



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Priscila Mendes Zidan

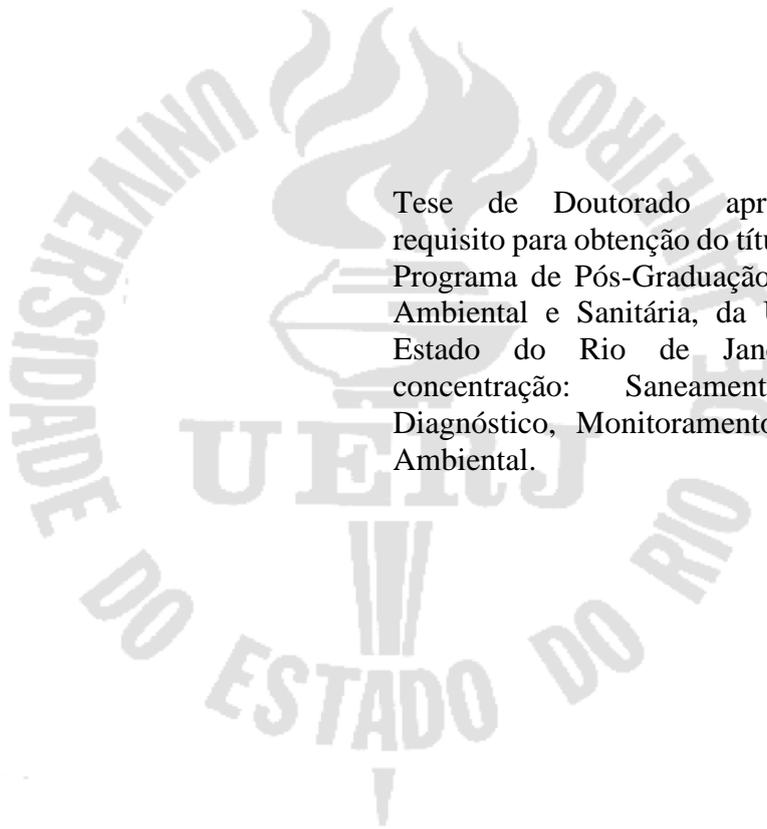
**Formação de Bolhas na Geomembrana de Lagoas de Lixiviado em Aterros  
Sanitários**

Rio de Janeiro

2024

Priscila Mendes Zidan

## **Formação de Bolhas na Geomembrana de Lagoas de Lixiviado em Aterros Sanitários**



Tese de Doutorado apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental-Diagnóstico, Monitoramento e Modelagem Ambiental.

Orientadora: Prof. <sup>a</sup> DSc. Elisabeth Ritter

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

Z64	Zidan, Priscila Mendes. Formação de bolhas na geomembrana de lagoas de lixiviado em aterros sanitários / Priscila Mendes Zidan. – 2024. 219 f.  Orientadora: Elisabeth Ritter. Tese (Doutorado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.  1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Aterro sanitário - Lixiviação - Teses. 3. Solos - Poluição - Teses. 4. Geossintéticos - Teses. I. Ritter, Elisabeth. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.  CDU 628.472.3
-----	--

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Priscila Mendes Zidan

## **Formação de Bolhas na Geomembrana de Lagoas de Lixiviado em Aterros Sanitários**

Tese de Doutorado apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental-Diagnóstico, Monitoramento e Modelagem Ambiental.

Aprovada em: 12 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

---

DSc. Elisabeth Ritter (Orientadora)

Faculdade de Engenharia - UERJ

---

PhD. Ennio Palmeira

Universidade de Brasília - UNB

---

DSc. Cícero Antônio Antunes Catapreta

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC-MG

---

DSc. Jefferson Lins

Universidade de São Paulo - USP

---

DSc. Bianca Ramalho Quintaes

Companhia Municipal de Limpeza Urbana - COMLURB – RJ

---

DSc. Camille Ferreira Mannarino

Faculdade de Engenharia - UERJ

Rio de Janeiro

2024

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus filhos, Eduardo e Ravi, com o amor incondicional e gratuito que a maternidade me permitiu experimentar. Ao amor da minha vida e companheiro das melhores aventuras, Luiz Paulo, por ter aceitado viver mais esta aventura comigo. Aos meus pais, por se fazerem presença e por vibrarem comigo em todos os projetos. Aos meus avós e bisavós, pelas sólidas famílias que constituíram e pelos valores que passaram de geração em geração e que hoje se consolidam na conclusão desta minha etapa de formação.

## AGRADECIMENTOS

Aos Luiz Paulo, Ravi e Eduardo pela compreensão nos muitos momentos de ausência ao longo deste período.

