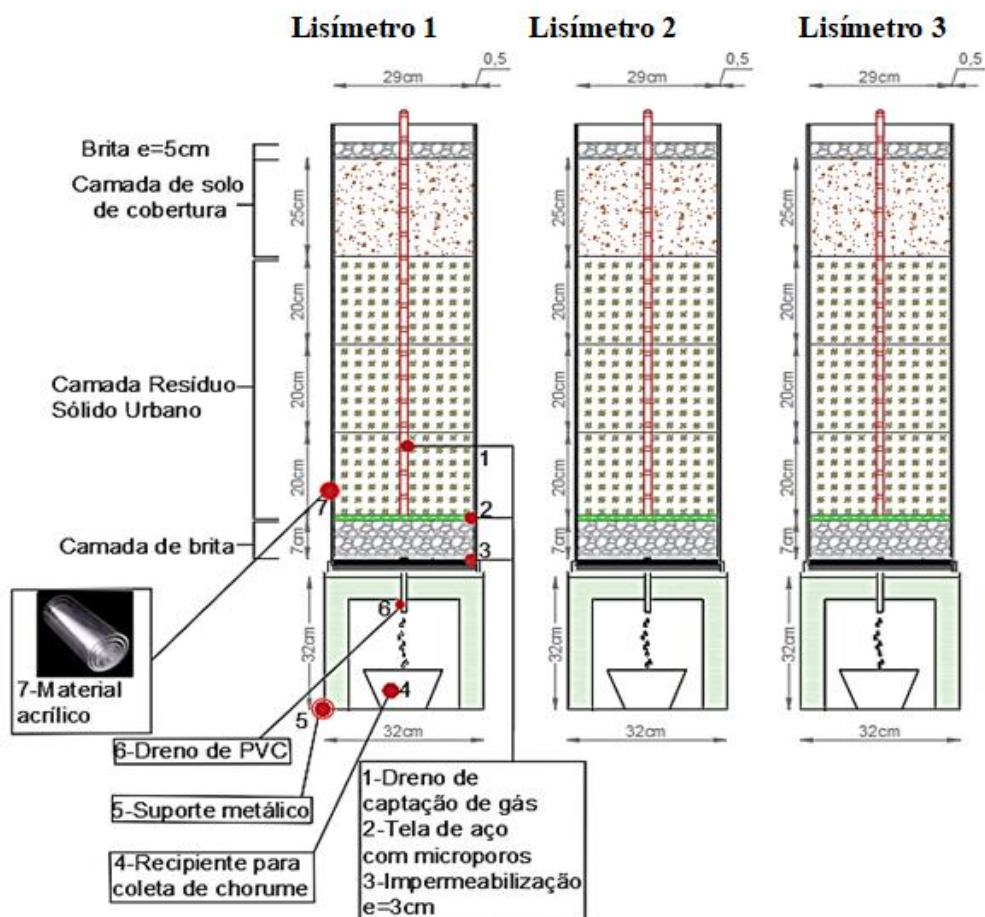
Fonte: Autora (2023).

3.5 Construção dos lisímetros

3.5.1 Projeto do Experimento

Na Figura 26, está o projeto dos três lisímetros experimentais. Antes da execução dos lisímetros, foi pensado em um modelo para a compactação de 3 camadas de 20 cm de resíduos sólidos urbanos, sendo o lisímetro 1 com RSU, o lisímetro 2 com resíduo sólido orgânico e recirculação de chorume, e o lisímetro 3 com resíduo sólido orgânico, mas sem recirculação de chorume. Acima das camadas de resíduos, foi compactada uma camada de 25 cm de solo de camada de cobertura intermediária de aterro sanitário. Abaixo da camada de RSU, foi colocada uma camada de brita 1, de 7 cm de espessura, e acima da camada de solo foi colocada uma fina camada de brita 1, sendo com espessura de 5 cm.

Figura 26- Projeto do Experimento



Fonte: Autora (2022).

3.5.2 Material para a confecção

Na Tabela 6, estão quantificados os materiais utilizados para a confecção dos três lisímetros experimentais.

Tabela 6 - Quantitativo de materiais

Material	Quantidade
Lisímetro acrílico (D=30cm h= 100cm)	03 unidades
Manta butílica	01 unidade
Tubo de silicone Tek Bond 280g	01 unidade
Cola adesiva Tek Bond 20g	02 unidades
Cimento	03 kilogramas
Válvula de pia 1” em PVC	03 unidades
Cap de PVC 1”	03 unidades
Fita veda rosca Tigre	02 unidades
Tampo de madeira 33x33cm	03 unidades
Tela de aço nº8- Abertura 2,72mm 1,50x1,00	01 unidade
Cantoneira Metálica em perfil L 1x1/8”	9,6 metros

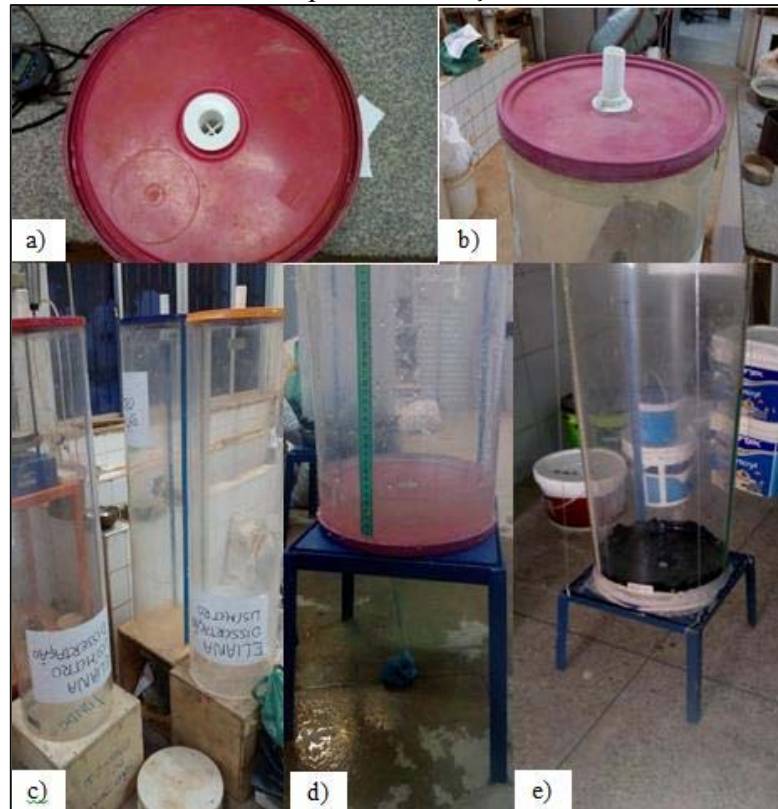
Fonte: Autora (2022)

3.5.3 Montagem e teste de estanqueidade dos lisímetros

Os lisímetros foram confeccionados em material acrílico, com comprimento de 100 cm, espessura de 0,5 cm, diâmetro interno de 29 cm e externo de 30cm. Na parte interna da base foi acoplada uma tampa de PVC (Policloreto de Vinila) com silicone e cola adesiva. Foi realizado um orifício no centro dessa tampa, de aproximadamente 2,5cm de diâmetro, para a instalação de um dreno de PVC, com o objetivo de realizar a coleta do chorume e a determinação dos volumes ao longo do tempo. Ainda na base dos lisímetros foram colocadas camadas de manta butílica para ser feita uma impermeabilização. Foram coladas nas paredes dos lisímetros fitas métricas, para a verificação de recalques provenientes dos resíduos. É importante frisar que antes de depositar os materiais (RSU e solo de cobertura), foi realizado um teste de estanqueidade, onde os lisímetros foram preenchidos com água, a fim de se verificarem possíveis vazamentos. As ilustrações da Figura 27 demonstram a sucessão da confecção dos lisímetros experimentais.

Figura 27- Etapa de montagem dos lisímetros

- a) Execução de um orifício $d=2,5\text{cm}$ b) Instalação de uma válvula para drenagem de lixiviado
 c) Instalação de fitas métricas d) Teste de Estanqueidade e) Manta butílica para reforçar impermeabilização.



Fonte: Autora (2022)

Como aos lisímetros foram expostos às condições ambientais durante o monitoramento (precipitações locais, luz solar intensa e variações térmicas), foram confeccionados suportes de aço inoxidável, de base superior quadrada com 32 cm de lado e 40 centímetros de altura. Estes suportes foram feitos de modo que acomodassem os lisímetros durante o período do monitoramento. Na base quadrada do suporte foi feito um orifício no centro, de 3 cm de diâmetro, para a passagem do dreno de coleta do lixiviado. Na Figura 28 tem-se uma demonstração dos suportes de aço.

Figura 28 - Suportes de aço



Fonte: Autora (2022)

Na Figura 29, estão os ajustes finais dos lisímetros. Foi preparada uma mistura de massa de cimento para fixar a base do lisímetro ao suporte de aço. Esse procedimento serviu para dar estabilidade ao modelo e evitar futuros tombamentos, que poderiam ocorrer durante a fase de instalação e operação.

Figura 29 – Ajustes finais do lisímetros experimentais



Fonte: Autora (2022)

Antes de depositar os materiais nos lisímetros, foi depositada uma camada de brita 1, em uma espessura de 10 cm, para atuar como material drenante na base. Acima da camada de brita foi instalada uma tela de aço inoxidável malha 2,72mm, para evitar possíveis passagens de sólidos para o dreno de coleta do chorume.

3.5.4 Instrumentação dos lisímetros

O quantitativo dos materiais utilizados nesta etapa está demonstrado na Tabela 7, e a demonstração de cada um dos instrumentos pode ser visualizada na Figura 30. É importante frisar que alguns materiais, tiveram um quantitativo de difícil previsão, tais como os septos de silicones, as seringas e fita veda rosca, tendo em vista que esses objetos foram utilizados várias vezes. Os septos de silicone localizados na parte superior do cano de PVC, por exemplo, devido estarem expostos à radiação solar, então tiveram que ser trocados algumas vezes, devido aos ressecamentos na sua estrutura.

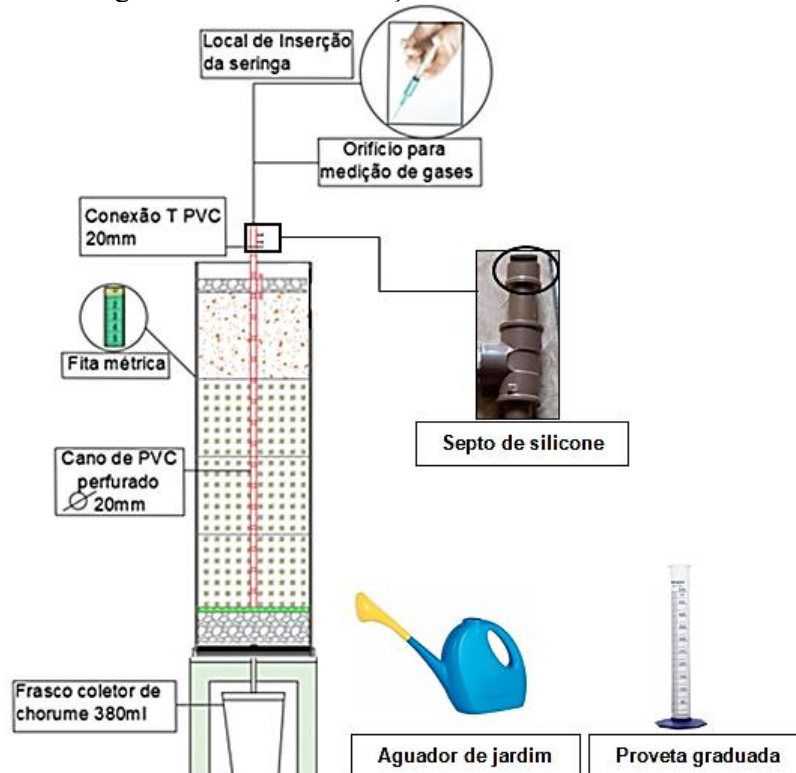
Tabela 7 - Quantitativo para instrumentação

Material	Quantidade
Cano de PVC – Diâmetro 20mm	03 metros
Redução de PVC	03 unidades
Cap de PVC– Diâmetro 20mm	03 unidades
Frasco coletor de chorume - 380ml	03 unidades
Septos de silicone	variou
Caixa Fita Veda Rosca	variou
Conexão T 25mm -1/2”	03 unidades
Seringas com luer lock (trava de segurança)	Variou
Aguador de jardim de plástico	01

Fonte: Autora (2022)

A tubulação de gás foi confeccionada de forma que na extremidade superior do cano de PVC fosse conectado a um cap com um orifício no centro, onde foi colocado um septo de silicone, como pode ser visto na Figura 30, este objeto serviu para a vedação do cap. Este objeto foi perfurado por uma seringa com trava de segurança, onde foi realizada a coleta dos gases por meio de uma sucção. Posteriormente, os gases extraídos através das seringas foram analisados por meio de cromatografia gasosa.

Figura 30 - Instrumentação dos lisímetros



Fonte: Autora (2022).

A tubulação de gás, demonstrada na Figura 30, foi instalada durante o processo de

preenchimento dos lisímetros com resíduos. A cota de assentamento do cano foi 10 cm acima da base do lisímetro, ou seja, acima da camada de brita 1. A altura do cano se estendeu além da cota superior da camada de cobertura intermediária.

Para ser realizada a medição dos recalques decorrentes da degradação dos resíduos, foram instaladas 3 fitas métricas na superfície exterior dos lisímetros, como demonstrado na Figura 30. A medição do recalque foi manual, onde foi verificado o comportamento da acomodação do RSU ao longo dos meses de monitoramento, e com isso foram anotadas as diferenças de alturas.

Para a obtenção das amostras de lixiviado foram utilizados frascos coletores de plástico de 380 mililitros, que foram colocados abaixo dos drenos dos lisímetros. Conforme a geração do chorume foi ocorrendo, foram medidos os volumes através de uma proveta graduada de vidro. A periodicidade das coletas será apresentada no subtópico de monitoramento do lixiviado.

Para a realização da recirculação periódica semanal de chorume, foi utilizado um regador de jardim simples, de material plástico. No momento da coleta do lixiviado, do total do volume coletado foram separadas 500 ml, de cada lisímetro, para as análises físico-químicas, o restante foi para recirculação direta de chorume bruto, sem nenhum tratamento prévio.

3.6 Caracterização da camada de cobertura intermediária dos lisímetros

O solo de cobertura dos lisímetros foi coletado na camada intermediária do platô do Aterro Sanitário Metropolitano do Oeste de Caucaia – ASMOC, como mostrado na Figura 31. Posteriormente as amostras de solo retiradas do ASMOC foram encaminhadas para o Laboratório de Mecânica dos Solos da UFC, para a realização de ensaios geotécnicos de caracterização.

Figura 31- Camada Intermediária ASMOC



Fonte: Autora (2022)

3.6.1 Ensaios geotécnicos e de fluorescência por energia dispersiva

Foram realizados ensaios de caracterização, tais como: preparação de amostras granulometria, densidade real dos grãos, limites de Atterberg (LL e LP), determinação de massa específica com o cilindro de cravação e o ensaio de compactação. Também foram realizados os ensaios de permeabilidade, de teor de matéria orgânica e o ensaio de fluorescência por energia dispersiva (EDXRF), para verificar os elementos químicos presentes no solo. Os ensaios realizados e a suas respectivas normas estão demonstradas na Tabela 8 e nas Figura 32.

Tabela 8 - Ensaios realizados.

Ensaio	Normas
Preparação de amostras	NBR 6457, 2016
Densidade real dos grãos	NBR 6508, 1984
Granulometria	NBR 7181, 2016
Limite de liquidez	NBR 6459, 2017
Limite de plasticidade	NBR 7180, 2016
Permeabilidade	NBR 13292, 2021
Compactação	NBR 7182, 2016
Teor de matéria orgânica	NBR 13600, 2022
Massa específica, com o cilindro de cravação.	NBR 9813, 2016
Fluorescência por energia dispersiva - EDXRF	Não há norma

Fonte: Autora (2022)

Todos os ensaios citados na Tabela 8 foram realizados na Universidade Federal do Ceará, sendo que os ensaios geotécnicos foram executados no laboratório de Mecânica dos Solos, e o ensaio de fluorescência por energia dispersiva (EDXRF) foi realizado no laboratório de Microscopia Eletrônica de Verredura, do Departamento de Geologia. O ensaio de EDXRF não tem uma norma pré-definida como os ensaios geotécnicos, os laboratórios realizam este ensaio conforme alguns manuais, tais como o de Nascimento Filho (1999). Algumas demonstrações dos ensaios podem ser visualizadas na Figura 32.

Figura 32- Execução de ensaios

a)Preparação b)Granilometria c) Deensidade real d) LL e) LP f)Compactação g) Matéria orgânica h) Permeabilidade i) Massa específica pelo cilindro de cravação j) EDXRF



Fonte: Autora (2022).

3.7 Preenchimento dos lisímetros

Inicialmente, no interior dos lisímetros, foi colocada uma camada de 7 cm de brita 1 e uma tela de aço inoxidável de malha 8 com abertura de 2,72mm, como podem ser visualizadas na Figura 33, estes materiais tiveram a função drenante e filtrante, para conduzir o efluente gerado e evitar o entupimento da tubulação do dreno do chorume, devido aos restos de alimentos dos resíduos, o que poderia prejudicar a coleta do lixiviado.

Figura 33 - Preparação da base dos lisímetros

a)Acomodação da brita b)Medição da altura c)Tela de aço inox na base



Fonte: Autora (2022)

3.7.1 Preparação das amostras e compactação do material

Nesta etapa, foi necessária a seleção de um local para ser realizada a coleta e separação dos resíduos sólidos, onde este local foi o pátio da Estação de Transbordo do bairro Jangurussu, Figura 34, localizada aproximadamente a 200 metros do centro do antigo aterro do Jangurussu, em Fortaleza-Ce.

Figura 34 - Pátio da Estação de Transbordo Jangurussu – Fortaleza-Ce.



Fonte: Autora (2022).

Na etapa de separação dos resíduos sólidos urbanos, foi colocada uma lona de plástico na área do pátio da estação, a fim de serem medidas as massas dos materiais para o preenchimento dos três lisímetros, como pode ser observado nas ilustrações da Figura 35.

Figura 35- Preparação dos materiais para preenchimento dos lisímetros
a)RSU b)RSO c) Plásticos d) Papelões, papeis e) Retalhos de tecidos f) Vidros g) Metais em geral h) Rejeitos



Fonte: Autora (2022).

O preenchimento dos lisímetros L1, L2 e L3 foi realizado com resíduos recém-chegados na Estação de Transbordo do Jangurussu, da cidade de Fortaleza-Ce. A compactação foi realizada gradualmente, em 3 camadas de 20 cm, de modo que os RSU fossem acomodados em uma camada total de 60 cm de espessura. Deste modo, foram sendo verificadas as massas, com auxílio de uma balança digital, de cada grupo de resíduo até o preenchimento completo dos três lisímetros. As massas de resíduos referentes a cada lisímetro estão demonstradas na Tabela 9.

Tabela 9 - Massas de resíduos dos lisímetros

Lisímetro 1¹		Lisímetro 2²		Lisímetro 3³	
Tipo	Massa (kg)	Tipo	Massa (kg)	Tipo	Massa (kg)
Têxteis	2,3	Origem orgânica	29,86	Origem orgânica	29,23
Rejeitos	8,1				
Origem orgânica	17,1				
Plástico	5,1				
Vidro	3,1				
Papéis	3,0				
Metais	0,3				
Total	39		29,86		29,23

*1 - L1 – resíduos sólidos urbanos

*2 - L2– 100% de matéria orgânica e recirculação de chorume

*3 - L3– 100% de matéria orgânica

Fonte: Autora (2022).

A balança digital utilizada pode ser verificada na Figura 36. No que se refere à compactação dos resíduos, foi utilizado um compactador construído em material de concreto, demonstrado na Figura 37. As características físicas do compactador foram: massa de 9,8 kg, dimensões de 9 cm de diâmetro e 10 cm de altura.

Figura 36- Balança digital



Fonte: Autora (2022).

Figura 37 – Compactação dos resíduos com o compactador de concreto

a) Compactação L1 b) Compactação L2 c) Compactação L3 d) Compactador



Fonte: Autora (2022).

Para a compactação do solo, também foi utilizado o mesmo compactador demonstrado na Figura 37. O solo utilizado nos lisímetros foi preparado através da mistura de 3 amostras coletadas em pontos diferentes da camada de cobertura intermediária do ASMOC. A compactação do solo foi realizada visando simular a densidade obtida em campo, da camada intermediária do aterro. Para isso, a massa de solo foi obtida com os dados da densidade de campo, $20,2 \text{ kN/m}^3$ e do volume de solo no interior do lisímetro, calculado para uma espessura de 25 cm, com $16.512,99 \text{ cm}^3$. Na Tabela 10, está a massa de solo utilizada em cada um dos lisímetros, com base na densidade obtida em campo.