Aos meus pais, irmãs e sogra, pela torcida e apoio em casa nos períodos de trabalhos de campo e escrita.

À minha querida orientadora, pela amizade, incentivo, compreensão e presença.

À Rose, por me apoiar todos os dias em casa e por possibilitar que minha vida seja mais organizada.

À Raquel Simões, por ter compreendido a relevância deste estudo e ter possibilitado a apresentação da proposta de estudo em Gramacho.

Ao Vinícius Santos Freitas, da Statled, por ter autorizado a realização dos experimentos em Gramacho que foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa. Ao Anderson e sua equipe por terem me apoiado nas atividades de campo.

À Comlurb, em especial ao Eng. Elias e Sr. Amilton, por ter autorizado o desenvolvimento dos experimentos.

Ao Márcio, Leonardo, Arthur e Luiz Paulo pela participação ativa nos trabalhos de campo em Gramacho.

À LLSI, em especial ao Matthew Kemnitz, pela parceria desde 2015.

Ao Arthur Fernandes pela parceria nos trabalhos de campo e apoio total nos experimentos desenvolvido no Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental da UERJ. Pelo apoio nas revisões, trocas de ideias e disponibilidade para ajudar sempre.

Aos companheiros de jornada, Layla, Clayton e Carol pelo apoio nas revisões e trocas de informações.

A toda a equipe da JF Topografia que realizou o levantamento topográfico e preparou os desenhos com muito capricho.

Ao Galdino e Rai do Laboratório de Mecânica dos Solos da UERJ, pela parceria no desenvolvimento dos ensaios de caracterização do solo e no apoio e esclarecimento de dúvidas.

Ao Prof. Jefferson Lins e ao Clever do Laboratório de Geossintéticos da USP-São Carlos pela parceria na realização dos ensaios com as amostras de geomembranas.

Ao Vinícius Pellici, Leonardo Previti e ao Instituto Mauá de Tecnologia pela parceria na realização dos ensaios de caracterização do geotêxtil e imagens do DSX-1000, equipamento adquirido através do Processo Fapesp número 2023/14365-2.

À engenheira Indiara Giugni, pela disponibilidade em compartilhar experiências vividas e relacionadas às propriedades das geomembranas.

## RESUMO

ZIDAN, P. M. *Formação de bolhas na geomembrana de lagoas de lixiviado em aterros sanitários*. 2024. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

As lagoas com geomembrana (GM) de PEAD são essenciais no armazenamento e tratamento de lixiviado dos aterros sanitários. O sistema de barreiras destes reservatórios, tem a função de impedir o vazamento do efluente. Entretanto, falhas na instalação e/ou operação da lagoa podem ocasionar furos na GM e, por consequência o vazamento do lixiviado. O contato deste efluente com o solo pode resultar na formação de biogás e a consequente formação de bolhas na lagoa. O presente estudo inspecionou a GM de duas lagoas de lixiviado do Aterro Metropolitano de Gramacho (lagoa de montante e sul), analisou o lixiviado, caracterizou as bolhas presentes na lagoa de montante e, para este reservatório avaliou as propriedades dos geossintéticos empregados, caracterizou furos encontrados e o solo abaixo da GM. Os resultados das inspeções nas duas lagoas indicaram 9 furos em cada uma delas. Na lagoa sul todos os furos estavam na base e na lagoa de montante havia oito na base (região das bolhas) e um no talude. Com exceção do furo no talude, todos os demais furos foram decorrentes do processo de instalação da GM. Amostras de solo coletadas abaixo da GM apresentaram concentrações de nitrogênio amoniacal, cloreto, condutividade, sódio e potássio muito acima dos valores encontrados no solo local, caracterizando a contaminação por lixiviado. O estudo concluiu que a causa da formação das bolhas foi a existência dos furos na GM decorrentes da instalação da lagoa. Os impactos associados à ocorrência das bolhas foram o aumento da área de vazamento do lixiviado em relação ao tamanho do furo inicial, a contaminação do solo e a exposição da GM à condição de tensão por longo período e a fatores como elevadas temperaturas e radiação UV, os quais estão associados ao envelhecimento precoce do geossintético. Foram recomendados: definição de requisitos normativos no país estabelecendo sistema de barreiras compatível com risco de lagoas de lixiviado, a definição da taxa máxima permitida de vazamento para comissionamento e operação das lagoas e a obrigatoriedade de realização da inspeção pelo método dipolo após instalação e durante operação dos reservatórios. A implantação destas recomendações está alinhada com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável 3, 6, 11 e 14.

Palavras-chave: Geomembranas; Lagoas de lixiviado; Vazamentos; Bolhas; Método dipolo.

## ABSTRACT

ZIDAN, P. M. *Geomembrane bubbles in landfill leachate-lined ponds*. 2024. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Lagoons with HDPE geomembranes (GM) are essential for the storage and treatment of leachate from sanitary landfills. The barrier system of these reservoirs serves to prevent the leakage of the effluent. However, failures in the installation and/or operation of the lagoon can cause holes in the GM, resulting in leachate leakage. The contact of this effluent with the soil can lead to the formation of biogas and the subsequent formation of bubbles in the lagoon. This study inspected the GM of two leachate lagoons at the Aterro Metropolitano de Gramacho (upstream and south lagoons), analyzed the leachate, characterized the bubbles present in the upstream lagoon, and for this reservoir, assessed the properties of the geosynthetics used, characterized the holes found, and examined the soil beneath the GM. The results from the inspections of the two lagoons indicated nine holes in each of them. In the south lagoon, all holes were located at the base, while in the upstream lagoon, eight were at the base (bubble region) and one on the slope. With the exception of the hole on the slope, all other holes were due to the installation process of the GM. Soil samples collected below the GM showed concentrations of ammoniacal nitrogen, chloride, conductivity, sodium, and potassium much higher than the values found in the local soil, indicating contamination by leachate. The study concluded that the cause of the bubble formation was the presence of holes in the GM resulting from the lagoon's installation process. The impacts associated with the occurrence of bubbles were the increased area of leachate leakage relative to the size of the initial hole, soil contamination, and the exposure of the GM to stress conditions for prolonged periods, as well as factors such as high temperatures and UV radiation, which are associated with the premature aging of the geosynthetic material. Recommendations included: the definition of normative requirements in the country, establishing a barrier system compatible with the risk of leachate lagoons; the definition of the maximum action leakage rate for commissioning and operation of lagoons; and the mandatory inspection using the dipole method after installation and during the operation of the reservoirs. The implementation of these recommendations aligns with the Sustainable Development Goals (SDGs) 3, 6, 11, and 14.

Keywords: Geomembrane; Leachate ponds; Leaks; Air bubble (whale); Dipole method.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Situação da disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, em percentual de peso e por tipo de unidade entre os anos de 2010 e 2019.....	28
Figura 2 - Situação da disposição final de resíduos sólidos urbanos nos municípios brasileiros no ano de 2021.....	29
Figura 3 - Comparação dos resultados do tipo de disposição final de resíduos sólidos urbanos, em percentual de peso, segundo ABRELPE (2022) e SINISA (2022). ....	30
Figura 4 - Situação da disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU), em percentual de peso, em 2024, nas cinco regiões do Brasil.....	31
Figura 5 - Alternativas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos nos países europeus em 2022.....	32
Figura 6 - Lagoa de lixiviado típicas dos aterros sanitários brasileiros.....	36
Figura 7- Projeto de reservatório com dupla camada de GM e sistema de detecção de vazamentos para contenção de efluentes em que o vazamento mínimo não pode ser tolerado. ....	38
Figura 8 - Segmentação do mercado global de geossintéticos em função da receita, por tipo de produto para o ano de 2022 e projeção para 2032.....	42
Figura 9 - Expectativa de crescimento do mercado global de GMs 2018-2025.....	42
Figura 10 – Imagem de falha por stress cracking, em geomembrana instalada em um talude sob o qual havia solo compactado com presença de pedregulhos de pequena dimensão. ....	47
Figura 11 - Estrutura de qualidade em projetos.....	50
Figura 12 - Linha do tempo do surgimento de requisitos de controle e garantia da qualidade em reservatórios impermeabilizados com geomembrana nos Estados Unidos. ....	52
Figura 13 - Diagrama esquemático do princípio dos métodos geoeletricos.....	53
Figura 14 - Diagrama esquemático dos métodos geoeletricos para inspeção em GMs. ....	53
Figura 15 - Representação da aplicação do método dipolo em reservatório com líquido.....	54
Figura 16 - Imagens da aplicação do método dipolo em reservatórios impermeabilizados com GM na condição de nível raso (a) e alto (b) do líquido.....	55
Figura 17 - Imagens de furos identificados na GM de lagoas vazias, pela aplicação de método geoeletrico em GM exposta. (a) lagoa com 8 furos e (b) lagoa com 70 furos. ....	56
Figura 18 - Ocorrências de furos em GM instalada e coberta com solo. ....	57