Tabela 10 – Dados do solo utilizado no lisímetro

Dado de campo	
Densidade do solo (kN/m^3)	20,2
Lisímetro (h=25cm)	
Volume (cm^3)	16.512,99
Massa de solo (kg)	34,01

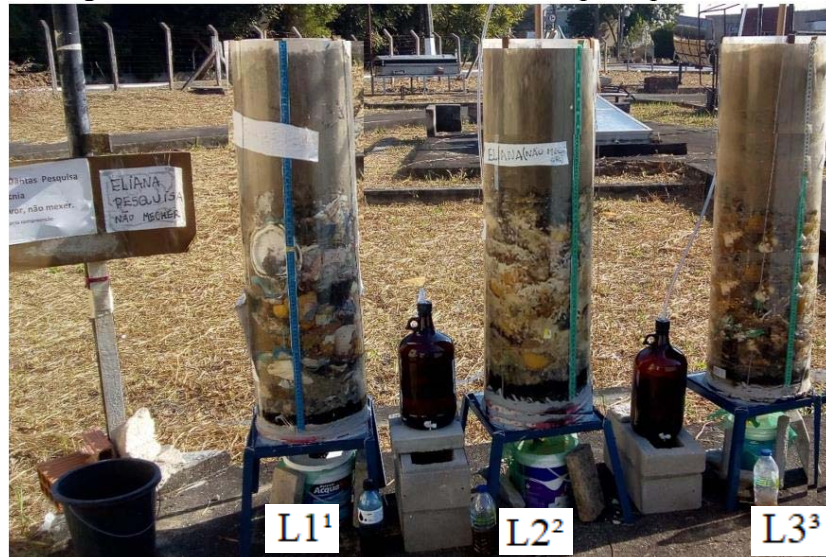
Fonte: Autora (2022).

3.7.2 Implantação e monitoramento dos lisímetros

Após a compactação das camadas de resíduos e de solo, os lisímetros experimentais foram transportados para o campo de Energia Solar da UFC, como está

mostrado na Figura 38. No monitoramento dos 3 lisímetros, foram feitos os seguintes procedimentos: coletas de amostras do lixiviado, recirculação de lixiviado no Lisímetro 2, medições manuais de recalques e medições de gases (para verificar a qualidade dos gases gerados).

Figura 38 - Lisímetros instalados no campo experimental



*1 - L1 – resíduos sólidos urbanos

*2 - L2– 100% de matéria orgânica e recirculação de chorume

*3 - L3– 100% de matéria orgânica

Fonte: Autora (2022).

A partir das amostras coletadas do lixiviado, foram realizadas análises físico-químicas, com o objetivo de correlacionar as características do lixiviado, com o comportamento dos recalques, ao longo de 6 meses de medições. O período do monitoramento compreendeu os meses de setembro/2022 até fevereiro/2023.

3.8 Medições in situ

3.8.1 Medição do volume do chorume

Foram realizadas coletas periódicas do chorume entre setembro/2022 e fevereiro/2023, em geral uma coleta a cada 15 dias, conforme o cronograma apresentado na Tabela 11. No primeiro mês da pesquisa foi necessária a realização de mais de uma coleta, devido ao resíduo ainda estar bastante úmido. Nos últimos meses do monitoramento, de janeiro a fevereiro, houve a necessidade de realizar maior número de coletas, devido à ocorrência de maiores volumes de precipitação no local, que acarretou um aumento da vazão do percolado em relação à meses anteriores.

Tabela 11 – Cronograma das coletas de lixiviados dos lisímetros.

Quinzena	Nº 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: Autora (2023)

Para permitir a coleta do volume percolado nos lisímetros, foram instalados recipientes de plásticos, abaixo da torneira de cada lisímetros, como pode ser visto na Figura 39, com o fim de evitar que o líquido contaminasse o alicerce do campo.

Figura 39 - Coleta do lixiviado



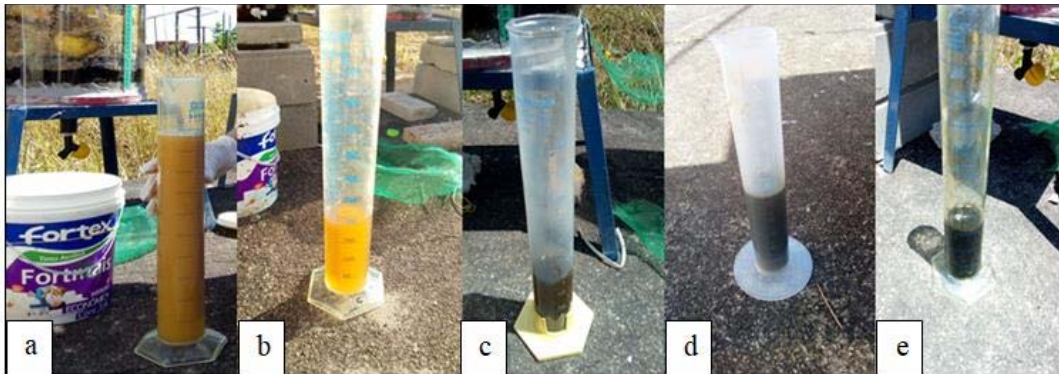
Fonte: Autora (2023)

Os volumes das amostras foram determinados com o auxílio de uma proveta graduada de vidro.

Conforme pode ser verificado na Figura 40, a cor do lixiviado, para os três lisímetros, foi se modificando ao longo do decorrer das semanas.

Figura 40 - Variação da cor do lixiviado ao longo dos meses.

a) 1ª semana de coleta b) 2ª semana de coleta c) 2º mês de coleta d) 3º mês de coleta e) 4º mês de coleta



Fonte: Autora (2023)

3.8.2 Análises Físico-químicas do lixiviado

As análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental da UFC. Na Tabela 11, estão descritos os parâmetros físico-químicos que foram analisados, juntamente com seus respectivos métodos e fontes bibliográficas.

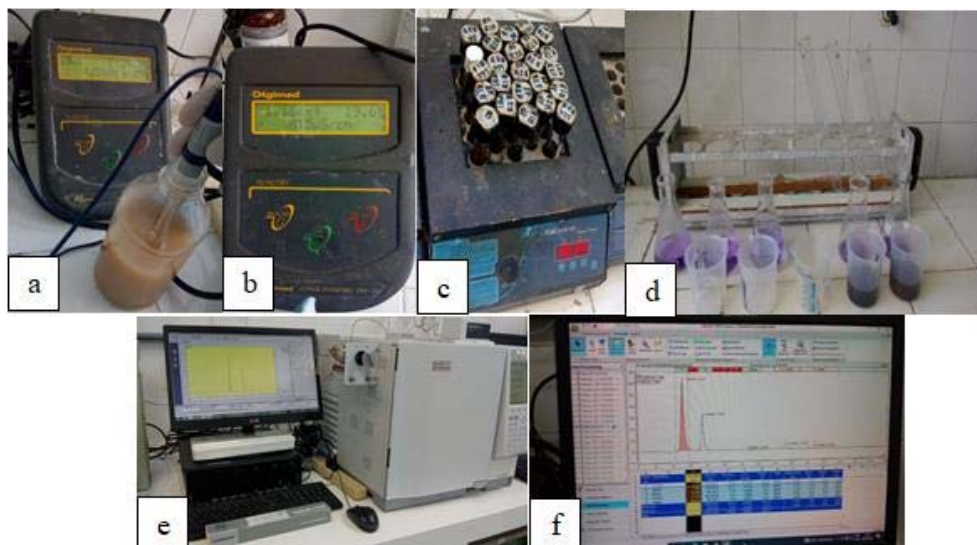
Tabela 12- Parâmetros Físico-químicos

Análise	Método	Referência bibliográfica
pH	4500-H+ B	APHA (2012)
Amônia (mg/L)	4500-NH3C: Método Titulométrico	APHA (2012)
DQO (mg/L)	5220 D: Método Colorimétrico com digestão em refluxo fechado.	APHA (2012)
Condutividade elétrica uS/cm	Método potenciômetro	APHA (1998)
Cloreto, Nitrato	4110 B: Cromatografia de íons	APHA (2012)

Fonte: Autora (2023).

A Figura 41 apresenta os equipamentos utilizados nos ensaios de laboratório, para a determinação dos parâmetros físico-químicos realizados das amostras dos lixiviados coletados nos lisímetros.

Figura 41- Equipamentos utilizados nos ensaios físico-químicos
 a) pH b) Condutividade elétrica c) DQO d) Amônia e) Cromatografia gasosa f) Cromatografia de íons



Fonte: Autora (2023).

3.8.3 Medição de recalques

Conforme apresentado na Figura 42, os recalques dos 3 lisímetros foram medidos, manualmente com o auxílio de fitas métricas, instaladas na face de cada lisímetro, onde foram verificados os deslocamentos verticais. As leituras foram feitas quinzenalmente, ao longo da pesquisa. Os deslocamentos foram anotados e inseridos em uma planilha de Excel, para a plotagem das curvas de recalques.

Figura 42 - Medição manual dos recalques.

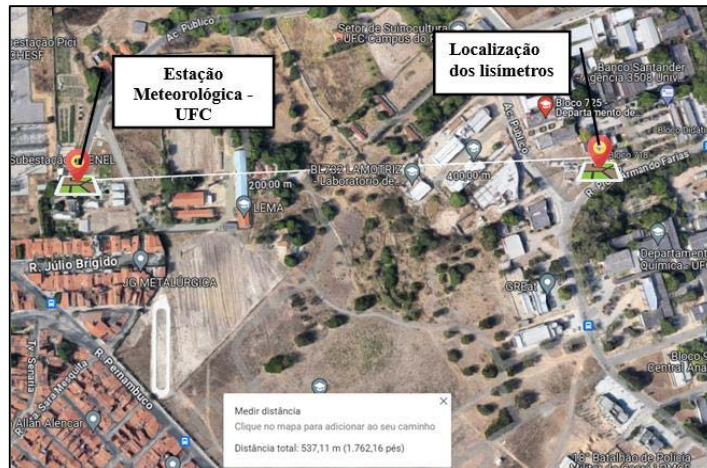


Fonte: Autora (2023)

3.8.4 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos através da Estação Meteorológica da UFC, junto ao Departamento de Engenharia Agrícola, cujos engenheiros são responsáveis pela edição dos dados. Na Figura 43, está a distância entre a estação e o ponto onde estão instalados os lisímetros, sendo aproximadamente de 540 metros.

Figura 43 - Distância entre a Estação Meteorológica-UFC e os lisímetros.



Fonte: Auora (2022).

Para cada mês, de Setembro/2022 a Fevereiro/2023, foram coletados dados referentes à precipitação e à evaporação potencial, respectivamente, através de um pluviômetro tipo Ville de Paris e de um tanque de evaporação Classe A, que são mostrados na Figura 44. Os volumes de precipitação e evaporação, em milímetros (mm), são verificados diariamente, de forma manual, na estação meteorológica da universidade. Esses dados foram importantes, para a observação do volume de lixiviado gerado em épocas de menores e maiores precipitações.

Figura 44 - Estação Meteorológica - UFC

a) Campo da Estação b) Pluviômetro Ville de Paris c) Tanque de evaporação



Fonte: Auora (2022)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste Capítulo, estão apresentados os resultados encontrados durante o monitoramento dos lisímetros experimentais. Foi realizada uma discussão sobre os resultados da caracterização da camada de cobertura intermediária de aterros de RSU, a qual foi utilizada nos lisímetros. Também foram discutidos os resultados para a composição gravimétrica dos três lisímetros utilizados no experimento. Por fim, foram demonstrados os resultados do monitoramento dos recalques, das análises físico-químicas do lixiviado e da qualidade dos gases decorrentes da biodegradação dos resíduos.

4.1 Caracterização física do solo de camada intermediária de Aterro Sanitário

4.1.1 Análise granulométrica por peneiramento

Nos ensaios de granulometria, foi possível verificar qual tipo de solo foi estudado neste trabalho. Os resultados dos ensaios de granulometria foram realizados em 3 amostras coletadas nos três pontos de coleta descritos na metodologia (Figura 23), que corresponde ao solo da camada de cobertura intermediária do ASMOC.

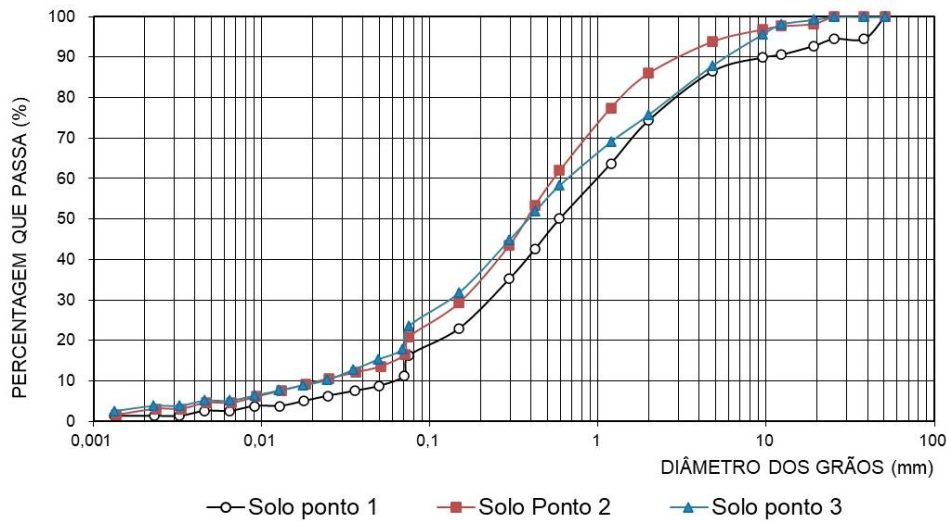
Conforme pode ser verificado nas curvas granulométricas da Figura 45, e nas porcentagens médias da composição do solo para os pontos 1, 2 e 3, mostrados na Tabela 13, as curvas granulométricas mostraram-se bem graduadas, com a distribuição dos grãos de solo existentes em vários diâmetros. É perceptível, através das três curvas, que o solo da camada intermediária apresentou-se como uma areia, conforme a NBR 7181/2016. Como pode ser verificada na curva granulométrica do solo coletado no ponto 1, o maior percentual foi de areia média com 32%, para o solo do ponto 2 o percentual de areia média também foi maior com 33%, já o solo do ponto 3 o percentual foi maior para areia fina com 28%. Esses resultados eram esperados, por se tratar de uma camada de cobertura intermediária de aterro sanitário.

Avaliando as amostras de solo através do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), foi observado que o material se comportou como areia bem graduada (SW), com pouco ou nenhum material fino (Caputo, 1977).

Silva (2017) realizou ensaios de análise granulométrica em 2 amostras de solo de camadas intermediárias, no aterro do ASMOC, onde as maiores frações da análise também foram de uma areia, como nesta pesquisa. O autor verificou que as maiores porcentagens de

areia das amostras foram entre 49% e 55% do total da composição.

Figura 45 - Análise granulométrica



Fonte: Auora (2022).

Tabela 13- Frações em porcentagem (%)

Composição	Solo P1 ¹ (%)	Solo P2 ² (%)	Solo P3 ³ (%)	Frações média (%)
Pedregulho	13,00	6,00	12,00	10,30
Areia grossa	12,00	8,00	12,00	10,70
Areia média	32,00	33,00	24,00	29,70
Areia fina	27,00	32,00	28,00	29,00
Silte+argila	16,00	21,00	24,00	20,30

1-P1: solo coletado no ponto 1 2- P2: solo coletado no ponto 2

3-P3: solo coletado no ponto 3

Fonte: Autora (2022).

É importante que as camadas intermediárias de solo, sejam compostas por solos mais permeáveis, com maiores diâmetros médios dos grãos, para facilitar a percolação do chorume para o sistema de coleta de tratamento, evitando a formação de bolsões de chorume, que geram pressões internas que podem conduzir a instabilidades no aterro. Segundo Sousa Pinto (2006), caso os diâmetros das partículas do solo sejam muito pequenos, da ordem menor que 0,002 mm, acarretará em baixos coeficientes de permeabilidade. Conseqüentemente, o sistema de drenagem interna do aterro sanitário pode ficar comprometido (Boscoy, 2008; Denardin, 2013).

4.1.2 Densidade real dos grãos

Os valores de densidade real dos grãos (δ), obtidos para o solo de cobertura intermediária são apresentados na Tabela 14. Para o solo dos pontos 1, 2 e 3 foram respectivamente 2,66; 2,57; 2,65. O valor médio foi de aproximadamente 2,63, para a densidade real do solo da camada intermediária, sendo que esse valor é típico de solos na geotecnia, além disso foram valores próximos obtidos por diferentes pesquisadores, como Terzaghi e Peck (1967), Nascimento *et al.* (2021), Coelho *et al.* (2005), Alcântara (2007) e Silva (2017). Segundo Caputo (1996), os valores de densidade real podem diminuir, caso os solos apresentem altos teores de matéria orgânica.

Tabela 14 - Densidade Real dos grãos (δ)

Amostra	Densidade real (δ)
Solo P1	2,66
Solo P2	2,57
Solo P3	2,65
Média	2,62

Fonte: Autora (2022).

4.1.3 Densidade, teor de umidade e compactação

Na Tabela 15, estão apresentados os resultados para a densidade *in situ* das amostras de solo referentes aos 3 pontos de coleta, obtidos com o cilindro de cravação, que foi explicado no capítulo de metodologia. Foram encontrados valores de densidades médias natural e seca com valor de 20,2 kN/m³ e 18,2 kN/m³. Esses resultados foram menores, quando comparados às densidades natural e seca encontradas na pesquisa de Coelho *et al.* (2005), com 25,6 kN/m³ e 20,6 kN/m³ respectivamente. Este mesmo autor trabalhou com uma amostra de solo com teor de umidade 24%, um teor maior do que foi encontrado nesta pesquisa, 10,5%, consequentemente a umidade impacta nos valores de densidade da amostra.

Tabela 15 – Densidade natural e seca.

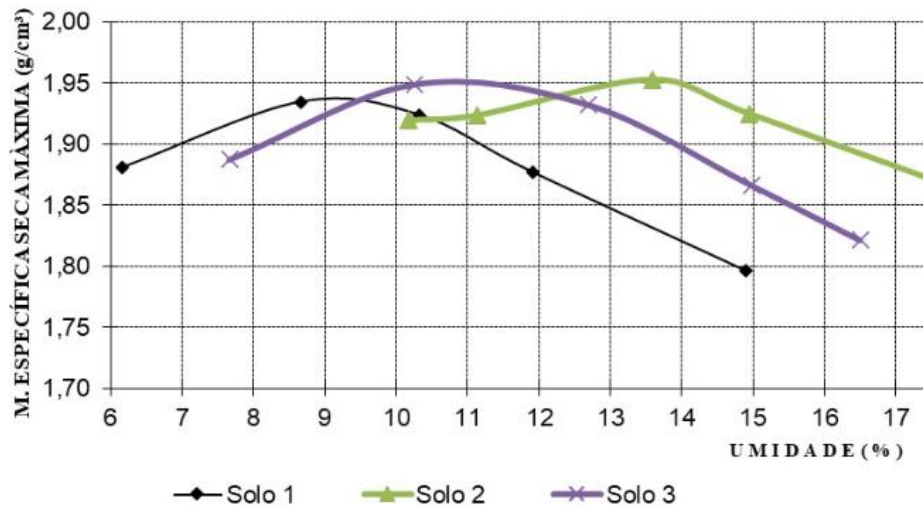
Dados do Cilindro de cravação				
Raio (cm)= 5,25, Altura (cm)= 9,50, Volume (cm ³)=822,60				
Dados do solo obtidos em campo				
	P1	P2	P3	Média
Massa do solo (g)	1804,52	1579,49	1701,49	1695,17
Umidade W (%)	5,20	11,04	15,43	10,55
Massa específica ρ (g/cm ³)	2,19	1,92	2,06	2,06
Massa específica seca ρ (d) (g/cm ³)	2,08	1,73	1,78	1,86
Densidade natural (kN/m ³)	21,48	18,83	20,20	20,2
Densidade seca (kN/m ³)	20,41	16,95	17,50	18,2

Fonte: Autora (2022).

Brito Filho (2005) explica que o teor de umidade do solo dos aterros é afetado pelo tempo de colocação das camadas de solo, a quantidade de cobertura e o tipo de solo utilizado nas camadas intermediárias. É perceptível que para os três pontos de coleta mostrados na Tabela 15, os valores de umidade divergiram. Há uma hipótese que o solo alocado na camada de cobertura intermediária, para cada ponto, seja de jazidas diferentes. Catapreta (2008) encontrou valores de umidade para a camada de solo de cobertura diária de aterro, com intervalo entre 5% e 28%, para várias amostras, essa variabilidade também foi verificada nesta pesquisa.

A umidade é um parâmetro que pode variar muito, tendo em vista que ela é influenciada pela precipitação que pode ocorrer no local, pela evaporação também. Além disso ela é um importante parâmetro para a obtenção da densidade seca *in situ*, que é uma forma de se investigar o quão adequado está a compactação em campo, tendo em vista que em campo este dado pode não ser tão rigorosamente controlado. Conforme a Figura 46 que mostra as curvas do ensaio de compactação e os dados da Tabela 16 obtidos em laboratório, as amostras de solo apresentaram valor médio de densidade seca máxima de 19,10 kN/m³. A densidade seca obtida em campo, foi de 18,20 kN/m³, ou seja, um valor muito próximo da densidade obtida de forma controlada, em laboratório com a energia do Proctor Normal. Portanto, o solo simulado para uma camada de cobertura intermediária nos lisímetros experimentais teve um grau de compactação de 95%, indicando uma boa compactação de campo.

Figura 46 - Curvas de compactação



Fonte: Autora (2022).

A compactação é de grande relevância no que se refere à duração da fase aeróbia. Se não houver uma adequada compactação que assegure uma boa densidade, o oxigênio conseguirá ultrapassar as camadas intermediárias, ao ponto da fase aeróbia durar mais tempo em um aterro sanitário, retardando assim os processos anaeróbios.

Tabela 16 – Dados do ensaio de compactação

Amostras	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média
Umidade ótima W	9,85	13,10	11,00	11,3
Massa específica seca máxima pd (g/cm³)	1,93	1,96	1,95	1,95
Densidade seca máxima (kN/m³)	18,93	19,22	19,12	19,10

Fonte: Autora (2022)

4.1.4 Teor de matéria orgânica, mineralogia

Os resultados encontrados para teores de matéria orgânica, mostrados na Tabela 17, apresentaram 1,29% para o solo coletado no ponto 1, 1,07% para o solo coletado no ponto 2 e 2,05% para o solo coletado no ponto 3. Segundo Caputo (1996) quanto menor for o teor de matéria orgânica no solo, menor será a presença de óxido de ferro (FeO). Coincidentemente, a amostra de solo do ponto 2 foi a que apresentou o menor teor de matéria orgânica, e não foi encontrada resquícios desse elemento químico, como pode ser verificado nos resultados do ensaio de EDXRF, na Tabela 18.

Tabela 17 – Teor de matéria orgânica

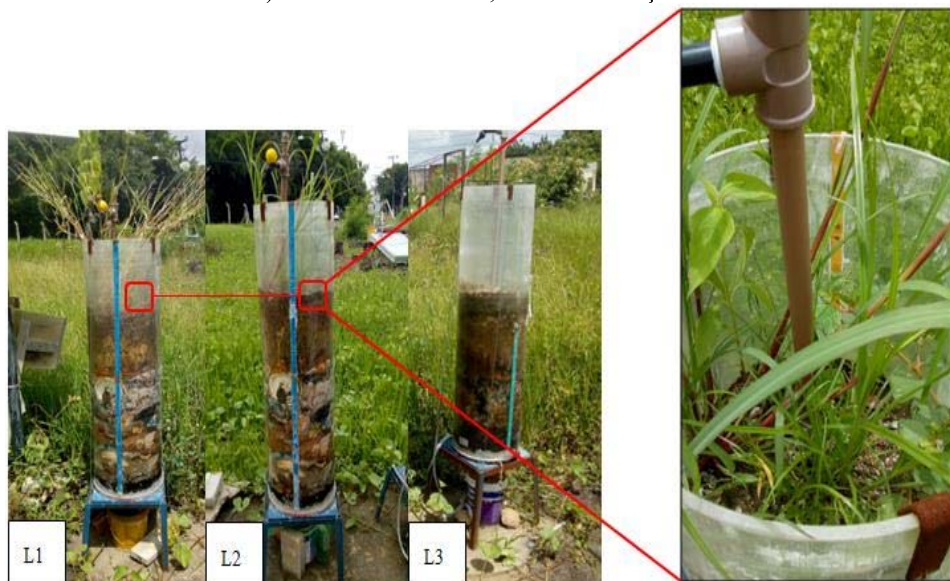
Amostras	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Média
Teor de matéria orgânica (%)	1,29	1,07	2,05	1,47

Fonte: Autora (2022)

Segundo Santos e Zaroni (2021), o óxido de ferro (FeO) é um importante composto químico associado à fixação do fósforo no solo, muito importante na nutrição de plantas que podem se desenvolver, inclusive, em solo de aterro de RSU. Há uma hipótese que este composto possa ter contribuído para o crescimento de plantas na camada de cobertura intermediária dos lisímetros L1 de RSU e L2 de RSO, como mostra a Figura 47. Além do mais, outros fatores devem ter contribuído para o surgimento da cobertura vegetal, tais como os ventos que podem ter transportado sementes, pássaros que podem ter transportado sementes também e a própria condição natural de fertilidade do solo.

Figura 47 – Demonstração de crescimento de plantas.

L1) Lisímetro de RSU L2) Lisímetro de RSO com recirculação
L3) Lisímetro com RSO, sem recirculação



Fonte: Autora (2023)

Como no preenchimento dos lisímetros, houve uma mistura das três amostras de solo, os percentuais de FeO encontrados no Ponto 1 e Ponto 3, de 18,6% e 43,40%, respectivamente, mostrados na Tabela 18, se acumularam, podendo ter potencializado a disponibilidade desse nutriente no solo.

Tabela 18 – Composição mineralógica do solo de cobertura intermediária.

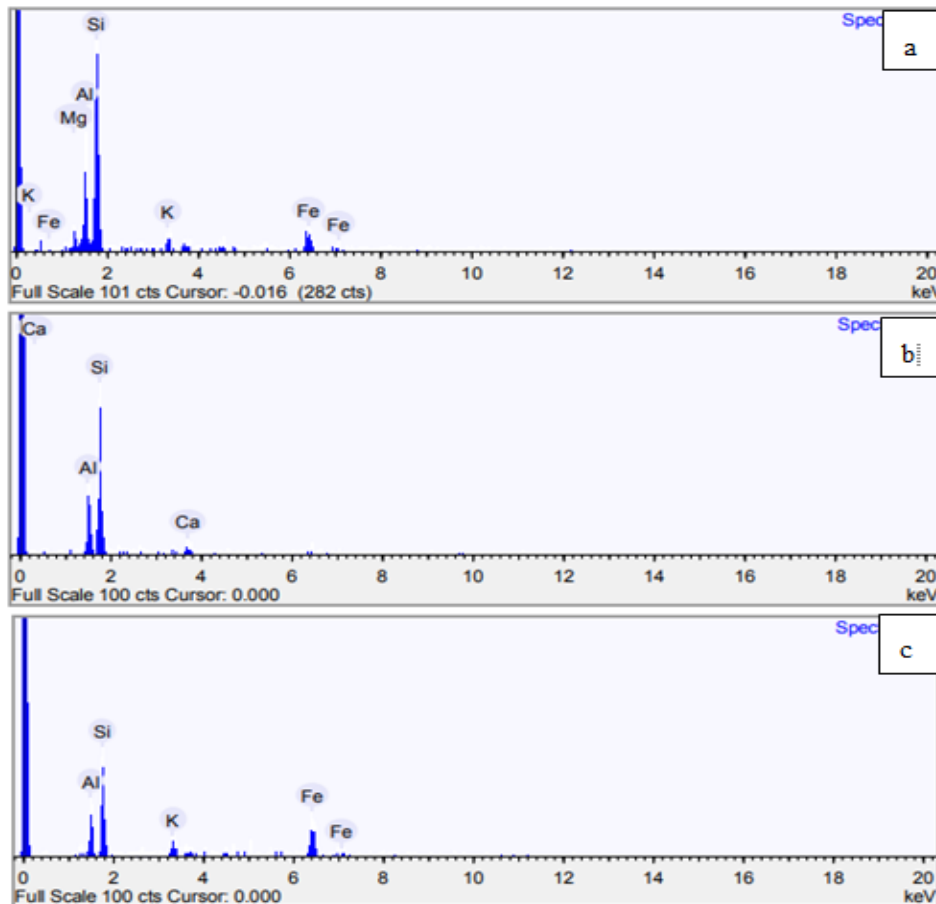
Mineral	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Óxido de Ferro (FeO)	18,60	-	43,40
Óxido de Potássio (K ₂ O)	3,20	-	5,30
Dióxido de Silício (SiO ₂)	57,50	73,60	36,40
Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃)	18,00	20,20	14,90
Óxido de Magnésio (MgO)	2,70	-	-
Óxido de Cálcio (CaO)	-	6,20	-

Fonte: Autora (2022)

Conforme pode ser observado na Figura 48, os spectrums das 3 amostras de solo P1, P2 e P3 indicaram grande intensidade para o composto sílica. Segundo Araújo (2017) solos do tipo areia apresentam grandes quantidades de sílica (SiO₂) em sua composição, e este composto químico influencia na redução da capacidade de retenção de água e da plasticidade do solo.

Figura 48 - Spectrum das amostras P1, P2 e P3.

a) Amostra coletada no ponto 1 b) Amostra coletada no ponto 2
c) Amostra coletada no ponto 3



Fonte: Autora (2022)

4.1.5 Limites de Atterberg: Plasticidade e Liquidez

Nesta pesquisa, as amostras de solo utilizadas nos lisímetros apresentaram-se como não plásticas e não líquidas, foi impossível moldar os cilindros de solo no ensaio de plasticidade. Isso pode ser compreendido pela classificação do solo, por ser areia bem graduada, com pouca quantidade de finos. Conforme as classificações do sistema (SUCS), as areias com pouco ou nenhum material fino são subdivididos de acordo com suas propriedades de distribuição granulométrica como bem graduado (SW) ou mal graduadas (SP). Na Geotecnia, é comum estes solos apresentarem baixa ou nenhuma plasticidade. Para Ferreira *et al.* (2022), solos com baixa plasticidade são suscetíveis a sofrerem menores deformabilidades. Os autores também alertam que solos com essa classificação possuem em sua estrutura física macroporos que podem facilitar a fuga de todos os gases gerados no processo de biodegradação.

4.1.6 Permeabilidade

Como o resultado para a análise granulométrica do solo de cobertura intermediária indicou uma areia média, é esperado que os coeficientes de permeabilidade das amostras, apresentados na Tabela 19, fossem próximos dos coeficientes de permeabilidade das areias. É importante lembrar que os coeficientes foram obtidos com o solo de campo, sem a compactação com Energia do Proctor Normal. Na literatura, os valores de coeficiente de permeabilidade para as areias estão entre 10^{-2} cm/s e 10^{-6} cm/s, este intervalo está de acordo com o que foi encontrado nesta pesquisa, que foi entre 10^{-3} cm/s e 10^{-4} cm/s (Caputo, 1996; Sousa Pinto, 2006).

Ferreira e Mahler (2006), que também avaliaram camadas de cobertura intermediária de aterro de RSU encontraram o mesmo intervalo de coeficiente de permeabilidade verificada nesta pesquisa, entre 10^{-3} cm/s e 10^{-4} cm/s. É importante frisar que os resultados de permeabilidade do solo utilizado nos 3 lisímetros, que indicaram uma areia, apresentaram valores em concordância com a função a que se destina uma camada intermediária, que é facilitar a drenagem do lixiviado.

A porcentagem referente aos materiais orgânicos se mostrou maior dentre as frações. Este resultado mantém uma similaridade com a composição gravimétrica nacional, no que se refere ao teor de matéria orgânica. Segundo dados da ABRELPE (2020), a composição gravimétrica do Brasil demonstrou um percentual de 45% de matéria orgânica em 2020, um valor muito aproximado do que foi encontrado nesta pesquisa com 43,79% em 2022. Segundo Santos e Mota (2010), o percentual de matéria orgânica dos resíduos domiciliares era 47% em 2009, Da Silva (2013) encontrou um percentual de 41% em 2012. No Brasil, esse percentual de teor orgânico vem sofrendo um decréscimo, em 1999 era de 67%, em 2001 cerca de 65%, em 2008 diminuiu para 57% e em 2020 45% (Roth; Isaia; Isaia, 1999; IBAM, 2001; ABRELPE, 2008, 2020).

As densidades de cada lisímetro estão demonstradas na Tabela 20. O cálculo da densidade foi obtido através da razão entre a massa do resíduo, obtida na composição gravimétrica, e o volume dos resíduos compactados em uma espessura de 60 cm no interior do lisímetro cilíndrico.

Tabela 20 - Densidade de resíduo dos lisímetros

	Lisímetro 1 ¹	Lisímetro 2 ²	Lisímetro 3 ³
Massa (g)	39.000	29.860	29.230
Volume(cm³)	39.631,19	39.631,19	39.631,19
Massa específica (g/cm³)	0,9841	0,7534	0,7375
Densidade kN/m³	9,65	7,38	7,42

1 -L1 – resíduos sólidos urbanos 2- L2– 100% de matéria orgânica e recirculação de chorume

3-L3– 100% de matéria orgânica

Fonte: Autora (2022).

A densidade de RSU de 9,65 kN/m³, obtida nesta pesquisa, foi maior do que a encontrada por Silva e Santos (2009), sendo uma densidade aparente de 2,26 kN/m³ e de Da Silva (2013) com 6,13 kN/m³ também com resíduos de Fortaleza. Carvalho (1999) cita que os RSU brasileiros podem ter densidades entre 8 kN/m³ e 15 kN/m³, e a densidade vai depender da forma como o material foi compactado. No caso desta pesquisa todos os resíduos dos três lisímetros foram compactados de forma que fossem acomodados em uma camada com espessura de 60 cm, então a forma de confinamento a qual foram submetidos pode influenciar nos valores mais altos de densidade, quando comparados às densidades encontradas pelos outros pesquisadores.

Os resíduos recém-lançados em aterros de RSU possuem densidades baixas, como 1,2 a 3 kN/m³, após a incidência dos recalques estes valores tendem a aumentar para 10

kN/m^3 , $15,6 \text{ kN/m}^3$ ou até valores maiores (Sarsby, 2000; Bauer, 2006 *apud* Borgatto, 2010). Isso quer dizer que os valores encontrados nesta pesquisa, para os lisímetros 1, 2 e 3, com $9,65 \text{ kN/m}^3$; $7,38 \text{ kN/m}^3$ e $7,42 \text{ kN/m}^3$, respectivamente, antes da ocorrência dos recalques, ainda podem apresentar valores maiores, no decorrer do tempo.

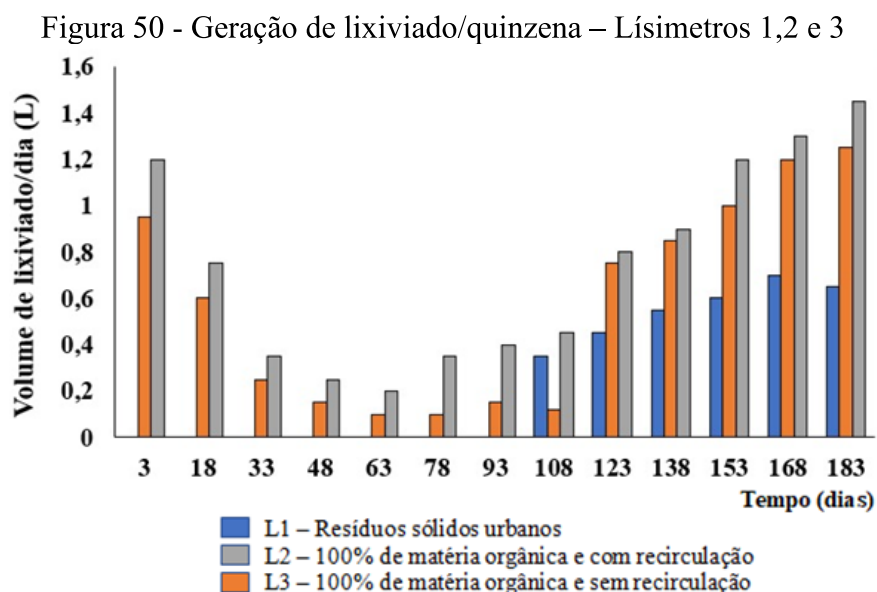
As densidades referentes aos lisímetros 2 e 3, de apenas RSO, foram $7,38 \text{ kN/m}^3$ e $7,42 \text{ kN/m}^3$, valores maiores que a densidade de RSO encontrada por Da Silva (2013), com $6,26 \text{ kN/m}^3$ e menor que a densidade de RSO encontrada por Silva e Santos (2010) com $11,89 \text{ kN/m}^3$.

4.3 Monitoramento dos Lisímetros

Neste subtópico, estão apresentados os resultados referentes aos seis meses de monitoramento dos lisímetros, entre setembro/2022 e fevereiro/2023.

4.3.1 Monitoramento da geração do lixiviado

De acordo com a Figura 50, observa-se que os maiores volumes de lixiviado foram referentes aos lisímetros L2 com recirculação e L3 sem recirculação, preenchidos com 100% de matéria orgânica. entre 150 e 180 dias, entre meados de dezembro/2022 a fevereiro/2023. A geração de lixiviado depende de fatores climáticos, dos tipos de resíduos colocados no interior dos lisímetros, da configuração dos lisímetros e do intervalo de coleta. Por se tratar de lisímetros de pequeno porte, de 100 cm de altura e 30 cm de diâmetro, os volumes coletados não passaram de 1,5 L a cada quinzena.



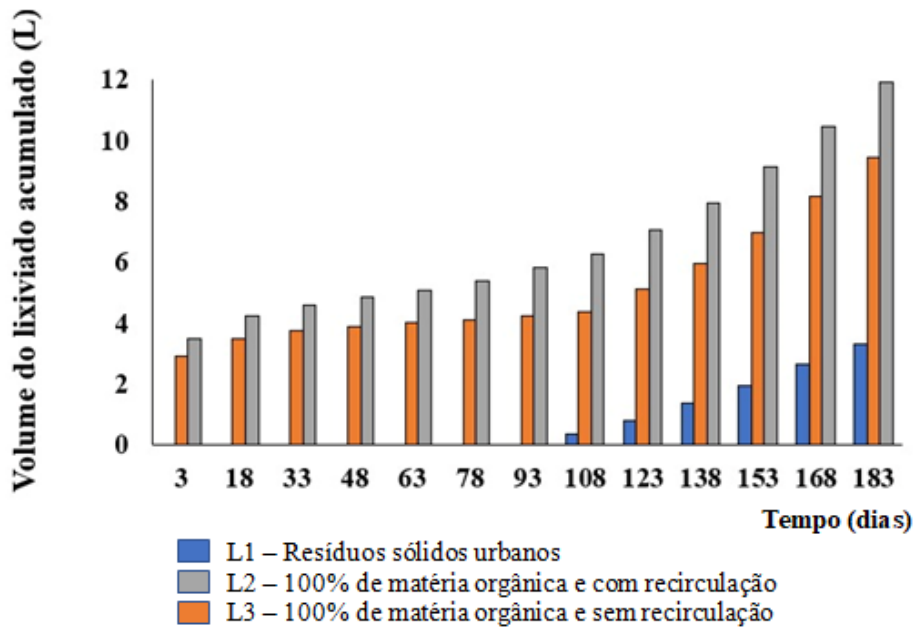
Conforme pode ser verificado na Figura 50, há pouquíssima geração de percolato no lisímetro 1, e o lixiviado só foi gerado a partir de 90 dias de instalação dos lisímetros. A composição do L1 tem diversos tipos de materiais não orgânicos que podem interferir nesse resultado: papéis, rejeitos, vidros, plásticos etc. Guedes *et al.* (2021) explicam que os materiais plásticos servem como um empecilho à passagem do lixiviado, além do mais materiais como papelões e têxteis absorvem a umidade no interior do lisímetro, contribuindo para a pouca geração de lixiviado. Materiais como rejeitos podem acumular líquidos, como fraldas descartáveis, garrafas de vidro de pequeno porte se não forem trituradas podem acumular líquidos também. Além disso, o RSU tem categorias de resíduos que são secas: como vidros, plásticos, metais, papelões quando comparadas ao RSO.

Segundo Alcântara (2007), o lixiviado só passa a ser gerado quando o volume de líquido gerado pelos resíduos ultrapassa a capacidade de campo. O autor define capacidade de campo, no contexto dos aterros sanitários, como a propriedade que os resíduos têm de reter a água em seus vazios antes que seja gerado o lixiviado. Há uma suposição de que nos primeiros 90 dias de monitoramento, o lisímetro L1 pode ter retido pequenos volumes de lixiviado entre espaços vazios presentes na massa de resíduo.

O lisímetro L2 (com recirculação), quando comparado ao lisímetro L3 (sem recirculação), apresentou maiores volumes coletados de lixiviado, dentre os três lisímetros da pesquisa. Esse comportamento pode ser atribuído a dois fatores: a composição de RSO que é mais úmida que o RSU e ao adicional de chorume colocado semanalmente no lisímetro.