Figura 19 - Imagens de furos em GM após aplicação do solo de proteção, utilizando-se o método dipolo: (a) falha em solda, (b) corte com estilete, (c) punção por rocha e (d) dano causado por estaca. ....	58
Figura 20 - Distribuição dos resultados de vazamentos/10.000 m <sup>2</sup> pela área inspecionada dos projetos avaliados entre 2015-2021 (n=195) e por LAINE; MIKLAS (1989) (n=14). Dados obtidos pelo método dipolo aplicado em lagoas com GM em nível alto do líquido armazenado. ....	60
Figura 21 - Intervalo de confiança de 95% da média de vazamentos/10.000 m <sup>2</sup> para as inspeções realizadas entre 2015-2021 (n=195) e dos de LAINE; MIKLAS (n=14). ....	61
Figura 22 - Histograma com o número de projetos inspecionados (n=195) distribuídos em cinco faixas de vazamentos/10.000 m <sup>2</sup> : 0-2; >2-5; >5-10; >10-20 e >20. Resultados da aplicação do método dipolo, entre 2015 e 2021, em lagoas com GM e nível alto de líquido. ....	62
Figura 23 – Diagrama esquemático apresentando uma ruga formada na geomembrana e o fluxo de lixiviado que pode ocorrer entre ela e a camada inferior à geomembrana. ....	64
Figura 24 - Imagem de lagoa impermeabilizada por GM com formação de bolhas acima do nível do líquido. ....	65
Figura 25 - Estágio inicial do processo de formação da bolha. ....	65
Figura 26 - Estágio avançado do processo de formação da bolha. ....	66
Figura 27 – Imagem evidenciando a presença de bolhas em lagoa impermeabilizada com geomembrana. ....	67
Figura 28 - Variação da altura da bolha (H) em função da altura do líquido externo à mesma (H <sub>w</sub> ), considerando diferentes volumes de líquido percolado V <sub>1</sub> pelo furo da GM. ....	69
Figura 29 - Variação da largura da bolha (B) em função da altura do líquido externo à mesma (H <sub>w</sub> ), considerando diferentes volumes de líquido percolado (V <sub>1</sub> ) pelo furo da GM. ....	70
Figura 30 - Imagem aérea do Aterro Metropolitano de Gramacho (AMG) destacando os corpos hídricos que o cercam: rios Sarapuí e Iguaçú e a Baía de Guanabara. ....	73
Figura 31 - Imagens do AMG nos anos de (a) 1980 e (b) 1995, antes da implantação de medidas para controle da área, implantadas em 1996 pela COMLURB. ....	74
Figura 32 - Imagem aérea do AMG. ....	74
Figura 33 - Imagem do AMG com a localização das lagoas de armazenamento de lixiviado. ....	75
Figura 34 - Extrato da Estrutura Analítica de Projeto (EAP) referente à metodologia desta pesquisa. ....	76
Figura 35 - Visão geral das atividades desenvolvidas na etapa I dos estudos. ....	77
Figura 36 - Imagens do levantamento das dimensões das bolhas. ....	78

Figura 37 – Imagem do detector e da sonda de nível alto. ....	79
Figura 38 – Imagem do eletrodo instalado no solo abaixo da GM.....	80
Figura 39 – Imagens que evidenciam: (a) boia em nível de lixiviado operacional e (b) boia com nível de lixiviado rebaixado na LM, mostrando que a mesma estava presa ao fundo por um fio de nylon preso a um pedregulho existente na base da lagoa. ....	80
Figura 40 - Inspeção na LS aplicando método dipolo com sonda para medição em nível raso. ....	81
Figura 41 - Imagem aérea da LM com indicação dos pontos de montante e jusante da lagoa.	82
Figura 42 - Imagens das inspeções na LM com equipamento para nível raso (a) e (b) e nível alto (c) e (d) de líquido. ....	83
Figura 43 - Imagem aérea da LM com indicação do grid definido para varredura pelo método dipolo nos trechos em que a lagoa estava com nível alto. ....	84
Figura 44 - Imagem da LM com a indicação dos pontos de coleta das amostras de solo compactado.....	84
Figura 45 - Imagem do ponto de coleta do solo compactado empregado no sistema de barreiras da LM. ....	85
Figura 46 - Imagens das amostras de lixiviados das lagoas: (a) de montante e (b) sul.....	86
Figura 47 - Imagens que evidenciam: (a) o local de coleta da GM da LM e (b) uma amostra já coletada da GM e com a devida identificação. ....	87
Figura 48 - Visão geral das atividades desenvolvidas na etapa II dos estudos. ....	88
Figura 49 - Imagens da região das bolhas da LM após o rebaixamento do nível do lixiviado: (a) face direita da região das bolhas e (b) face esquerda da região das bolhas. ....	89
Figura 50 - Imagens do levantamento planimétrico da região das bolhas, desenvolvido durante o processo de rebaixamento do nível de lixiviado na LM: (a) mostra levantamento em cima da bolha e (b) apresenta etapa do levantamento da base da LM.....	90
Figura 51 - Imagens do local de coleta das amostras de geotêxtil retiradas na LM: (a) na base da lagoa e (c) em cima da bolha 5. A amostra coletada na base da lagoa está representada em (b) e amostra retirada de cima da bolha, em (d). ....	92
Figura 52 - Imagens do amostrador empregado para a coleta do solo abaixo da GM com a indicação da funcionalidade de cada um de seus componentes. ....	93
Figura 53 - Imagens do momento da coleta de duas das amostras de solo abaixo da GM da LM utilizando o amostrador desenvolvido com tubo de PVC: (a) coleta na base da lagoa e (b) coleta no talude. ....	94