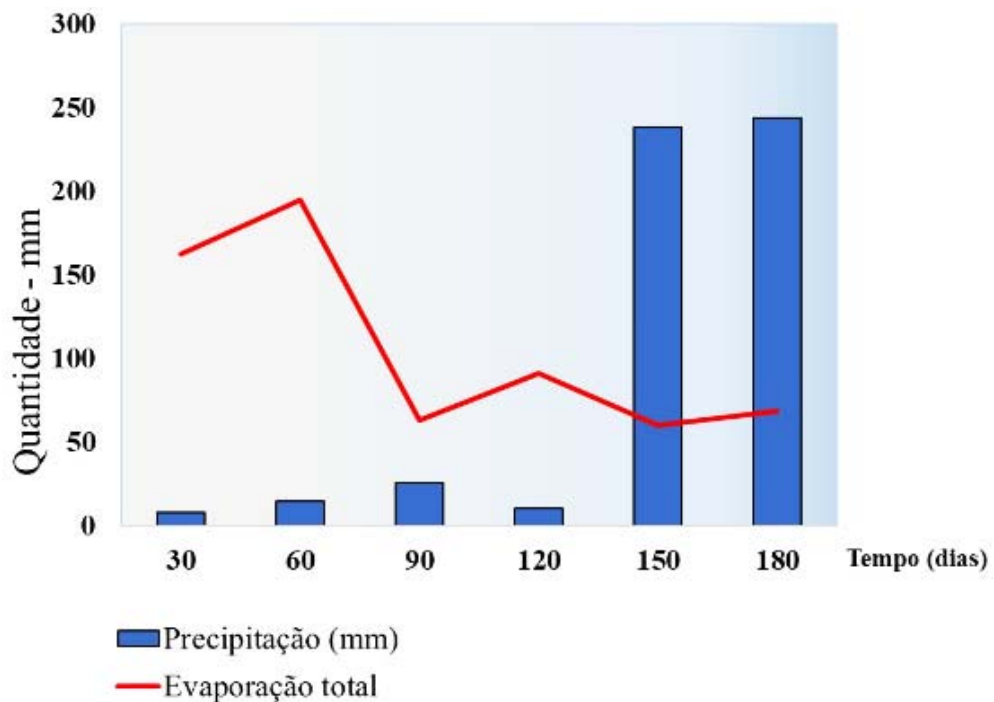
Foi realizado um comparativo entre os volumes acumulados de lixiviado, a precipitação e a evaporação total, sendo estes dois últimos baseados em dados meteorológicos da Estação Meteorológica do Campus Pici – UFC. Para os três lisímetros L1, L2 (com recirculação) e L3 os maiores volumes acumulados foram nos meses correspondentes a janeiro/23 e fevereiro/23, como pode ser visualizado na Figura 51, que foram os meses de maior incidência de chuvas e menor evaporação total, como pode ser visto na Figura 52. Da Silva (2013), Guedes *et al.* (2017) também observaram esse mesmo comportamento, em meses de maiores precipitações e menores evaporações. Esse comportamento é esperado, tendo em vista que em períodos de alta pluviosidade a vazão do percolato tende a aumentar.

Figura 51 - Volume acumulado de lixiviado para os lisímetros L1, L2 e L3.



Fonte: Autora (2023).

Figura 52 - Dados de precipitação e evaporação total



Fonte: Autora (2023).

Como pode ser observado, nas Figuras 51 e 52, em períodos de pouca precipitação há menos geração de lixiviado nos três lisímetros. Santos (2009) explica que em áreas com baixas precipitações, menos de 600 mm/ano, e grandes evaporações, reduz-se a

geração de chorume, sendo que este ainda pode se acumular entre as células de um aterro, dificultando a sua percolação.

4.3.2 Parâmetros Físico-químicos

Nas Tabelas 21 e 22, estão apresentados os resultados obtidos pelas análises físico-químicas para os meses de setembro/22 a fevereiro/23. Os dados serão discutidos inter-relacionados, tendo em vista que os parâmetros não se comportam de forma individual, mas de forma conjunta. A massa de resíduos sólidos urbanos é heterogênea, possuindo materiais inorgânicos e orgânicos. Dentre a parcela orgânica há uma microbiota que interage de tal modo que influencia nos valores dos parâmetros físico-químicos. Fatores como temperatura, potencial de hidrogênio, condições do ambiente (precipitações e evaporações), oxidação da matéria, dentre outros, contribuem para alteração dos parâmetros que serão debatidos logo a seguir. Na Tabela 21, estão os resultados das análises físico-químicas realizadas ao longo do período de menor pluviosidade no Ceará, que é o segundo semestre do ano. Já na Tabela 22, estão os resultados de monitoramento para os meses de maior pluviosidade.

Tabela 21 - Parâmetros físico-químicos -2022

Ano		2022								
Mês	Setembro		Outubro		Novembro		Dezembro			
Análises	L2	L3	L2	L3	L2	L3	L1	L2	L3	
PH	3,9	4,2	3,9	4,6	5,2	6,1	5,8	6,0	6,8	
Condutividade Elétrica (uS/cm)	857,8	841,0	741,3	746,3	680,7	816,3	983,0	1337,0	1547,0	
Amônia (mg/L)	345,2	512,5	493,6	641,4	602,5	852,3	954,2	703,3	897,2	
DQO (mg/L)	140738	145479	152412	184518	168191	136327	72987	178078	158875	
Nitrato (mg/L)	219,0	235,0	175,0	183,0	143,0	146,0	189	96,0	108,0	
Cloretos (mg/L)	2345	3844	2823,45	2091	3112,34	2134	1225	3233	2654	

Fonte: Autora (2022).

Tabela 22 - Parâmetros físico-químicos -2023

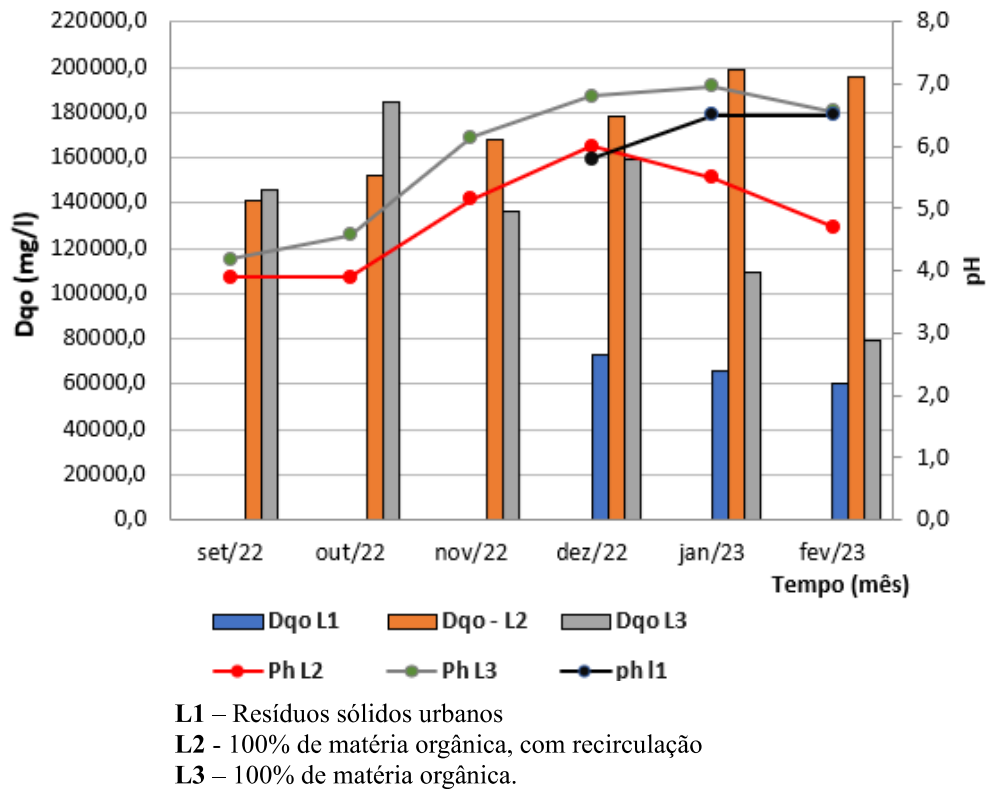
Ano	2023					
Mês	Janeiro			Fevereiro		
Análises	L1	L2	L3	L1	L2	L3
PH	6,5	5,5	7,0	6,5	4,7	6,6
Condutividade Elétrica (uS/cm)	1440,0	1456,0	1769,0	1956,0	1756,0	1857,0
Amônia(mg/L)	1001,3	875,3	936,3	1200,3	987,7	983,3
DQO (mg/L)	66106	199083	109728	60123	195524	79437
Nitrato(mg/L)	165	85,0	92,0	186	53,0	63,0
Cloretos (mg/L)	1867	2898	2340	1968	2321,34	2440

Fonte: Autora (2023).

4.3.3 Dqo , pH , Condutividade Elétrica

A DQO é um parâmetro importantíssimo para avaliar se uma amostra possui ou não uma elevada carga de matéria orgânica a ser degradada. 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. Observa-se que os valores de DQO mostrados na Figura 53, para os lisímetros L2 com recirculação de chorume bruto e L3 sem recirculação, possuem comportamentos distintos, mesmo os dois sendo de 100% de matéria orgânica. Para o L2 entre setembro/22 e janeiro/23, a DQO teve uma tendência ao aumento, já entre janeiro/23 e fevereiro/23 ela sofreu um leve decréscimo. Para o L3 esses valores tiveram aumentos e decréscimos sucessivos, só a partir de dezembro que a DQO, de fato, começou a ter uma tendência ao decréscimo.

Figura 53- Evolução da DQO e do pH dos lisímetros L1, L2 e L3.



Segundo Pinto (2000), a DQO aumenta, quando há bastante ácidos dissolvidos no lixiviado. A recirculação no lisímetro L2 (com recirculação) 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 a fevereiro/23, nota-se uma tendência de diminuição do pH para os últimos dois meses de monitoramento.

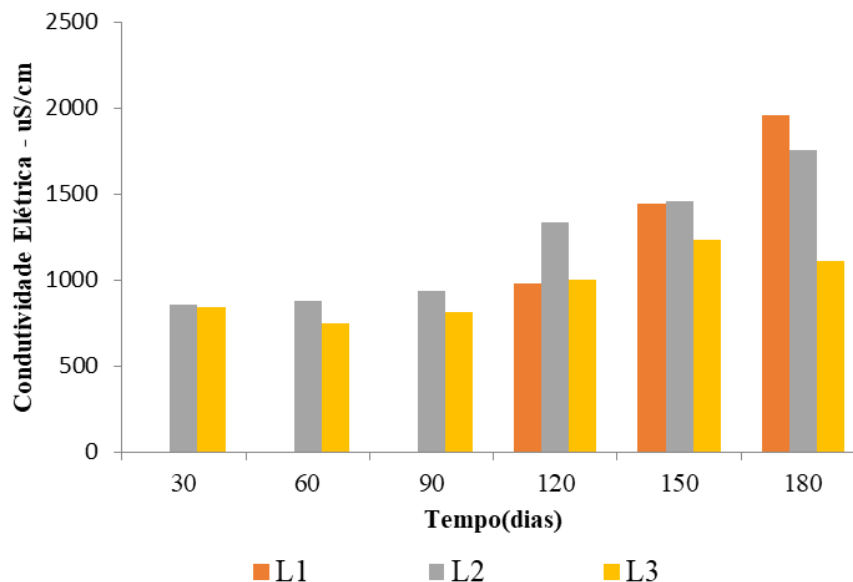
O lisímetro L1, por ter a geração de chorume só 3 meses depois do início do experimento, os resultados foram computados a partir de 90 dias. Nota-se que o L1 apresentou uma tendência ao decréscimo para os valores de DQO entre dezembro/22 e fevereiro/23. Aproximadamente com uns 90 dias acomodação dos lisímetros, a DQO foi em torno de 72000 mg/l valor muito semelhante ao de Da Silva (2013), Guedes *et al.* (2021). Na literatura, alguns autores como Souto e Polivinelli (2007), estimaram uma faixa máxima de intervalo de DQO entre 190 a 80.000 mg/L, para o lixiviado de aterros brasileiros, o que mostra que o valor de DQO encontrado no lisímetro 1 está bem alto. Os valores de DQO no

lisímetro L1, foram menores que os valores de L2 e L3, um resultado esperado, tendo em vista que a porcentagem de matéria orgânica de L1 foi menor que a porcentagem de L2 e L3.

Houve um aumento do pH entre dezembro/22 e fevereiro/23, de 5,8 para 6,5 aproximadamente, no L1, sugerindo que este lisímetro ainda estava na fase I, de ajustes iniciais, em que o oxigênio livre provavelmente está sendo consumido por microrganismos aeróbicos. Segundo Zanetti (2008) e Pinto (2000) na fase inicial o pH pode chegar próximo de 7.

Entre meados de setembro/22 a outubro/22 observam-se valores baixos de pH nas amostras L2 e L3 entre 3,9 e 5,2, altos valores de DQO e condutividade elétrica, como mostra a Figura 54. Aqui, observa-se grande quantidade de matéria orgânica a ser degradada, devido à grande necessidade de oxigênio requerido para a biodegradação. Nesta fase, a matéria orgânica é convertida em ácidos orgânicos, isso é possível devido às bactérias heterotróficas aeróbias, nesta etapa ainda não acontece a remoção total da matéria orgânica, há apenas a sua transformação em compostos orgânicos mais simples (Sperling, 1996). Em consequência disso, a degradação da matéria orgânica pela atividade microbiana gera um aumento significativo da geração do gás (CO_2), e água (H_2O) (Chernicharo, 1995; Lubberding, 1995 *apud* Sperling, 1996). A afirmação do que dizem os autores da literatura foi observada nos resultados de ensaios de cromatografia gasosa para esta pesquisa.

Figura 54 - Condutividade elétrica uS/cm



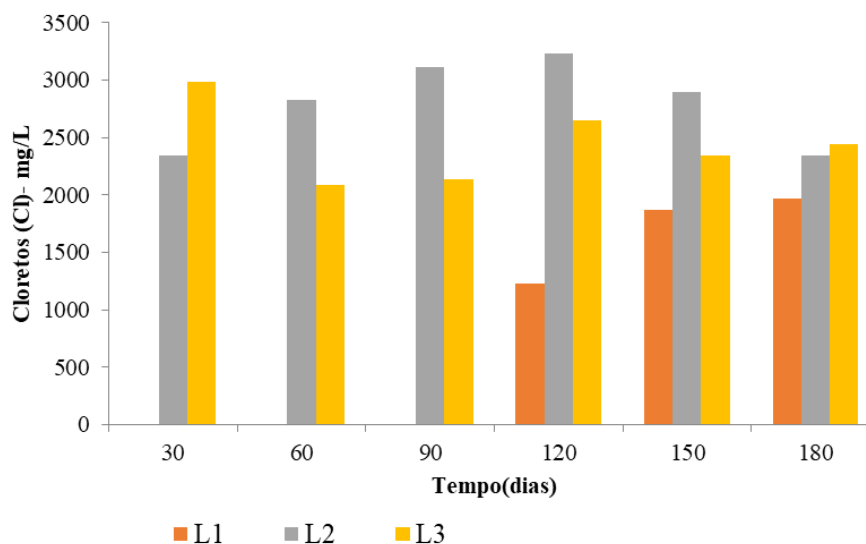
L1 – Resíduos sólidos urbanos **L2** - 100% de matéria orgânica, com recirculação
L3 – 100% de matéria orgânica.

Fonte: Autora (2023).

Os resultados do Lisímetro L2 (recirculado) revelaram alta carga de nutrientes nas amostras de lixiviado, devido a altos valores de DQO, quando comparado ao lisímetro L3 não recirculado, revelando 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 como será discutido posteriormente. A autora também menciona que seria importante fazer um pré-tratamento do lixiviado antes de recirculá-lo.

As análises realizadas no chorume coletado nos modelos indicaram presença de sais de cloreto (Cl⁻), que foi medido durante o período de monitoramento, como pode ser verificada na Figura 55. Observa-se que as concentrações de cloreto foram maiores no lisímetro L2, que teve recirculação. Segundo Alcântara (2003), íons de sais presentes no lixiviado conduzem eletricidade, por isso há uma hipótese de que a condutividade elétrica possa ter se apresentado maior no lisímetro L2, devido à recirculação, quando comparado ao lisímetro L3 sem recirculação, como pode ser visto na Figura 54. 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 nas amostras de lixiviado.

Figura 55 - Íons - Cloretos



L1 – Resíduos sólidos urbanos **L2** - 100% de matéria orgânica, com recirculação
L3 – 100% de matéria orgânica.

Fonte: Autora (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 na amostra do lisímetro L2 não contribuiu para a redução da DQO durante o período de monitoramento, quando se compara o comportamento da DQO do lisímetro L3.

4.3.4 Compostos nitrogenados: Amônia, Nitrito, Nitrato.

A amônia (NH_3) ou nitrogênio amoniacal é um composto químico que está relacionado ao processo de nitrificação, e na nitrificação ocorrem reações químicas reduzindo a amônia em nitritos (NO_2^-), e os nitritos são reduzidos a nitratos (NO_3^-). Quando um determinado efluente apresenta concentrações de nitrogênio amoniacal entre 600 e 1200 mg/L já podem ser consideradas como concentrações elevadas para esse elemento (Polo *et al.*, 2022). Chernicharo (1997) *apud* Cintra (2003) cita que para valores de amônia acima de 150 mg/L o efluente já é tóxico para alguns microrganismos.

Nos resultados de nitrogênio amoniacal para esta pesquisa, houve uma variação entre 800 mg/L e 1200 mg/L, para o lisímetro 1 de RSU, havendo um crescimento entre os meses de dezembro/2022 e fevereiro/2023, como mostra a Tabelas 23 e 24. Cintra (2003) verificou um comportamento semelhante em lisímetros experimentais, para os 180 primeiros dias de experimento, mesmo tempo de monitoramento desta pesquisa. A autora encontrou valores entre 800 mg/L e 1100 mg/L. Tchobanoglous *et al.* (1993) *apud* Carvalho (2005) citam uma variação de 10 a 800mg/L em células de aterros com menos de 2 anos de instalação.

Tabela 23- Nitrogênio Amoniacal - Setembro a Dezembro de 2022.

Período	Set/22		Out/22		Nov/22		Dez/22		
	L2	L3	L2	L3	L2	L3	L1	L2	L2
Lisímetros									
Amônia(mg/L)	345,2	512,5	493,6	641,4	602,5	852,3	954,2	703,3	897,2
Nitrato (mg/L)	219,0	235,0	175,0	183,0	143,0	146,0	189	96,0	108,0

L1 – Resíduos sólidos urbanos L2 - 100% de matéria orgânica, com recirculação

L3 – 100% de matéria orgânica.

Tabela 24- Nitrogênio Amoniacal - Janeiro a Fevereiro de 2023.

Período	Jan/23			Fev/23		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Lisímetros						
Amônia(mg/L)	1001,3	875,3	936,3	1200,3	987,7	983,3
Nitrato (mg/L)	165	85,0	92,0	186	53,0	63,0

L1 – Resíduos sólidos urbanos L2 - 100% de matéria orgânica, com recirculação
L3 – 100% de matéria orgânica.

Fonte: Autora (2023).

Segundo Alcântara (2007), valores elevados de amônia ocorrem até que seja atingida a fase ácida, ou bem no início da fase ácida também, e diminuem com o decorrer da biodegradação. A nitrificação é um processo que ocorre em condição aeróbia, condição em que os lisímetros L1, L2 e L3 foram submetidos, mesmo assim o período de monitoramento da pesquisa entre (setembro/22 e fevereiro/23) ainda não foi suficiente para a redução do composto amoniacal.

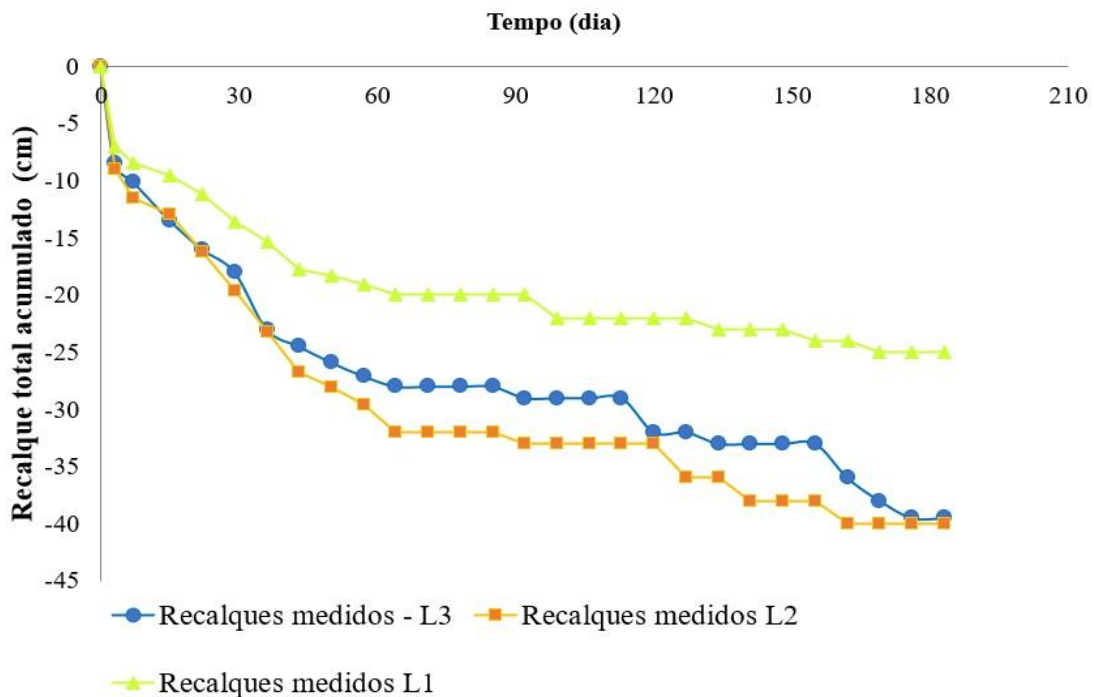
Isso conseqüentemente vai interferir nos resultados de nitrato que é o produto do processo de nitrificação. Segundo Pinto (2000), na fase aeróbia (Fase 1) o nitrato e o oxigênio são consumidos. Então o esperado é que nas fases posteriores de transição e acidogênica, que são anaeróbias, a quantidade de nitrato sejam reduzidas. Dentre os lisímetros apresentados, o L2 e o L3 tiveram os valores de nitratos reduzidos no período monitorado, mas a redução de nitrato foi mais evidente no L2(com recirculação) sugerindo que este lisímetro está mais próximo da fase anaeróbia.

4.4 Recalques

4.4.1 Evolução dos recalques no tempo

No gráfico da Figura 56, são apresentados os resultados de recalques acumulados nos três lisímetros. Para os três lisímetros observa-se que a velocidade dos recalques foi maior no início do experimento, sendo maior para os 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 biodegradação e duram alguns dias, o que explica a inclinação acentuada das curvas dos três lisímetros L1, L2 e L3 para os primeiros 45 dias de acomodação dos resíduos, que dependem da sobrecarga das camadas de resíduos.

Figura 56 - Recalques medidos em L1 , L2 e L3



L1 – Resíduos sólidos urbanos L2 - 100% de matéria orgânica, com recirculação
 L3 – 100% de matéria orgânica.

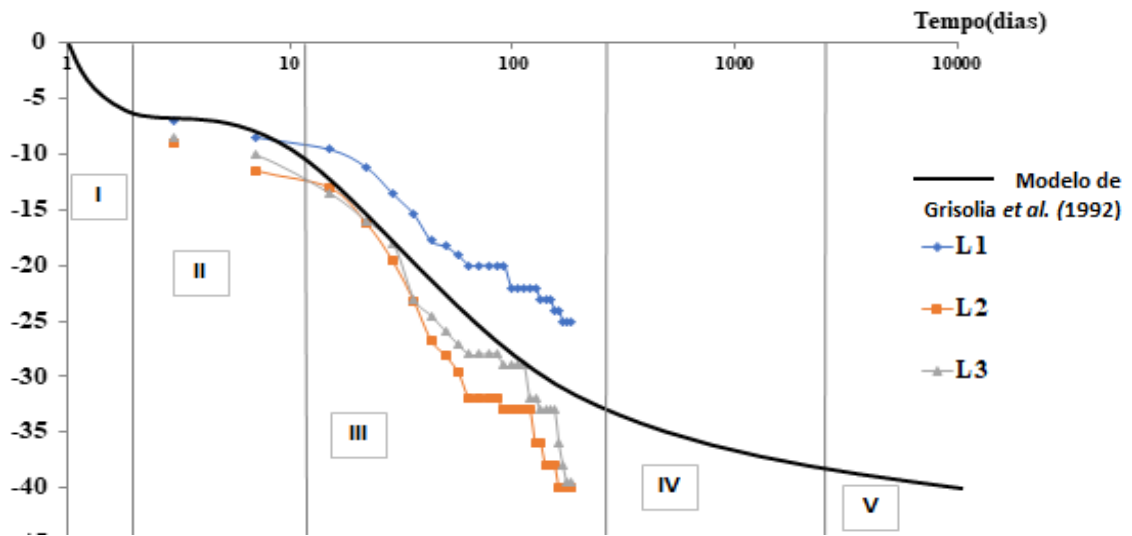
Fonte: Autores (2023).

No lisímetro L2, com recirculação de chorume, os recalques acumulados se mostram maiores em boa parte 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 biodegradação, contribuindo para maiores deformações verticais, conseqüentemente 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 conforme 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) pode 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, que podem ter graus de degradação diferentes.

Em experimentos com RSU realizados por Grisolia *et al.* (1992), os autores verificaram que existem fases de deformações dos resíduos ao longo dos anos, como pode ser

visto no gráfico da Figura 57. 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 residuais nas primeiras horas, já na fase 3 os recalques são ocasionados pela decomposição da matéria orgânica. Nesta pesquisa, em especial, o monitoramento ocorreu durante 180 dias, diante disso, os lisímetros L1, L2 e L3 atingiram até a fase 3 de deformação.

Figura 57 - Fases de recalques dos lisímetros L1, L2 e L3



L1 – Resíduos sólidos urbanos L2 - 100% de matéria orgânica, com recirculação

L3 – 100% de matéria orgânica

Fonte: Adaptado de Grisolia et al. (1992).

Conforme o gráfico da Figura 57, 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 orgânica nos lisímetros L2 (recirculado) e L3 apresentam uma tendência de recalques com curva assintota, indicando valores de deformações mais acentuadas 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 do aterro. O fato dos lisímetros L2 e L3 ter maior percentual de orgânicos esse comportamento de redução da massa pode ter acontecido em uma maior intensidade.

A fase 3 dos recalques, mostrada na Figura 57, correspondente à fase de biodegradação onde a massa sólida começa a ser convertida em fase líquida. 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 resíduos. Por isso é tão importante o estudo dos parâmetros físico-químicos do percolado que é gerado, onde os resultados são indicativos de aceleração ou inibição de remoção da matéria orgânica. Os resultados dos lixiviado para uma correlação com os recalques são importantes, porque em um aterro de RSU, o principal agente responsável pelos recalques é a fração de matéria orgânica. A massa de resíduos não permanece estável, ou seja, acontece a acomodação das partículas do RSU e conseqüentemente do solo de cobertura final e intermediária. A 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).

4.4.2 Comparação dos recalques medidos com os estimados pelo modelo de Ling et al. (1998).

O modelo hiperbólico de Ling *et al.* (1998) é dos mais simples para ser utilizado na previsão de recalques, pois ele incorpora aos cálculos variáveis de fácil obtenção no momento dos ensaios, tais como: os deslocamentos verticais e o tempo. Na Tabela 25 estão demonstrados os resultados de tempo/recalque, esses valores foram utilizados nos gráficos da Figura 59, para a calibração do modelo. Neste tipo de calibração, foram definidas a taxa inicial de recalques (ρ) e o valor do recalque último esperado (Sult), para cada lisímetro (L1, L2 e L3), pois obviamente cada um teve um comportamento de recalque diferente.

Tabela 25 – Resultados de tempo/recalque $\Delta T/\Delta h(\text{cm})$.

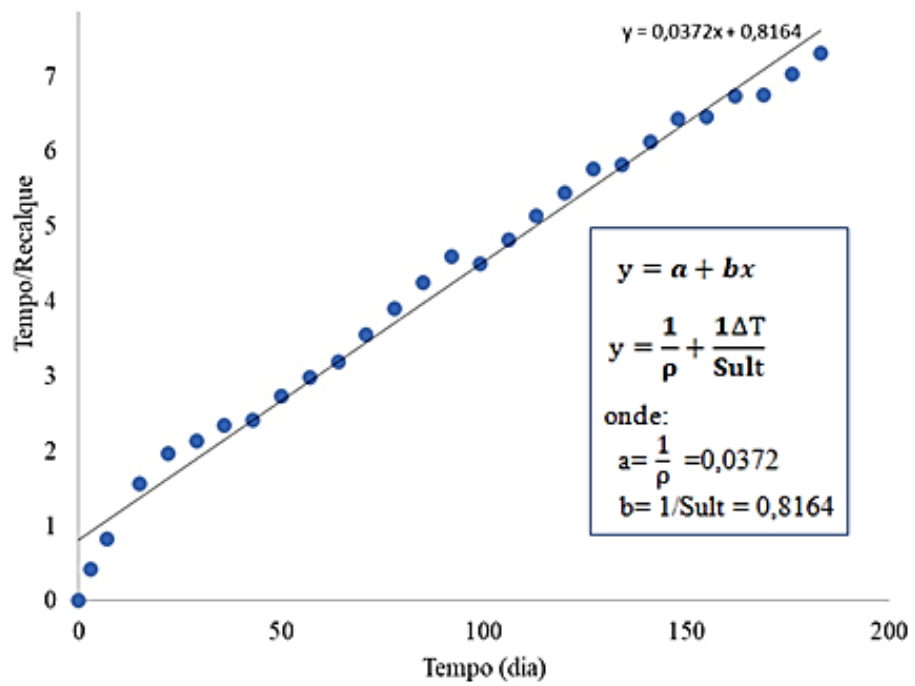
L1			L2		L3	
ΔT (dias)	$\Delta h(\text{cm})$	$\Delta T/\Delta h$ (cm)	$\Delta h(\text{cm})$	$\Delta T/\Delta h(\text{cm})$	$\Delta h(\text{cm})$	$\Delta T/\Delta h(\text{cm})$
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	7,0	0,4	9,0	0,3	8,5	0,4
7	8,5	0,8	11,5	0,6	10,1	0,7
15	9,6	1,6	13,0	1,2	13,5	1,1
22	11,2	2,0	16,2	1,4	16,0	1,4
29	13,6	2,1	19,6	1,5	18,0	1,6
36	15,4	2,3	23,2	1,6	23,0	1,6
43	17,8	2,4	26,7	1,6	24,5	1,8
50	18,3	2,7	28,1	1,8	25,9	1,9
57	19,1	3,0	29,6	1,9	27,1	2,1
64	20,0	3,2	32,0	2,0	28,0	2,3
71	20,0	3,6	32,0	2,2	28,0	2,5
78	20,0	3,9	32,0	2,4	28,0	2,8
85	20,0	4,3	32,0	2,7	28,0	3,0
92	20,0	4,6	33,0	2,8	29,0	3,2
99	22,0	4,5	33,0	3,0	29,0	3,4
106	22,0	4,8	33,0	3,2	29,0	3,7
113	22,0	5,1	33,0	3,4	29,0	3,9
120	22,0	5,5	33,0	3,6	32,0	3,8
127	22,0	5,8	36,0	3,5	32,0	4,0
134	23,0	5,8	36,0	3,7	33,0	4,1
141	23,0	6,1	38,0	3,7	33,0	4,3
148	23,0	6,4	38,0	3,9	33,0	4,5
155	24,0	6,5	38,0	4,1	33,0	4,7
162	24,0	6,8	40,0	4,1	36,0	4,5
169	25,0	6,8	40,0	4,2	38,0	4,4
176	25,0	7,0	40,0	4,4	39,5	4,5
183	25,0	7,3	40,0	4,6	39,5	4,6

Fonte: Autora (2023).

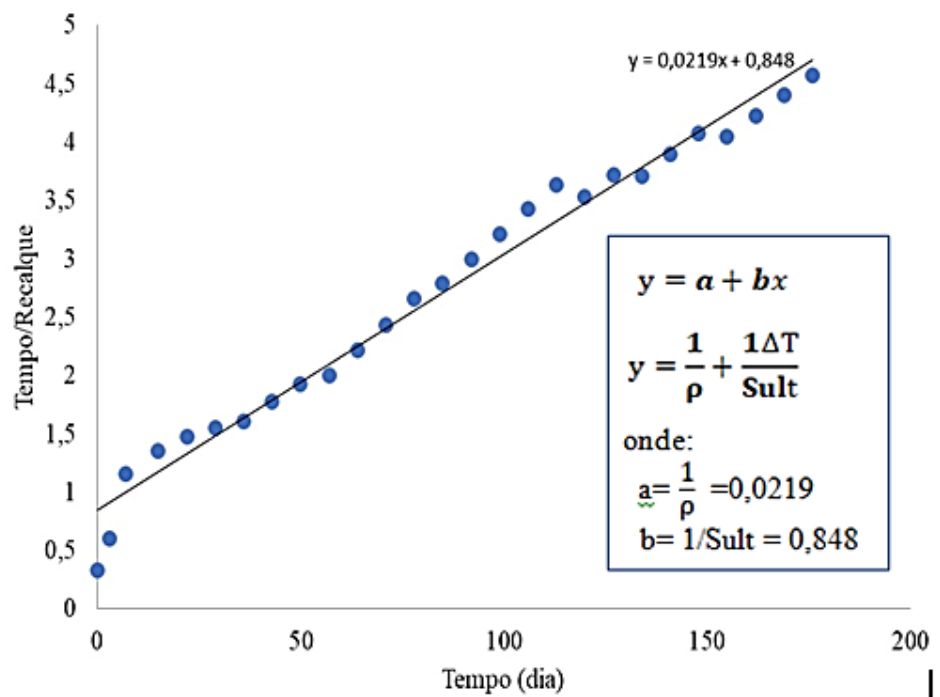
O intercepto da inclinação da reta, mostrada na Figura 58, refere-se inverso da taxa inicial de recalque (ρ) e o coeficiente angular da reta refere-se ao inverso do recalque último esperado (Sult).

Figura 58 - Gráfico de calibração modelo Ling et al. (1998).

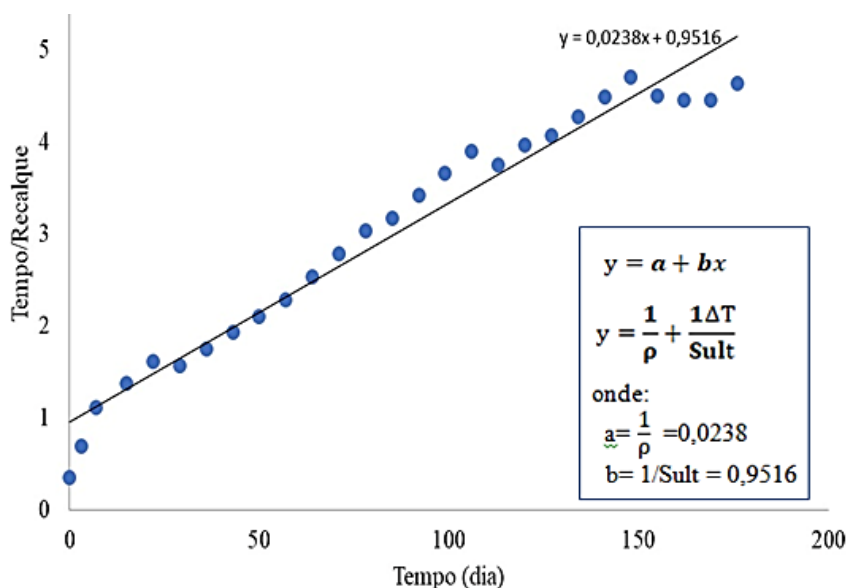
a) Lisímetro 1 b) Lisímetro 2 c) Lisímetro 3



a) Lisímetro 1



b) Lisímetro 2



c) Lisímetro 3

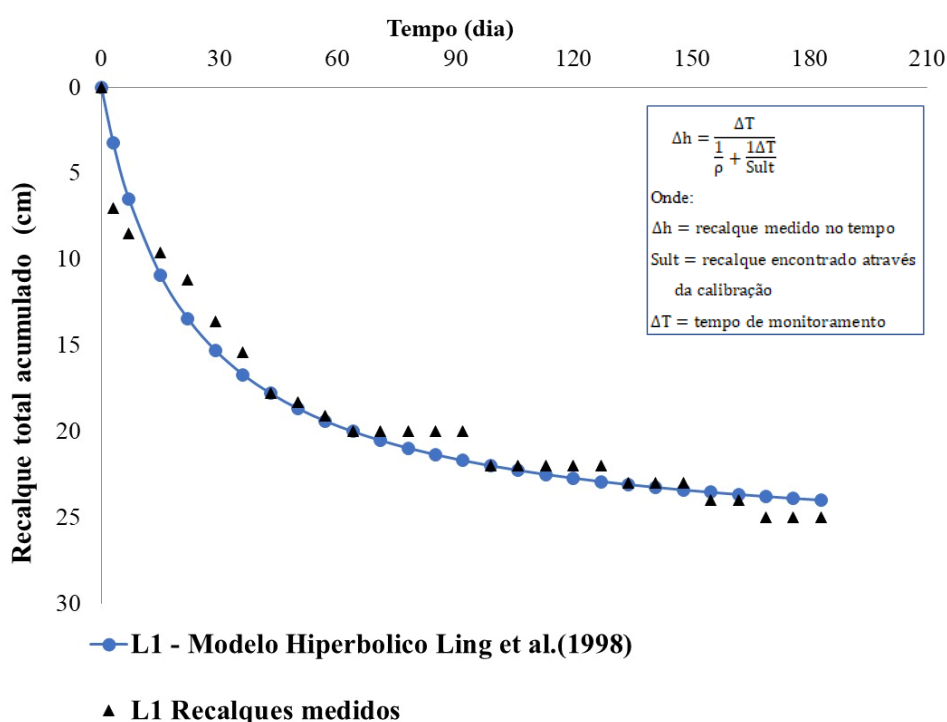
Fonte: Autora (2023).

As curvas de recalque versus tempo para o modelo de Ling *et al.* (1998), estão demonstradas na Figura 59. As curvas referem-se respectivamente aos lisímetros 1, 2 e 3. Observa-se que os ajustes para o modelo citados anteriormente se aproximaram do gráfico de recalques medidos em campo. Na literatura, existem autores Barbosa (2016), Catapreta (2008), Salamoni (2019), Van Elk, Correia e Ritter (2019) e Klink (2019), que afirmam que esse modelo é adequado para curtos períodos de tempo, tipo menos de 1 ano, e nesta pesquisa o monitoramento durou cerca de 6 meses. Pode ser que o ajuste tenha sido adequado, pelo curto espaço de tempo de permanência dos 3 lisímetros em campo. Caso o tempo de permanência fosse maior, pode ser que os ajustes aos recalques medidos nos 3 lisímetros (L1, L2 e L3) não fossem tão próximos aos pontos medidos. Além disso, o modelo de Ling *et al.* (1998) não leva em consideração alterações de fatores com o tempo, como DQO, pH, gases, portanto deve ser usado com ressalva. Mesmo assim tem autores na literatura, como Marques (2001) que conseguiu obter boa concordância desse modelo para recalques de RSU, monitorados por um tempo mais longo, em torno de 1000 dias, quase 3 anos. Uma possibilidade para a continuação desta pesquisa é verificar se os ajustes do modelo de Ling *et al.* (1998) se adequam a um tempo mais longo de monitoramento.

As curvas obtidas pelo modelo de Ling *et al.* (1998), para os três lisímetros, mesmo demonstrando um ajuste próximo aos recalques medidos, há diferença no comportamento dos ajustes entre o lisímetro L2 (com recirculação) e o lisímetro L3 (sem recirculação). A significativa redução de DQO no lisímetro L3, entre meados do final de

dezembro/22 e o começo de fevereiro/23 pode ter contribuído para redução do volume mais brusca da massa de RSO, entre 150 e 180 dias, é tanto que no gráfico da Figura 61, há um deslocamento vertical mais intenso entre 150 e 180 dias. A utilização do modelo não se ajustou tão bem a esta faixa. As deformações em curtos espaços de tempo têm a ver com a composição dos resíduos de origem orgânica (se tem bastante proteína, carboidratos, etc) que pode estar inserido no lisímetro, e também têm relação com determinadas colônias de bactérias responsáveis pela ação microbiana que decompõe a matéria, causando significativas reduções de volumes (Guedes *et al.*, 2021; Grisolia; Napoleoni, 1996). Estas variáveis não são levadas em consideração no modelo de Ling *et al.* (1998), como já foi explicado anteriormente. Seres microscópicos como as bactérias podem ser estudados mais profundamente em outra pesquisa, para avaliar a sua influência na aceleração da remoção de matéria orgânica.