Figura 54 - Imagem da LM com a indicação dos pontos de coleta das amostras de solo do talude externo, utilizadas como background. ....	95
Figura 55 - Imagem do Google Earth na área do AMG em dois momentos: (a) agosto/2012 e (b) maio/2023. ....	97
Figura 56 – Perfil transversal do sistema de barreiras e seus componentes na lagoa Sul. ....	99
Figura 57 - Imagens da LS: (a) face oposta do acesso ao AMG e (b) mesma face da entrada ao AMG. ....	99
Figura 58 - Imagens aéreas extraídas do Google Earth Pro da área da LS: (a) em julho/2016, durante a construção da lagoa; (b) outubro/2016, lagoa com lixiviado. ....	100
Figura 59 - Perfil transversal do sistema de barreiras e seus componentes na Lagoa de Montante. ....	100
Figura 60 – Imagem aérea da lagoa de montante (LM) evidenciando suas dimensões longitudinal e transversal. ....	101
Figura 62 – Imagens da região de jusante (a) e de montante (b) da LM que evidenciam a diferença no nível de lixiviado, tendo como referência a maior e menor exposição do talude. ....	102
Figura 63 - Imagem da LM evidenciando a presença das bolhas com destaque para a superfície exposta de uma das bolhas, a qual apresenta geotêxtil e pedregulhos. ....	104
Figura 64 - Imagens aéreas extraídas do Google Earth Pro da área da LM: (a) em janeiro/2010; (b) abril/2011; (c) julho/2011; (d) maio/2013; (e) janeiro/2014 e (f) maio/2023. ....	105
Figura 65 - Imagem das bolhas identificadas na LM do AMG. ....	107
Figura 66 - Imagens das bolhas presentes na LM em três condições diferentes do nível de lixiviado: (a) nível operacional inicial; (b) nível reduzido de líquido e (c) nível mínimo de lixiviado que foi possível atingir neste estudo. ....	108
Figura 67 - Imagens que evidenciam a diferença na pressão interna das bolhas nas duas condições de nível do lixiviado na lagoa: (a) nível operacional com operador com cerca de 70 kg em cima da bolha 5 (ago/23); (b) nível reduzido de líquido com operador com cerca de 70 kg em cima da bolha 2 (jun/24). ....	109
Figura 68 – Cortes da planta do levantamento planialtimétrico feito nos taludes e bordas da lagoa de montante com o posicionamento das três maiores bolhas identificadas. ....	110
Figura 69 - Imagem do levantamento planialtimétrico das bolhas correlacionado com o cadastramento inicial das mesmas identificadas na LM. ....	112