Figura 59- Recalques ajustados ao modelo de Ling *et al.*(1998) – Lisímetro 1

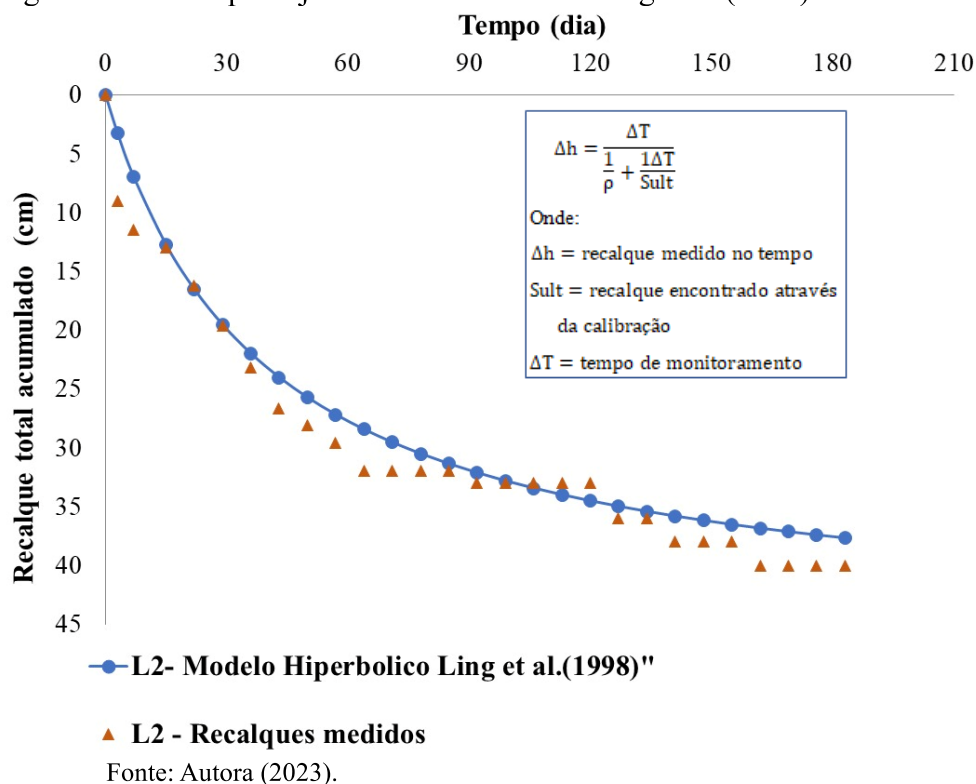


Fonte: Autora (2023).

O tipo de resíduo influencia diretamente nos valores de recalques. O que pode ser perceptível ao comparar o lisímetro 1 de RSU, Figura 59, com os Lisímetros 2 e 3 de apenas resíduo sólido orgânico (RSO), Figuras 60 e 61. Os lisímetros de apenas RSO mostram maiores recalques, além disso a curva do modelo hiperbólico não ficou tão ajustada aos recalques medidos, como ficou no gráfico do lisímetro de RSU. Ling *et al.* (1998) adverte que

devido aos resíduos apresentarem parâmetros particulares de biodegradação, suas propriedades não tornam o modelo perfeito para o ajuste aos recalques de RSU. A heterogeneidade dos resíduos influencia até mesmo na medição de recalques, em pontos do mesmo aterro, gerando curvas de ajustes diferentes. Klink (2019) observou que para um mesmo aterro, em vários pontos, utilizando o modelo de Ling *et al.* (1998), ele conseguiu obter curvas de ajustes de diferentes comportamentos, o que mostra que o modelo não se comporta igual para todo e qualquer tipo de resíduo, seja ele orgânico ou inorgânico. Nesta pesquisa, devido aos lisímetros serem de pequeno porte, não houve recalques diferenciais, tendo em vista haver uma pequena área de superfície circular avaliada (diâmetro interno de 25 cm). Uma possibilidade é a verificação dos recalques diferenciais que podem ocorrer em áreas maiores, depois fazer uma avaliação dos ajustes do modelo com os recalques diferenciais obtidos para cada ponto.

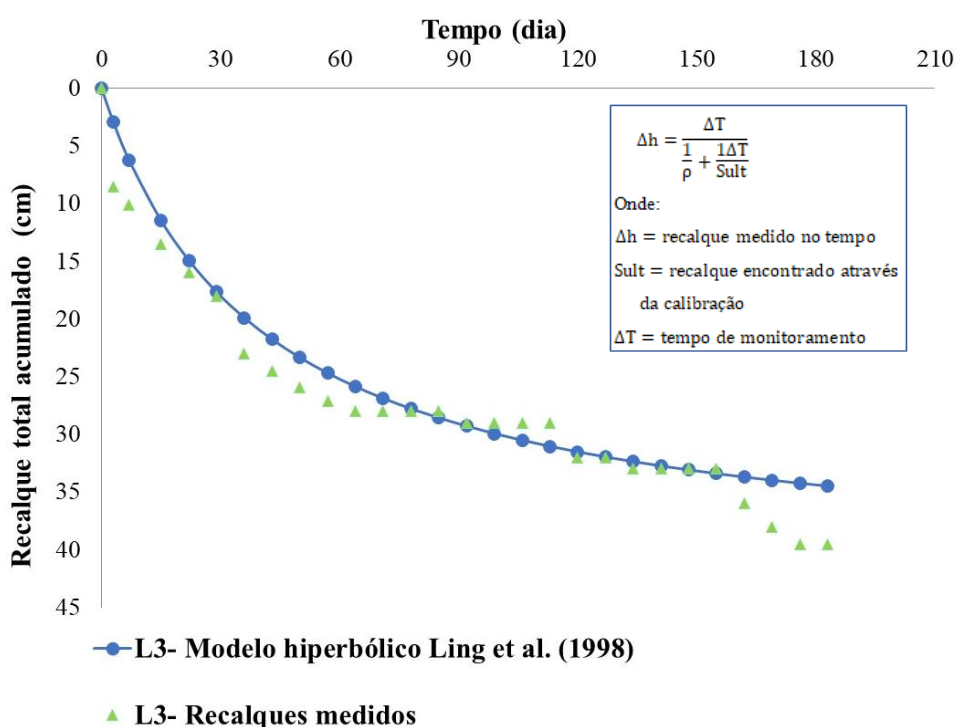
Figura 60 - Recalques ajustados ao modelo de Ling et al.(1998)- Lisímetro 2



Como citado anteriormente, a velocidade dos recalques pode depender até mesmo da variedade microbológica que existe nos RSU. Materiais muito recalcitrantes de difícil biodegradação (como ossos de animais, quitina) podem permanecer por um determinado tempo na massa de resíduos (Alcântara, 2007; Santos, 2009). Após a difícil degradação, eles provocam reduções mais bruscas ainda de volume, como pode ser observado nos recalques

dos lisímetros 2 e 3, que apresentam maiores variações de recalques do que o lisímetro 1, para o mesmo intervalo de tempo. Segundo Santos (2009), o processo biodegradativo anaeróbico, tende a aumentar no período chuvoso, devido à presença de maior teor de umidade, contribuindo para a intensa atividade de degradação da matéria por microrganismos. Nesta pesquisa, a maior precipitação foi registrada entre janeiro/23 e fevereiro/23, exatamente onde houve um recalque brusco entre 150 e 180 dias de monitoramento, no lisímetro 3 da Figura 61.

Figura 61-Recalques ajustados ao modelo de Ling *et al.* (1998) - Lisímetro 3



Fonte: Autora (2023).

4.5 Qualidade dos gases

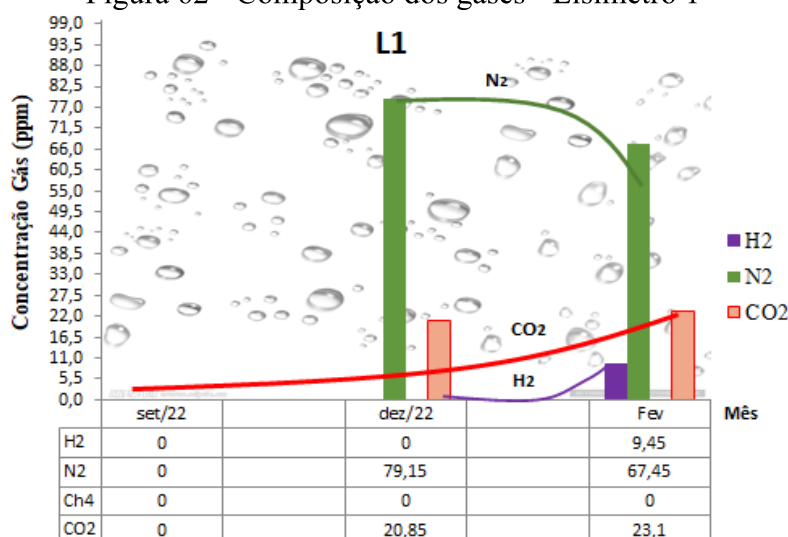
Os gases medidos nos lisímetros desta pesquisa foram CO₂, N₂, H₂, CH₄, todos constatados na cromatografia gasosa. A geração desses gases envolve muitas variáveis que acontecem com a degradação da massa de resíduo, como: os tipos de resíduos que foram colocados nos 3 lisímetros, as variações do pH do lixiviado, o comportamento da DQO ao longo dos meses, as condições locais (período chuvoso com muita precipitação e pouca evaporação), até mesmo o tipo de camada de cobertura que foi utilizado nos lisímetros, que foi uma camada intermediária classificada como areia.

Para que aconteçam os processos da conversão da matéria carbonácea em água,

em gás carbônico, em gás nitrogênio, em metano, dentre outros gases por exemplo, existem microrganismos como as bactérias, que fazem o consumo do substrato orgânico em condições aeróbias ou anaeróbias. Nesta pesquisa, os três lisímetros foram submetidos a uma condição em que o oxigênio poderia penetrar mais facilmente através do solo, tendo em vista que foi um solo de camada intermediária, do tipo areia com permeabilidade maior que uma argila.

No lisímetro 1, conforme pode ser verificado na Figura 62, entre setembro/22 e fevereiro/23, o nitrogênio (N₂) surge em grande porcentagem em dezembro/22, mas observa-se uma tendência de diminuição do volume desse gás em dezembro/22 e fevereiro/23, já a porcentagem do gás carbônico (CO₂) começou a aumentar entre dezembro/22 e fevereiro/23, e H₂ começa a surgir em pequena quantidade, sugerindo-se que o lisímetro L1 em fevereiro/23, ainda estava em uma fase aeróbica inicial de geração de gases de RSU. Nesta fase a matéria orgânica está sendo oxidada, e substâncias como amônia apresentam-se em grande quantidade, como pode ser visto nas Tabelas 21 e 22. Nesta fase também ocorrem as reações de nitrificação que reduzem a amônia em nitratos. Segundo Boscov (2008) e Augenstein e Pacey (1991) *apud* Maciel (2003), a fase inicial não é para durar muito tempo, mas isso é quando o ambiente tem uma cobertura que impeça a penetração do oxigênio na massa de resíduo, no caso dos lisímetros desta pesquisa, a camada de cobertura intermediária contribuiu para que essa fase inicial perdurasse mais tempo no Lisímetro 1 de RSU.

Figura 62 - Composição dos gases - Lisímetro 1

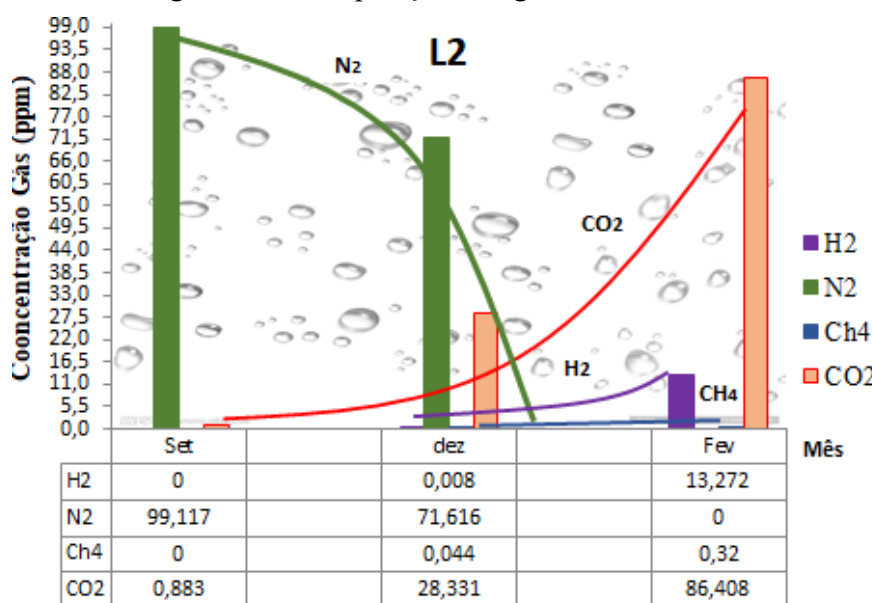


Fonte: Autora (2023).

Segundo Cunha (2009) e Alcântara (2007), a recirculação do chorume em aterros sanitários impacta no aumento da umidade dos resíduos, podendo influenciar na maior

geração de gases, dentre eles o metano. Mas para isso, o lixiviado deve ser adequado ao processo de degradação (com um pH próximo da alcalinidade). O L2 em meados de fevereiro/23 estava com pH menor que 5, indicando que ele estava na fase anaeróbia ácida. A aceleração da degradação da matéria orgânica no lisímetro 2 pode ter acontecido, isso é evidenciado pelos maiores recalques, quando comparados ao L3, mas no quesito aceleração da fase acidogênica para a fase metanogênica, como existem em outros trabalhos da literatura, foi praticamente impossível. Primeiro: o chorume inoculado era bruto sem tratamento nenhum, isso contribuiu para concentrar o lixiviado, e isso pode ser um fator limitante para o desenvolvimento de alguns microrganismos que atuam na metanogênese. Além disso, a metanogênese é facilitada por um ambiente predominantemente anaeróbico, que não foi o caso da situação do L2. Nos lisímetro L2 (com recirculação) e L3 as concentrações de metano foram baixíssimas, durante o monitoramento, mas a geração de metano (CH_4) foi menor ainda no L2 recirculado, que chegou a 0,32 ppm, como pode ser verificado na Figura 63, e no L3 a concentração 0,99 ppm, em fevereiro/23, como pode ser visto na Figura 64.

Figura 63 - Composição dos gases - Lisímetro 2

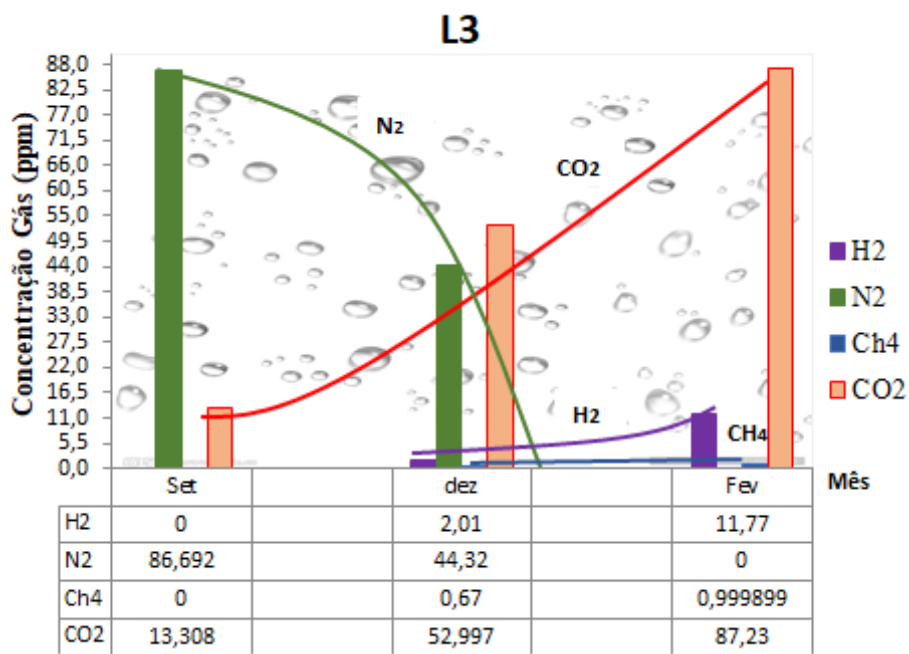


Fonte: Autora (2023).

No lisímetro L3, observa-se elevada concentração de CO_2 , diminuição do gás nitrogênio (N_2), Figura 64, e reduções de nitratos no período de monitoramento, entre setembro e fevereiro/23. Nota-se também que a partir de janeiro/23 o pH apresenta um comportamento de tender a diminuição. Nesta fase, em que o L3 se encontrava, as condições anaeróbicas estavam se desenvolvendo, sugerindo que o L3 estava saindo da fase de transição

aeróbia para anaeróbia, iniciando a fase ácida. Segundo Zanetti (2008), na saída da fase de transição para a fase ácida, começam a se desenvolverem microrganismos anaeróbios que não consomem oxigênio, mas outras substâncias como nitratos, sulfatos, dentre outros nutrientes.

Figura 64 - Composição dos gases - Lisímetro 3



Fonte: Autora (2023).

À medida que aparece o metano, na coleta de gases do três lisímetros, pode-se afirmar que há reações anaeróbias, pode ainda ocorrer reações aeróbias, em faixas diferentes do solo compactado nos lisímetros.

A geração elevada de gás hidrogênio (H_2) pode evidenciar que a fase fermentativa e acetogênica está acontecendo, e que a fase metanogênica está limitada, pois o baixo pH contribui para este fato, já que as bactérias metanogênicas são as mais sensíveis às diminuições de pH.

No que se refere à redução do gás (N_2), pode ser que ele esteja sendo eliminado no momento das coletas de lixiviado. Aliado a este fato, o N_2 pode estar passando por um processo de fixação no solo, ocasionada por bactérias fixadores de nitrogênio. Como há elevação do (H_2), é provável que não há o consumo deste para geração de (CH_4), através das metanogênicas hidrogenotróficas. porém há uma baixa geração de metano. A geração de metano pode ser causada pela atividade das bactérias metanogênicas acetoclásticas, através do acetato. De toda forma, houve a geração de metano, mesmo que em pouca quantidade, o que evidencia a existência de atividades anaeróbias, entre os meses de dezembro e fevereiro/2022,

para esta pesquisa.

Aqui na parte do gás é preciso analisar com os outros parâmetros em conjunto, principalmente o nitrogênio. No caso há redução do N_2 , pode ser a partir da não geração deste e ele aos poucos vai saindo junto com as coletas de amostras e pode ocorrer a fixação dele no solo por bactérias fixadores de nitrogênio. Como há elevação do H_2 então não está ocorrendo o consumo deste para geração de CH_4 , através das metanogênicas hidrogenotróficas, porém há uma baixa geração de metano, que pode vir pela via do acetato, através das metanogênicas acetoclásticas. Porém, se há geração de metano há atividades anaeróbias. Aqui o pH influencia.

É importante ressaltar que para a observação da geração de gases, deve-se existir um intervalo de tempo, para que possam ocorrer as reações, e então haver o mínimo de gases para serem aferidos. Isso está sendo explicado, devido aos intervalos mostrados nos gráficos das Figuras 62, 63 e 64.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho a partir dos objetivos estabelecidos. Ao fim, são apresentadas sugestões de pesquisas futuras que podem ser realizadas, para a continuidade desta pesquisa.

5.1 Conclusões

Os recalques, em maciços de RSU, são provocados por diversos fenômenos que envolvem tanto as características dos materiais em profundidade e, principalmente, acima dos resíduos, quanto ao processo microbiológico de decomposição dos RSU. Cada lisímetro, nesta pesquisa, apresentou um comportamento distinto no que diz respeito aos recalques produzidos. Os recalques para os lisímetros de RSO foram maiores que os recalques para o lisímetro de RSU, onde L1(RSU) apresentou recalque de 25 cm, L2 (RSO e com recirculação) 40 cm e L3(RSO e sem recirculação) 39 cm, em 6 meses de monitoramento.

Apesar dos ajustes do modelo de Ling *et al.* (1998) terem se aproximado dos recalques medidos na maioria do período de monitoramento, sua utilização deve ser feita com cautela, em previsões de recalques de longo prazo. Este modelo não leva em consideração as variáveis que influenciam na biodegradação como pH, DQO, tipos de bactérias envolvidas, e isso pode subestimar os recalques na massa de resíduos.

O lisímetro L2, que teve recirculação de chorume , teve maiores valores de recalques que o L3 na maior parte do tempo de monitoramento, evidenciando-se que os aumentos de recalques em L2 foram influenciados por uma possível aceleração da biodegradação. A recirculação em L2 também contribuiu para uma elevada carga de nutrientes nas amostras de lixiviado, isso foi observado nos altos valores de DQO, em boa parte dos meses de monitoramento.

Os volumes de percolado coletado nos lisímetros foram maiores nos meses de maiores precipitações pluviométricas, indicando que a ocorrência das chuvas impactam diretamente na produção do lixiviado. Uma maior infiltração ocorreu (em relação a uma camada de cobertura final) através de uma camada de solo intermediária, que foi classificada como areia média, que demonstrou alto coeficiente de permeabilidade, com valor de 10^{-3} cm/s.

O fato da camada de solo aplicada sobre os resíduos ser intermediária, representa uma situação da fase construtiva de um aterro sanitário, onde os RSU são depositados e cobertos por uma camada de cobertura intermediária. Além disso, a alta permeabilidade da camada de solo que estava sobre os resíduos conferiu maior dissolução dos sais em meio aquoso. Os resultados de sais de cloreto (Cl^-) 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 mostrando que a recirculação também provocou uma acidificação do meio.

Nos lisímetros L1 e L3, ambos de composições diferentes, o primeiro de RSU e o segundo de RSO apresentaram decréscimos de valores de DQO, já o lisímetro L2 (recirculado) a DQO apresentou-se sempre elevada. Há um indicativo nesta pesquisa que a recirculação não contribuiu para a diminuição de DQO, 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).

Nesta pesquisa, os três lisímetros foram submetidos a uma condição em que o oxigênio poderia penetrar mais facilmente através do solo, tendo em vista que o solo de cobertura utilizado foi do tipo areia.

O lisímetro L1 (de RSU) no final de 6 meses de monitoramento, ainda estava em uma fase aeróbia inicial de geração de gases de RSU. Nesta fase, a matéria orgânica ainda estava sendo oxidada, e substâncias como amônia apresentam-se em grande quantidade durante o período monitorado.

O lisímetro L2 (com recirculação) no final do monitoramento, estava com pH menor que 5, indicando que ele estava na fase anaeróbia ácida. A aceleração da degradação da matéria orgânica no lisímetro 2 pode ter ocorrido, sendo evidenciado pelos maiores recalques medidos, quando comparados ao L3, mas no quesito aceleração da fase acidogênica para metanogênica, isso não ocorreu, fator que pode ter sido dificultado pela utilização de uma camada de cobertura permeável. Além disso, conforme foi visto na literatura, para a indução da aceleração da fase acidogênica para a metanogênica, é importante haver o pré-tratamento do chorume antes de inoculá-lo em uma massa de resíduo, devido às elevadas concentrações de nutrientes, sais, metais pesados, dentre outros.

No lisímetro L3 (sem recirculação), pode ter iniciado o desenvolvimento de condições anaeróbias mesmo que lentamente, sugerindo que este lisímetro estava saindo da fase de transição aeróbia para anaeróbia, e começando a fase ácida no último mês de monitoramento.

A camada de solo de cobertura intermediária, utilizada nos 3 lisímetros, apresentou graus de compactação diferentes para os três pontos de coleta realizada. Para o ponto 1, o grau de compactação foi 108% do Proctor Normal, com densidade seca em campo de 20,41 kN/m³ e densidade obtida em laboratório de 18,93 kN/m³. No ponto 2, o grau de compactação foi 88% com densidade seca em campo de 16,95 kN/m³ e densidade obtida em laboratório de 19,22 kN/m³. Para o ponto 3, o grau de compactação foi 91%, com densidade seca em campo de 17,50 kN/m³ e densidade obtida em laboratório de 19,12 kN/m³. A faixa do grau de compactação, em campo, variou de 88% a 108%. Isso é um indicativo de que a camada intermediária tem uma compactação adequada, tendo em vista que a densidade de campo pode ser um fator que não é muito controlado em aterro sanitário.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

As seguintes sugestões têm o objetivo de dar continuidade a esta pesquisa, para análise de fatores que interferem em recalques em resíduos sólidos urbanos e resíduos sólidos orgânicos.

- Pré-tratamento do chorume cru, para saber se depois desse processo, isso pode influenciar na aceleração da mudança de fase acidogênica para metanogênica.
- Utilização de água de reuso e verificar se isso pode influenciar no comportamento das mudanças de fases de biodegradação dos resíduos.
- Utilização de camadas de cobertura intermediária, para o preenchimento dos lisímetros, provenientes da coleta de solo de várias alturas do aterro sanitário, para saber como está o grau de compactação dessas camadas.
- Investigação aprofundada das colônias de bactérias envolvidas no processo de biodegradação, tendo em vista que esses seres são um dos principais responsáveis pela biodegradação da matéria orgânica.
- Elaboração de um modelo de compactação experimental para resíduos sólidos urbanos e resíduos sólidos orgânicos, baseado em uma densidade obtida para a cidade de Fortaleza.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. E. S.; GANDOLFO, O. C. B.; VILAR, O. M. Characterizing a Brazilian sanitary landfill using geophysical seismic techniques. **Waste Management**, v.53, p.116-127, jul., 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.048> Acesso em: 15 marc. 2023.
- ABREU, A.E.S. de. **Investigação geofísica e resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos de diferentes idades**. 2015. 232 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- ALBERTE, E. P. V.; CARNEIRO, A. P.; KAN, L. Recuperação de áreas degradadas por disposição de resíduos sólidos urbanos. **Diálogos & Ciência**, v. 3, n.5, jun., 2005. Disponível em: [ACH1036-2017104 \(noturno\) | e-Disciplinas](#) Acesso em: 02 jan. 2023.
- ALCÂNTARA, P.B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 2007. 366 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20 Ed, Washington, 1998.1220p. Disponível em: [Standard Methods](#) Acesso em: 25 jul. 2023.
- _____. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater** (22nd ed.), Amer Public Health Ass, Washington, DC, USA (2012). Disponível em: [Standard Methods](#) Acesso em: 25 jul. 2023.
- ARAÚJO NETO, C. L. **Análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para previsão das deformações de aterros sanitários**. 2016. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- ARAÚJO, P. da S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8.419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 13.896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.
- _____. **NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **NBR 6457**: Amostras de Solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

- _____. **NBR 7181**: Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- _____. **NBR 7180**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 6459**: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- _____. **NBR 9813**: Determinação da massa específica aparente in situ, com o emprego do cilindro de cravação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- _____. **NBR 7182**: Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- _____. **NBR 13292**: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- _____. **NBR 13600**: Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/panorama/> >. Acesso em: 06 abr. 2022.

_____. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2008**. Disponível em: [Abrelpe – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais](https://abrelpe.org.br/panorama/) . Acesso em: 12 maio 2024.

_____. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama> . Acesso em: 20 maio 2022.

BARBOSA, A.A.R. **Caracterização geotécnica da cobertura do aterro sanitário de Caucaia-Ce e análise dos recalques utilizando modelo hiperbólico de Ling et al.(1998)**. 2016. 79 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016.

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, 2012c, p. 658-670. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.00006](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.00006) Acesso em: 09 fev. 2024.

BAREITHER, C.A.; BENSON, C.H.; EDIL, T.B. Compression behaviour of municipal solid waste in bioreactor landfills: mechanical creep and biocompression. Performance. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 139, n. 7, 2013, p. 1007-1021. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000835](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000835) Acesso em: 10 fev. 2024.

BATALI, L. *et al.* Instability phenomena in municipal waste landfill: numerical modeling in saturated and unsaturated conditions. **Energy Procedia** v.112, mar., 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1123> Acesso em: 20 dez. 2023. p.481-488,

BATISTA, L.S. *et al.* Análise de parâmetros em célula experimental para resíduos sólidos. *In: CONGRESSO SULAMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE*, 4., Gramado. **Anais...** Gramado, 2021. Disponível em: [IV-010](#). Acesso em: 04 ago. 2023.

BELFORT, *et al.* Permeabilidade de um solo de comportamento anômalo utilizado para cobertura do Aterro Sanitário de Altinho/PE. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL*, 9., São Carlos. **Anais...** São Carlos: REGEO, 2019. Disponível em: [\(PDF\) Permeabilidade de um Solo de Comportamento Anômalo Utilizado para Cobertura do Aterro Sanitário de Altinho/PE](#) Acesso em: 23 jun. 2023. p.443-452

BLONDEL, D. **Website Evident**, © 2020. A ciência por trás da energia dispersiva de XRF. United States: Evidence, 2020. Disponível em: [How Does XRF Work? Understanding X-Ray Fluorescence | Blog Post | Olympus IMS](#) Acesso em: 08 maio 2024.

BORGATTO, A. V. A. **Estudo das propriedades geomecânicas de resíduos sólidos urbanos pré-tratados**. 2010. 271 f. Tese (Doutorado em Geotecnia), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2010.

BORGATTO, A.V. de A.; MAHLER, C.F; MÜNNICH, K. Influência do material plástico mole nos parâmetros de resistência dos resíduos sólidos urbanos pré-tratados. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, n. 124, p.47-55, 2012. Disponível em: <https://www.abms.com.br/wp-content/uploads/2014/09/Revista124.pdf#page=49>. Acesso em: 27 jun. 2022.

BORBA, P.F.S *et al.* Emissão de gases do efeito estufa de um aterro sanitário no Rio de Janeiro. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro-RJ, v.23, n.1, p. 101-111, jan/fev2018.
Disponível em: scielo.br/j/esa/a/xVZsksRyQVYm6VSKkKMwPgc/?format=pdf&lang=pt
Acesso em: 25 abr. 2024.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 248 p., 2008.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em: [L12305](#) Acesso em: 10 jan. 2023.

BRITO FILHO, L. F. de. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. 2005. 218 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 244p., 1996.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 5ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1977.

CARDIM, R.D. **Estudo da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões.** 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2008.

CARDOSO COSTA, C. de M. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos.** 2015. 163 f. Tese (Doutorado em Geotecnia), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2015.

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.

CARVALHO, M. de F; MACHADO, S.L.; ROCHA, M.B. Compressibilidade de resíduos sólidos urbanos - Aterro Metropolitano Centro – BA. *In: VII SEMANA DE MOBILIZAÇÃO CIENTÍFICA*, 7., Salvador. **Anais...**Salvador: SEMOC, 2004. Disponível em: [SEMOC – UCSal](#) Acesso em: 05 jan. 2023.

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.; SIMÕES, G. F; BARROS, R. T. V. Avaliação da densidade dos resíduos sólidos dispostos em um aterro experimental. *In: XXX CONGRESSO DE LA ASOCIACIÓN INTERAMERICANA DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL*,30., Puntal del Este. **Anais...** Puntal del Este: AIDIS, 2006. Disponível em: [\(PDF\) V – Catapreta-Brasil-1 AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DISPOSTOS EM UM ATERRO EXPERIMENTAL](#) Acesso em: 24 dez. 2023.

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.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. Monitoramento ambiental e geotécnico de aterros sanitários. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL*, 7., Campina Grande. **Anais...**Campina Grande, 2016. Disponível em: [III-081](#) Acesso em: 04 abr. 2024.

CEARÁ (Estado). Lei nº 13.103, de 24 de janeiro de 2001. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá Providências Correlatas. **Diário Oficial do Estado**: seção1, Fortaleza, 2001. Disponível em: [Lei Ordinária 13103 2001 de Ceará CE](#) Acesso em: 23 jan. 2023.

CEMBRANEL, A.S. *et al.* Composição gravimétrica e as causas da geração de rejeitos na triagem dos resíduos recicláveis municipal. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.4, p. 36217-36239, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n4-200> Acesso em: 2 maio 2023.

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.

COELHO, H.M.G *et al.* Avaliação do desempenho de camadas de cobertura intermediárias e finais em células experimentais de disposição de resíduos sólidos urbanos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA*, 23., 2005, Campo Grande. **Anais...**Rio de Janeiro: ABES, 2005. Disponível em: [III-250 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CAMADAS DE COBERTURA INTERMEDIÁRIAS E FINAIS EM CÉLULAS EXPERIMENTAIS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS](#) Acesso em: 23 abr. 2024.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM - CEMPRE. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 4 ed. São Paulo: CEMPRE, 2018. Disponível em: https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Lixo_Municipal_2018.pdf. Acesso em: 10 maio 2022.

CORREA, C.; JUCÁ, L.F.T; MOTTA, E. Análise da influência do plástico mole na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.20, n.3, p. 427-436, 2015.

CORRÊA, C.L. **Análise da influência do plástico mole na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013.

CORRÊA, C. L. **Estudo das propriedades mecânicas dos resíduos sólidos urbanos**. 2020. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

COSTA, E. F. de F. **Aspectos sociais, econômicos e de moradia das comunidades instaladas no entorno do inativo lixão do Jangurussu**. 2011. 45 f. Monografia (Graduação em Saneamento Ambiental) – Departamento de Construção Civil, Instituto Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

COSTA, L. E. B *et al.* Gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos domiciliares e perfil socioeconômico no município de Salinas, Minas Gerais. **Revista Ibero- Americana de Ciências Ambientais**, Aquidabã, v.3, n.2, p.73-90, 2012. Disponível em: [\(PDF\) Gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos domiciliares e perfil socioeconômico no município de Salinas, Minas Gerais](#) Acesso em: 03 ago. 2023.

COSTA, M. D. **Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos**. 2015. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

COSTA, L.T. da. **Análise da composição e do peso específico dos resíduos sólidos urbanos com um ano de aterramento dispostos em aterro sanitário.** 2019. 41 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

CUNHA, E.R. da. **Avaliação do processo de bioestabilização de resíduos sólidos urbanos em lisímetro de campo.** 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

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.

DENARDIN, G.P. **Estudo dos recalques do aterro sanitário da central de resíduos do recreio – Minas do Leão/RS.** 2013. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

DEMAJOROVIC, J. Da política tradicional de tratamento do lixo, à política de gestão de resíduos sólidos, as novas prioridades, **Revista de Administração de Empresas.** São Paulo v.35, n.3, 1995. p.88-93.

Disponível em: scielo.br/j/rae/a/cCgZQGXgS64q5QTVJ7jcPWw/?format=pdf Acesso em: 03 jan. 2023.

ANDRADE, R. **Diprotec Geossintéticos**, © 2018. Geossintéticos na construção de aterros sanitários. Disponível em: [GEOSSINTÉTICOS NA CONSTRUÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS – Diprotec GEO](#). Acesso em: 26 abr. 2024.

DIXON, N.; JONES, D. R. V. Engineering properties of municipal waste. **Geotextiles and Geomembranes Journal**, v.23, n.3, p.205-233, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114405000051>. Acesso em 25 jun. 2022.

EDILL, T.; RANGUETTE, V.; WUELLNER, W. Settlement of Municipal refuse. *In*: LANDVA, A.; KNOWLES, D. (org). **Geotechnics os waste fills – theory and practice.** Philadelphia: ASTM, 1990. p.225-239. Disponível em: [\(PDF\) Settlement of municipal refuse](#) Acesso em: 10 mar. 2024.

ELIAS, D. de S. **Caracterização de cinzas de carvão mineral e sua aplicação como barreira impermeabilizante.** 2018. 231 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

ESCANDIEL *et al.* Metodologia para determinação da massa específica de resíduos sólidos domésticos aterrados. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 2019, Natal. **Anais...**Natal, 2019. Disponível em: [MELHORIA DA QUALIDADE DA ÁGUA TRATADA E AUMENTO DA CAPACIDADE DE ETAS ATRAVÉS DA ESCOLHA ADEQUADA DE COAGULANTES E AUXILIARES, EM ÁGUAS COM ALCALINIDADE ALTA](#). Acesso em: 12 mar. 2023.

ESCOBAR, F.; ABICHOU, T. Development of Screening Parameter for the Design of Monolithic Alternative Landfill Covers in Arid and Semi-Arid Climates. **Journal of Environmental Science and Engineering Technology**, Washington, v. 4, p. 10-21, 2016. Disponível em: [Development of Screening Parameter for the Design of Monolithic Alternative Landfill Covers in Arid and Semi-Arid Climates | Journal of Environmental Science and Engineering Technology](#) Acesso em: 25 fev. 2024.

FERREIRA, M.A.S.; MAHLER, C.F. Avaliação do Solo das Camadas de Cobertura Intermediárias e Finais Estudo de Caso. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 8., 2006, Curitiba. **Anais...** 2006. Curitiba: COBRAMSEG, 2006. p. 1377-1382. Disponível em: [Avaliação do Solo das Camadas de Cobertura Intermediárias e Finais Estudo de Caso](#) Acesso em: 02 maio 2024.

FRANKLIN, M.A. Solid Waste Stream Characteristics. *In*: TCHOBANOGLOUS, G.; KREITH, F. (org.). **Solid Waste Management**. New York: McGraw Hill Education, 2002. p. 111-140. Disponível em: [\(PDF\) Solid Waste Management Handbook](#). Acesso em: 02 jul. 2023

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M.D. **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2012. 939 p. Disponível em: [\(PDF\) Fredlund Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice 2012](#) Acesso em: 26 maio 2023.

FUCALE, S. P.; JUCÁ, J. F. T. Estudo da resistência à penetração dinâmica (SPT) em aterros de resíduos sólidos urbanos. *In*: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28., 2002, México. **Proceedings...** México: AIDIS, 2002. Disponível em: [\(PDF\) Estudo da resistência à penetração dinâmica \(SPT\) em aterros de resíduos sólidos urbanos](#) Acesso em: 24 jul. 2023

FUNGAROLI, A.A.; STEINER, R.L. **Investigation of sanitary landfill behavior: Volume II Supplement to the Final Report**. Philadelphia: USEPA, 1979. Disponível em: [Document Display | NEPIS | US EPA](#) Acesso em: 23 out. 2023.

GADELHA, A.A.B. **Estimativa de parâmetros geotécnicos de resíduos sólidos urbanos utilizando algoritmos de aprendizado de máquina**. 2021. 185 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

GUEDES, M.J.F. *et al.* Estudo comparativo do balanço hídrico em lisímetro com o método suíço. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABRH, 2017. Disponível : [Ethan Frome \(abrhidro.org.br\)](#). Acesso em: 11 abr. 2024.

GUEDES, D.A.S. *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. Disponível em: http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_233_n_2006.pdf . Acesso em: 22 jun. 2022.

GRISOLIA, M. *et al.* Geotechnical behaviour of sanitary landfill based on laboratory and in situ test (Section 3C). *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID WASTE MANAGEMENT AND SECONDARY MATERIALS*, 7, 1992, Osaka. **Proceedings...**Osaka: Environmental geotechnics, 1992. Disponível em: [Geotechnical characterization of municipal solid waste : Choice of design parameters](#). Acesso em: 03 abr 2024.

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: Environmental geotechnics, 1996. Disponível em: [Geotechnical characterization of municipal solid waste : Choice of design parameters](#). Acesso em 03 abr. 2024. p.641-646.

GOIÁS (Estado). Lei nº 13.583, de 11 de janeiro de 2000. Dispõe sobre a conservação e proteção ambiental dos depósitos de água subterrânea no Estado de Goiás e dá outras providências. **Diário oficial do Estado**: seção 1, Goiás, 2000. Disponível em: [LEI Nº 13.583, DE 11 DE JANEIRO DE 2000](#). Acesso em: 03 set. 2023.

GOMES, L. P.; MARTINS, F. B. Projeto, implantação e operação de aterros sustentáveis de resíduos sólidos urbanos para municípios de pequeno porte. *In: CASTILHOS JÚNIOR, A. B. (Coord.). Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte*. Rio de Janeiro: ABES, RIMA, Projeto PROSAB, 2003. p.51-105.

GUIZELINI, A. P. **Estudo do comportamento hidromecânico de solos visando a construção de sistemas de cobertura alternativos para aterros sanitários**. 2011. 166 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

HUSE, K. **Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros**. 2007. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República - SEDU/PR, 204 p., 2001. Disponível em: [Arquivo de Resíduos Sólidos - IBAM](#) Acesso em: 12 nov. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf>. Acesso em: 10 maio 2022.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Relatório de Pesquisa. Brasília: Ipea, 2012. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf. Acesso em : 09 maio 2022.

INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION. **Landfill operational guidelines**. A report from ISWA's working group on landfill. Rotterdam: ISAWA, 2019. Disponível em: [Download the 3rd Landfill Operations Guidelines | ISWA](#). Acesso em: 17 maio 2022.

JEFFERY, J.; MARSHMAN, N.; SALOMONS, W. Behaviour of Trace Metals in a Tropical River System Affected by Mining. *In*: SALOMONS, W.; FORSTNER, U. (org). **Chemistry and Biology of Solid Waste: Dredged Material and Mine Tailings**. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988. p. 259-274. Disponível em: [Behaviour of Trace Metals in a Tropical River System Affected by Mining | SpringerLink](#) Acesso em: 05 maio 2024.

JUCÁ, J.F.T. Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil. *In*: V CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 5., 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: REGEO, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/260084353_Destinacao_Final_de_Residuos_Solidos_Urbanos_no_Brasil . Acesso em: 08 maio 2022. p. 443-470.