Figura 70 –Resultados de altimetria dos perfis transversal (a) e longitudinal (b) para a bolha 6 nas duas condições de nível de lixiviado: alto e baixo. Levantamento na LM em junho/2024. ....	113
Figura 71 - Imagem aérea da LS com a identificação aproximada dos pontos com sinais de vazamento na GM coberta com lixiviado. Localização dos pontos por associação às marcações nas bordas da LS.....	114
Figura 72 - Imagens com indicação das linhas onde os pontos de vazamento foram localizados na LS: (a) 1 (linha 120); (b) 2 (linha 5); (c) 3, 4 e 5 (linha 0) e (d) 6 (identificado visualmente e posicionado acima do nível do líquido).....	115
Figura 73 - Imagem aérea da LM com a identificação dos pontos onde foram registrados sinais de vazamento na GM coberta com lixiviado. ....	116
Figura 74 - Imagem da LM com a indicação dos vazamentos: (a) cinco pontos registrados na base da GM coberta com lixiviado (vazamentos 1-5); (b) dois pontos registrados também na base da GM coberta com lixiviado (vazamentos 6 e 7) e (c) um ponto de furo no talude da lagoa (vazamento 8) (imagem após redução do nível de lixiviado).....	118
Figura 75 - Imagens da LM, região das bolhas, que evidenciam a diferença de nível de lixiviado em dois momentos do trabalho de campo: (a) na realização do levantamento planialtimétrico, (nível de lixiviado reduzido em relação à condição operacional) e (b) na abertura dos pontos de vazamento e coleta de solo abaixo da GM. ....	119
Figura 76 - Imagem esquemática que compara os resultados da inspeção pelo método dipolo (ago/23) com os do levantamento planialtimétrico da LM (jun/24) em relação aos pontos de vazamento. Imagem da esquerda com a indicação esquemática (não georreferenciada) dos pontos de vazamento. ....	120
Figura 77 - Imagem de um dos pontos de vazamento cadastrados pela topografia, indicando a presença da boia que foi utilizada durante a inspeção do método dipolo. A boia foi presa por uma pequena corda de nylon a um dos pedregulhos que cobriam o geotêxtil. ....	121
Figura 78 - Imagens que apresentam o furo (foto inferiores) identificado na GM da bolha 2 (foto superior) em local próximo a duas soldas (foto inferior direita) e posicionado abaixo do nível operacional de lixiviado na LM (condição evidenciada na foto superior). ....	122
Figura 79 - Mapa com a localização dos furos na geomembrana da LM.....	124
Figura 80 - Imagens e informações dos furos encontrados na geomembrana da LM: (a) furo 1 e (b) furo 2. ....	125
Figura 81 - Imagens e informações dos furos encontrados na geomembrana da LM: (a) furo 3 e (b) furo 4. ....	126

Figura 82 - Imagens e informações dos furos encontrados na geomembrana da LM: (a) furo 5 e (b) furo 6. ....	127
Figura 83 - Imagens e informações dos furos encontrados na geomembrana da LM: (a) furo 7 - com duas perfurações e (b) furo 8. ....	131
Figura 84 – Gráfico das concentrações de cloreto, DQO e nitrogênio amoniacal para as lagoas sul e de montante nas duas campanhas realizadas. ....	136
Figura 85 – Imagens que evidenciam as falhas no geotêxtil aplicado nos taludes (a) e na área das bolhas da lagoa de montante (b) e (c). ....	137
Figura 86 - Mapa com a localização dos pontos em que foram retiradas as amostras de geotêxtil de proteção da geomembrana da LM. ....	138
Figura 87 - Imagem das amostras de geotêxtil que foram coletadas: (a) amostra 1 – base sem furo; (b) amostra 2 – base com furo; (c) amostra 3 – bolha 2 e (d) amostra 4 – bolha 5. ....	140
Figura 88 – Imagem da GM que ficou protegida pela amostra um do geotêxtil, a que apresentou maior valor de massa por unidade de área entre as amostras avaliadas. ....	141
Figura 89 – Imagem de microscópio DSX-1000 de amostra: (a) G1 do geotêxtil (base da lagoa em local sem furo) e (b) G3 (região da bolha 2), ambas com aumento de 142 vezes. ....	142
Figura 90 - Imagem de microscópio DSX-1000 de amostra G4 do geotêxtil (região da bolha 5) com aumento de: (a) 712 e (b) 2.030 vezes. ....	142
Figura 91 - Imagem de microscópio DSX-1000 de amostra G2 do geotêxtil (base da lagoa com furo) com aumento de 142 vezes. ....	146
Figura 92 – Imagens que apresentam trincas identificadas no entorno da LM e próximas ao ponto de ancoragem da GM. ....	148
Figura 93 - Curvas granulométricas das amostras de solo compactado, posicionado abaixo da GM de PEAD da LM: (a) amostra 1 - ponto 97; (b) amostra 2 - ponto 128; (c) amostra 3 - ponto 85 e (d) amostra 4 - ponto 120. ....	151
Figura 94 – Curva de compactação da amostra de solo coletada no ponto 120 da ancoragem da GM da lagoa de montante. ....	152
Figura 95 – Relatório do ensaio de permeabilidade, desenvolvido com a amostra de solo coletada no ponto 120. ....	154
Figura 96 - Mapa com a localização dos pontos em que foram coletadas amostras do solo abaixo da geomembrana da LM. ....	155
Figura 97 – Imagens das amostras de solo compactado coletadas com amostrador introduzido nos furos da GM da LM: (a) e (b) amostras da base e (c) amostra coletada no talude. ....	156
Figura 98 – Imagem do momento da retirada de uma das amostras de solo do amostrador. .	157