KLINK, A.F.C. **Previsão de recalques em aterros sanitários utilizando modelos de compressibilidade: estudo de caso da Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu-RJ**. 2019. 101 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental). Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

KÖLSCH, F.; BAUER, J. Static Stability of Landfills. *In*: INTERNATIONAL WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 12., 2009, Sardenha. **Proceedings...** Sardenha: Internacional Waste Working Group - IWWG, 2009, 18 p. Disponível em: [Microsoft Word - Paper Kölsch.doc](#) Acesso em: 25 jun. 2023.

LAMARE NETO, A. de. **Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de Materiais Granulares com Fibras**. 2004. 190p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

LANZA, V. C. V. *et al.* **Caderno técnico de reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente/Fundação Israel Pinheiro, 2010. 29p. Disponível em: [Caderno-Técnico-de-Reabilitação-de-Áreas-Degradadas-por-Resíduos-Sólidos-Urbanos.pdf](#) . Acesso em: 14 mar. 2023.

LENTZ, L.B. **Avaliação do monitoramento do lixiviado e de águas subterrâneas, superficiais do aterro sanitário da Extrema/RS**. 2023. 69 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química). Instituição de Ensino Superior do Grupo Ânima Educação. Porto Alegre, 2023.

LI, X.; SHI, J. Stress-strain Behaviour and Shear Strength of Municipal Solid Waste (MSW). **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 20, n.5, p.1747–1758, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-015-0268-5#citeas>. Acesso em: 25 jun. 2022.

LING, H.I. *et al.* Estimation of municipal solid waste landfill settlement. **Journal and Geoenvironmental Engineering**, 1998, v. 124, n.1 , p. 21-28. Disponível em: [\(PDF\) Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement](#). Acesso em: 10 fev. 2024.

LINO, I. C. **Seleção de áreas para implantação de aterros sanitários: análise comparativa de métodos**. 2007. 99 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2007.

LINS, E.A.M. **A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no Aterro da Muribeca.** 2003. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

LIU, C.N. *et al.* Unsaturated consolidation theory for the prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement. **Waste Management**, v.24, n.1, p.80-91, jul., 2006. Disponível: [Sci-Hub | Unsaturated consolidation theory for the prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement. Waste Management & Research, 24\(1\), 80–91 | 10.1177/0734242X06062579](#) . Acesso em: 10 maio 2024.

LOPES DOS SANTOS, T. F. **Estudo experimental da camada de cobertura do aterro Morro do Céu, Niterói - RJ.** 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MACIEL, F.J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muiribeca/PE.** 2003. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MAHLER, C.F; COSTA, L.C.; MENDEZ, G. de P. Ensaaios triaxiais em composto oriundo de resíduos sólidos urbano. **Revista Augustus**, v. 25, n.52, 17 p., 2020. Disponível em: [Visor Redalyc - ENSAIOS TRIAXIAIS EM COMPOSTO ORIUNDO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANO \(amelica.org\)](#) Acesso em: 25 jun 2022.

MARIANO, M. O. H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos.** 2008. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

MARQUES, A.C.M. **Compactação e Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos.** 2001. 408 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), 2001.

MARTINS, H. L. **Avaliação da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto em equipamento de grandes dimensões.** 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2006.

MELO, M. C. de. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca.** 2003. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MELO, M.C de. *et al.* Deformação vertical dos resíduos sólidos urbanos em uma célula experimental em função da composição gravimétrica e volumétrica dos materiais. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n.12, p. 450-460, 2016. Disponível em: [\(PDF\) Deformação Vertical dos Resíduos Sólidos Urbanos em uma Célula Experimental em Função da Composição Gravimétrica e Volumétrica dos Materiais](#) Acesso em: 10 jan. 2024.

MELLO, C.C de S.; SIMÕES, G.F. Avaliação do ganho de vida útil em uma célula de um Aterro Sanitário de grande porte durante a operação com utilização de VANT. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL – REGEO, 10., 2023, Salvador. **Anais...** Salvador: REGEO, 2023. Disponível em: [Avaliacao-do-Ganho-de-Vida-Util-em-uma-Celula-de-um-Aterro-Sanitario-de-Grande-Porte-durante-a-Operacao-com-Utilizacao-de-VANT.pdf](#) Acesso em: 05 nov. 2023. p 1-8.

MONDELLI, G. *et al.* Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil. **Environmental Geology**, v. 52, n.5, p. 871-887, 2007. Disponível em: [\(PDF\) Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil](#) Acesso em: 05 abr. 2024.

MONTEIRO, V.E.D. **Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro da Muribeca**. 2003. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MONTEIRO, V.E.D. *et al.* Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 223-230, 2006. Disponível em: [\(PDF\) Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos \(researchgate.net\)](#) Acesso em: 13 abr. 2024.

NASCIMENTO FILHO, V.F. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF) e por reflexão total (TXRF)**. Departamento de Ciências Exatas/ESALQ Lab. de Instrumentação Nuclear/CENA, 19 p., 1999. Disponível em: [FUNDAMENTOS TEÓRICOS \(ufc.br\)](#) Acesso em: 08 maio 2024.

NASCIMENTO, J.C.F do. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 2007. 160 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

OLIVEIRA, D. A. F. **Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos**. 2002. 154 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2002.

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. Disponível em: [Handbook of Solid Waste Management - George Tchobanoglous, Frank Kreith - Google Livros](#). Acesso em: 05 abr. 2024.

OLIVEIRA, E. C. *et al.* Estudo de recalques em lisímetro experimental. *In*: XIV ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 3., 2016, Brasília. **Anais...** Brasília: ENEEAmb, 2016, Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/engineeringproceedings/eneeam2016/awrd-001-4989.pdf>. Acesso em: 08 maio 2022. 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. Disponível em: [Hydro-mechanical behavior of Municipal Solid Waste subject to leachate recirculation in a large-scale compression reactor cell - ScienceDirect](#). Acesso em: 12 fev. 2024.

OWEIS, I. S. Stability of landfills. *In*: DANIEL, D.E. (org.). **Geotechnical practice for waste disposal**. Berlim: Chapman & Hall, 1993. p. 244-268. Disponível em: [Geotechnical practice for waste disposal in SearchWorks catalog](#). Acesso em: 12 mar. 2024.

PEREIRA, A.C. de O. S. *et al.* Efeito da granulometria do resíduo sólido urbano na composição do biogás proveniente de biorreatores anaeróbicos. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 11, n.2, p. 350-361, 2020. Disponível em: [Efeito da granulometria do resíduo sólido urbano na composição do biogás proveniente de biorreatores anaeróbicos](#). Acesso em 25 abr. 2023.

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.

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

PINTO, T. de P. *et al.*, **Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da cidade de São Paulo**. 1ed. São Paulo: Prefeitura Municipal de São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/servicos/arquivos/PGIRS-2014.pdf> Acesso em: 11 maio 2022.

POLO, J.F. *et al.* **Tratamientos biológicos de aguas residuales**. 4ed. Valença: Universidade de Valença, 2022.

QIAN, X.; KOERNER, R.M.; GRAY, D.H. **Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction**. 1. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

RAMAIAH, B.J; RAMANA, G.V. Study of stress-strain and volume change behavior of emplaced municipal solid waste using large-scale triaxial testing. **Waste Management**, v. 63, p. 366-379, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X17300272>. Acesso em: 25 jun. 2022.

REZENDE, J. H. *et al.* Composição gravimétrica e peso específico dos resíduos sólidos urbanos em Jaú (SP). **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro v. 18, n.1, p. 1-8, 2013. Disponível em: [SciELO Brasil - Composição gravimétrica e peso específico dos resíduos sólidos urbanos em Jaú \(SP\) Composição gravimétrica e peso específico dos resíduos sólidos urbanos em Jaú \(SP\)](#). Acesso em: 10 jan. 2024.

RIGUETTI, P.F. *et al.* Manganês, zinco, cádmio, chumbo, mercúrio e crômio no chorume de aterro sanitário em Dourados, MS, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, n. 1, v. 10, p.153-163, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/45r6XqB4LTBVXzScp7rgYJw/#> Acesso em: 14 nov. 2023.

ROTH, B. W.; ISAIA, E. M. B. I.; ISAIA, T. Destinação final dos resíduos sólidos urbanos. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, RS, n. 18, p. 25-40, jan./jun. 1999. Disponível em: cienciaambiente.com.br/shared-files/3176/?025-040.pdf Acesso em: 15 out. 2023.

ROCHA, E. F. da. **Determinação da condutividade hidráulica e capacidade de campo de resíduos sólidos urbanos**. 2008. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2008.

ROCHA, P. E.O. da; ZANON, T.V.B.; PORTELINHA, F.H.M. Análise da viabilidade técnica da verticalização de aterros sanitários no Brasil com uso de estruturas em solos reforçados. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 10., 2023, Salvador. **Anais...** Salvador: REGEO, 2023. Disponível em: [VOLUME II GEOSINTÉTICOS 2023.pdf](#) Acesso em: 08 nov. 2023. p. 1-9.

RUSSO, M.A.T. **Tratamento de resíduos sólidos**. 2003. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Coimbra, Coimbra, 2003.

SÃO PAULO (Estado). GOVERNO DO ESTADO. Lei nº 6.134, de 2 de Junho de 1988. Dispõe sobre a Preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**: São Paulo, SP, 1988, p.1, 2 jun. 1988, PL 376/1987 Disponível em: [Lei nº 6.134, de 02 de junho de 1988 - Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo](#) Acesso em: 05 ago. 2023.

SALAMONI, G.P.D. **Compressibilidade de resíduos sólidos urbanos devido aos processos de biodegradação em um aterro sanitário**. 2019. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

SANTOS, G.O; MOTA, F.B.S. Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Domiciliares de Fortaleza/CE Dispostos no Aterro Sanitário de Caucaia/CE, **Rev. Tecnol. Fortaleza**, v. 31, n. 1, p. 39-50, jun. 2010. Disponível em: [Repositório Institucional UFC: Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares de Fortaleza/CE dispostos no aterro sanitário de Caucaia/CE](#) . Acesso em: 05 jun. 2023.

SANTOS, H.G. dos; ZARONI, M.J. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa**, © 2021. Solos Tropicais: Teor de óxidos de ferro. Disponível em: [Teor de óxidos de ferro - Portal Embrapa](#) Acesso em: 11 maio 2024.

SANTOS, G.O.; ZANELLA, M.E.; SILVA, L. F. F. da. Correlações entre indicadores sociais e o lixo gerado em Fortaleza, Ceará, Brasil. **Revista Eletrônica do Prodepa – REDE**, Fortaleza, v.2, n.2, p.45-63, 2009. Disponível em: <http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/10> Acesso em: 19 jun. 2022.

SANTOS, G. O. **Resíduos sólidos domiciliares, ambiente e saúde: (inter)relações a partir da visão dos trabalhadores do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos de Fortaleza/ce.** 2008. 164 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública). Pós-Graduação em Saúde Pública, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

SANTOS, A. F. de M.S. **Tratamento anaeróbio de chorume em conjunto com esgoto sanitário.** 2009. 206 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

SANTOS, V. C. dos **Projeto, construção e instrumentação de um lisímetro em escala de laboratório para estudos em resíduos sólidos.** 2010. 13 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2010.

SANTOS, G. O. **Avaliação do cultivo de gramíneas na superfície de aterro sanitário, com ênfase para a redução da emissão de metano e dióxido de carbono para a atmosfera.** 2012. 313 f. Tese (Doutorado em Saneamento Ambiental), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

SANTOS, G. O. Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Domiciliares de Fortaleza/CE Dispostos no Aterro Sanitário de Caucaia/CE. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 31, n. 1, p. 39–50, 2010. Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/5334>. Acesso em: 11 maio. 2022.

SANTOS, P. C. V. dos **Estudo da degradação e dos recalques em células experimentais de resíduos sólidos no aterro do Jockey Club/DF.** 2004. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

SANTOS, T.; ROVARIS, N. R. S. Cenário brasileiro da gestão dos resíduos sólidos urbanos e coleta seletiva. *In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DE PROJETOS, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE*, 6., São Paulo. **Anais...** São Paulo: SINGEP, 2017. Disponível em: [430.pdf](#). Acesso em: 05 mar. 2023.

SANTOS, G.O.; MATOS, B. de O. Estudo do processo de degradação de resíduos sólidos orgânicos (restos de alimentos) em lisímetro de pequeno porte. **Conexões Ciência e Tecnologia**, Fortaleza, v. 11, n. 4, p. 26-36, 2017. Disponível em: <http://conexoes.ifce.edu.br/index.php/conexoes/article/view/913> Acesso em: 22 jun. 2022.

SANTOS, T. F. L dos. **Estudo experimental da camada de cobertura do aterro Morro do Céu, Niterói – RJ.** 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental). Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, M. C. da; SANTOS, GO. Densidade aparente de resíduos sólidos recém coletados. *In: CONGRESSO NORTE-NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO*, 5., 2010, Maceió, **Anais...** Maceió: IF Alagoas, 2010. Disponível em: <http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/167/157>. Acesso em : 12 maio 2024.

SANTOS, G. M. dos. **Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-composto utilizados em camadas de cobertura no aterro experimental da Muribeca, Pernambuco.** 2015. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SILVA, M.C. da; SANTOS, G.O. Caracterização dos líquidos gerados em aterros sanitários como parâmetro indicador da fase de digestão de resíduos sólidos aterrados. *In: SIMPÓSIO IBERICOAMERICANO DE INGENIERIA DE RESIDUOS,3., SEMINÁRIO DA REGIÃO NORDESTE SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2., 2010, João Pessoa. Anais...* João Pessoa: REDISA, 2010. Disponível em: [CARACTERIZAÇÃO DOS LÍQUIDOS GERADOS EM ATERROS SANITÁRIOS COMO PARÂMETRO INDICADOR DA FASE DE DIGESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS ATERRADOS](#) Acesso em: 03 jan. 2024. p.1-6.

SILVA, A.S.F. da. **Avaliação do processo de compostagem com diferentes proporções de resíduos de limpeza urbana e restos de alimentos.** 2016. 48 f. Dissertação (Mestrado em Ciências), Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

SILVA, R. A. C da. **Avaliação da evolução do comportamento geomecânico de aterros sanitários com base na realização de ensaios de laboratório e de campo.** 2017. 138 f. Tese (Doutorado em Geologia), Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SILVA, M. L. **Caracterização física de solos de cobertura e de resíduos sólidos do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia.** 2022. 107 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental), Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental, Instituto Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico do manejo de Resíduos Sólidos Urbanos.** Brasília: SNS, 2019. Disponível em: [SNIS — Ministério das Cidades](#) Acesso em: 21 fev. 2023.

SOLOMONS, D.W.; FORSTNER, U. **Chemistry and Biology of Solid Waste: Dredged Material and Mine Tailings.** 1 ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1988.

SOUSA PINTO, C. de. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SOUZA, H. P. de. **Uso de cinzas de carvão mineral da termelétrica do Pecém como material de cobertura seca de depósitos de resíduos.** 2018. 160 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

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...* Belo Horizonte: ABES, p. 1-22. Disponível em: [ReP USP - Detalhe do registro: Características do lixiviado de aterros sanitários no Brasil](#). Acesso em: 22 jan. 2023.

SPERLING, M.V. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 2 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996.

SOYEZ, K.; PLICKERT, S. Mechanical-Biological Treatment of Waste (MBP). *In*: LUDWIG, C.; HELIWEG, S.; STUCKI, S.(org.). **Municipal Solid Waste Management**. New York: Springer, 2003. p. 130-138. Disponível: [Mechanical-Biological Pre-Treatment of Waste: State of the Art and Potentials of Biotechnology - Soyez - 2002 - Acta Biotechnologica - Wiley Online Library](#) Acesso em: 10 jan. 2024.

SOWERS, G.F. Settlement of waste disposal fills. *In*: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 8., 1973, Moscow. **Proceedings...** Moscow: ISSMGE, 1973. p. 207-210. Disponível em: [1973_05_0034.pdf](#) Acesso em: 10 maio de 2024.

SOLID WASTE ANALYSIS. **Methodology for the analysis of solid waste: Tool, Development of a Methodological Tool to Enhance the Precision & Comparability of Solid Waste Analysis Data**. 5 th. Austria: SWA, 2004. Disponível em: [Swa Tool 759 Ma48 | PDF | Stratified Sampling | Sampling \(Statistics\)](#) Acesso em: 10 dez. 2023.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice**. 2nd. New York: John Wiley and Sons, 1967.

UNITED STATES OF ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Resource Conservation and Recovery Act Orientation Manual 2014**. EPA530-F-11-003. Washington: USEPA, October 2014. Disponível em: <https://www.epa.gov/hwgenerators/resource-conservation-and-recovery-act-rcra-orientation-manual>. Acesso em: 09 maio 2022.

_____. **Guide to the Facts and Figures Report about Materials, Waste and Recycling**. Facts and Figures about Materials, Waste and Recycling. Washington: USEPA, 2018. Disponível em: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/guide-facts-and-figures-report-about>. Acesso em: 12 maio 2022.

_____. **Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet**. Solid waste and emergency response (5102G). EPA 542-F-03-015. Washington: USEPA, 2003. Disponível em: <https://clu-in.org/download/remed/epa542f03015.pdf>. Acesso em: 20 maio 2022.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Organic Waste Management in Latin America: Challenges and Advantages of the Main Treatment Options and Trends**. Washington: UNEP, 2017. Disponível em: [Waste Management Outlook for Latin America and the Caribbean | UNEP - UN Environment Programme](#). Acesso em: 13 maio 2022.

VAN ELK, A.G.H.P; BOSCOV, M.E.G. Impacto da política nacional de resíduos sólidos na gestão e na concepção, projetos, construção e operação de aterros sanitários. *In*: SANT'ANA, Daniel (org.). **Evolução do conhecimento científico na engenharia ambiental e sanitária**. Ponta Grossa PR: Editora Atena, 2020. p.167-177. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/40664>. Acesso em: 08 maio 2022.

VAN ELK, A.G.H.P; CORRÊA, L. G.; RITTER, E. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.24, n.3, p.547-557, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/zvSNvqDYyRzCgVH3VRn3Fev/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 27 jun. 2022.

VALENTE, J. P. S.; PADILHA, P. de M.; DA SILVA, A. M. M. Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu - SP. **Eclética Química**, Araraquara, v. 22, n. 1, p. 49–66, 1997. Disponível em: <https://revista.iq.unesp.br/ojs/index.php/ecletica/article/view/608> . Acesso em: 14 nov. 2023.

VIRIATO, C.L. *et al.* Influência da granulometria e da concentração de sólidos totais na codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos. **Revista de estudos ambientais (Online)**, Blumenau, v.17, n. 1, p. 6-15, 2015. Disponível em: [Vista do INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA E DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS NA CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS ORGÂNICOS](#). Acesso em: 23 fev. 2024.

WASTOWSKI, A.D. Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF). **Química Nova**, Campinas, v. 33, n. 7, p.1449-1452, 2010. Disponível em: scielo.br/j/qn/a/Xmt7PnPqDjCkkFJ4xQxvgfb/?format=pdf&lang=pt Acesso em: 02 abr. 2024.

WORREL, W.A; VESILIND, P.A. **Solid waste engineering**. 2 ed. Stamford: Cengage Learning, 2012. Disponível em: [Solid Waste Engineering by William A. Worrell | Open Library](#) Acesso em: 10 jan. 2024.

YUGUE, E.D. **Desafios e potenciais soluções para reciclagem de embalagens plásticas flexíveis pós-consumo no Brasil**. 2020. 231 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2020.

ZANETTI, M.C. Aerobic Bioestabilization of Old MSW landfills. **American Journal of Engineering and Applied Sciences** , v. 1, n. 4, p. 393-398, 2008. Disponível em: thescpub.com/pdf/ajeassp.2008.393.398.pdf Acesso em: 25 maio 2024.

ZAYTSEV, V.A. Development of low-waste and waste-free technologies as the main way of solving the industrial waste problem. *In*: CURI, K.(org.). **Appropriate Waste Management for Developing Countries**. New York: Springer, 1985. p. 53-63. Disponível: [Development of Low-Waste and Waste-Free Technologies as the Main Way of Solving the Industrial Waste Problem | SpringerLink](#) Acesso em: 14 abr. 2024.

ZEKKOS, D; BRAY, J.D; RIEMER, M.F. Drained response of municipal solid waste in large-scale triaxial shear testing. **Waste Management**, v. 32, n. 10, p. 1873-1885, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X12001948>. Acesso em: 25 jun. 2022.

ZORNBERG, J.G.; MCCARTNEY, J.S. Evapotranspirative Cover Systems for Waste Containment. *In*: DELLEUR, J. W. (org.). **The Handbook of Groundwater Engineering**, Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2006. Disponível em: [The Handbook of Groundwater Engineering | Jacques W. Delleur | Taylor](#) Acesso em: 22 maio 2024.