Figura 99 – Resultados das análises de nitrogênio amoniacal e cloreto para as três amostras de solo coletadas em diferentes profundidades (entre 0-18cm) abaixo da GM da LM e para as amostras de background. ....	157
Figura 100 - Resultados das análises de sódio e potássio para as três amostras de solo coletadas em diferentes profundidades (entre 0-18cm) abaixo da GM da LM e para as amostras de background. ....	158
Figura 101 - Resultados das análises de condutividade para as três amostras de solo coletadas em diferentes profundidades (entre 0-18cm) abaixo da GM da LM e para as amostras de background. ....	165
Figura 102 - Recomendação para projeto de reservatório de efluentes em que o vazamento mínimo não pode ser tolerado. ....	165

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos lixiviados brasileiros. ....	34
Tabela 2 - Comparação entre ensaios propostos pela NBR 16.757-2 e GM-13.....	44
Tabela 3 - Composição do lixiviado do AMG. ....	75
Tabela 4 - Ensaios realizados com as amostras do solo abaixo da GM da LM.....	85
Tabela 5 - Ensaios de caracterização do lixiviado das lagoas sul e montante.....	86
Tabela 6 - Ensaios de caracterização da GM da LM.....	87
Tabela 7 – Parâmetros a serem avaliados no lixiviado do solo abaixo da GM da LM. ....	95
Tabela 8 - Resultados da caracterização das bolhas da LM. ....	106
Tabela 9 - Resultados do levantamento planialtimétrico da região das bolhas da LM. ....	110
Tabela 10 – Resultados do levantamento planialtimétrico do perfil das bolhas 2, 5 e 6.....	111
Tabela 11 – Dados cadastrais dos furos identificados na geomembrana da LM conforme referênciado na Figura 76. ....	122
Tabela 12 – Informações consolidadas sobre os furos localizados e causas prováveis na LM. ....	128
Tabela 13 - Resultados da caracterização do lixiviado das lagoas sul (LS) e de montante (LM) juntamente com faixa de variação dos mesmos parâmetros obtidos em estudos anteriores desenvolvidos com o lixiviado do AMG.....	130
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de massa por unidade de área nas amostras de geotêxtil de proteção da GM .....	139
Tabela 15 - Resultados da caracterização das amostras da GM e comparação com valores da norma GM-13 e com ROWE et al.(2003). ....	144
Tabela 16 - Composição do solo compactado abaixo da GM da LM. ....	150
Tabela 17 – Classificação do solo compactado abaixo da GM da LM. ....	150
Tabela 18 – Resultados dos ensaios com amostras do solo compactado que foi implantado abaixo da geomembrana da lagoa de montante e das amostras de background. ....	156

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Geossintéticos com aplicação em obras de engenharia.....	40
Quadro 2 - Proposição de requisitos a serem contemplados no PCGQ de obras de reservatórios de efluentes impermeabilizados com com geomembrana de PEAD e sugestão de evidências para demonstração do atendimento. ....	168
Quadro 3 - Ensaio propostos para avaliação da qualidade da geomembrana de PEAD.....	170

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>Sigla</b>	<b>Denominação</b>
ABRELPE	Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ABETRE	Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ALR	<i>Action, Leakage Rate</i> (taxa de vazamento aceitável)
AMG	Aterro Metropolitano de Gramacho
CCL	Camada de Solo Compactado
CGQ	Controle e Garantia da Qualidade
COMLURB	Companhia de Limpeza Urbana
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-graduação em Engenharia
COVID	<i>Corona Virus Disease</i>
CQ	Controle de Qualidade
CQC	Controle de Qualidade da Construção
CQF	Controle de Qualidade da Fabricação
CTR	Centro de Tratamento de Resíduos
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
EAP	Estrutura analítica de projeto
EPA	Agência Ambiental dos Estados Unidos
EUA	Estados Unidos
FGI	<i>Fabricated Geomembrane Institute</i>
GCL	Geocomposto bentonítico
GM	Geomembrana
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GQ	Garantia da Qualidade
GQC	Garantia da Qualidade da Construção

GQF	Garantia da Qualidade da Fabricação
GRI	<i>Geosynthetic Research Institute</i>
GT	Geotêxtil
HDPE	<i>high-density polyethylene</i>
HPOIT	<i>High Pressure Oxidative Induction Time</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IESA	Internacional Engenharia S.A
IGS	<i>International Geosynthetic Society</i>
IGS BRASIL	Associação Brasileira de Geossintéticos
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LM	Lagoa de montante
LOR	Licença de Operação e Recuperação
LS	Lagoa sul
LLSI	<i>Leak Location Service Inc.</i>
OIT	<i>Oxidative Induction Time</i>
PCGQ	Plano de Controle e Garantia da Qualidade
PEAD	Polietileno de alta densidade
pH	Potencial hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	Policloreto de vinila
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SELUR	Sindicato das Empresas de Limpeza Urbana
SELURB	Sindicato Nacional das Empresas de Limpeza Urbana
SINISA	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento básico
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
URE	Unidade de recuperação energética de resíduos
UV	Radiação ultravioleta

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	23
Considerações sobre o tema .....	23
Definição do problema e justificativa.....	24
Objetivos.....	25
Objetivo geral .....	25
Objetivos específicos.....	25
Estrutura da tese.....	25
<b>CAPÍTULO 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	27
1.1 Disposição final de resíduos .....	27
1.2 Lixiviado de aterros sanitários.....	32
1.3. Armazenamento de lixiviados .....	35
1.4. Projetos de lagoas de lixiviado .....	36
1.5. Geossintéticos.....	39
1.5.1 Definição, tipos e funções .....	39
1.5.2 Crescimento do mercado .....	41
1.5.3 Propriedades dos geossintéticos .....	43
1.6 Geomembrana de PEAD .....	44
1.6.1 Histórico e aplicações.....	44
1.6.2 Formulação, envelhecimento e vida útil.....	45
1.6.3 Requisitos de fabricação e instalação .....	47
1.6.4 Controle e garantia da qualidade da instalação .....	49
1.7 Métodos geoeletricos.....	51
1.8 Danos na geomembrana .....	55
1.8.1 Ocorrência de vazamentos em reservatórios .....	58
1.8.2 Considerações sobre reservatórios de lixiviados no Brasil .....	63
1.8.3 Transporte de contaminantes e rugas.....	63
1.9 Formação de bolhas em lagoas de lixiviado.....	64
1.9.1 O processo de formação das bolhas e possíveis causas.....	65
1.9.2 Consequências da formação das bolhas na lagoa .....	66
1.9.3 Propostas para evitar a ocorrência de bolhas e para realizar reparos temporários .....	68
1.9.4 Correlações para uso prático .....	68

1.9.5 Estudos de caso apresentados .....	71
1.10 Aterro Metropolitano de Gramacho (AMG) .....	72
<b>CAPÍTULO 2: METODOLOGIA .....</b>	<b>76</b>
2.1 Etapa I: estudos exploratórios.....	77
2.1.1 Caracterização das lagoas do AMG e levantamento do histórico de construção .....	77
2.1.2 Caracterização das bolhas existentes na lagoa de montante (LM) .....	78
2.1.3 Inspeção das lagoas do AMG pelo método dipolo .....	78
2.1.3.1 Lagoa sul (LS) .....	81
2.1.3.2 Lagoa de montante (LM).....	82
2.1.4 Coleta e caracterização do solo abaixo da LM .....	84
2.1.5 Coleta e caracterização do lixiviado das lagoa sul (LS) e de montante (LM).....	85
2.1.6 Coleta e caracterização da geomembrana de ancoragem da LM.....	86
2.2 Etapa II: estudos confirmatórios.....	88
2.2.1 Caracterização das bolhas da LM após o rebaixamento do nível do lixiviado.....	90
2.2.2 Caracterização dos furos identificados na GM da LM .....	91
2.2.3 Caracterização do geotêxtil de proteção da GM na base da lagoa e região das bolhas...	91
2.2.4 Caracterização do solo abaixo da GM.....	93
<b>CAPÍTULO 3: RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>96</b>
3.1 Caracterização das lagoas do AMG.....	96
3.2 Caracterização das lagoas sul (LS) e de montante (LM).....	98
3.2.1 Caracterização da lagoa sul (LS) .....	98
3.2.2 Histórico de construção da lagoa sul (LS).....	99
3.2.3 Caracterização da lagoa de montante (LM).....	100
3.2.4 Histórico de construção da LM e do surgimento das bolhas .....	103
3.3 Caracterização das bolhas da LM.....	105
3.3.1 Cadastro inicial das bolhas .....	105
3.3.2 Cadastro das bolhas após rebaixamento do nível do lixiviado.....	106
3.3.2.1 Levantamento planialtimétrico .....	108
3.3.2.2 Levantamento do perfil das bolhas .....	111
3.4 Inspeção das lagoas do AMG pelo método dipolo .....	113
3.4.1 Lagoa sul .....	113
3.4.2 Lagoa de montante.....	115
3.5 Caracterização dos furos identificados na LM .....	117
3.6 Caracterização do lixiviado das LS e LM .....	129

3.7 Avaliação qualitativa do vazamento de lixiviado na região das bolhas .....	133
3.8 Caracterização do geotêxtil de proteção da GM da LM .....	135
3.9 Caracterização da geomembrana da ancoragem da LM .....	143
3.10 Caracterização do solo abaixo da LM .....	147
3.10.1 Avaliação do solo original empregado abaixo da GM da LM .....	147
3.10.2 Avaliação do solo coletado abaixo dos furos identificados na GM da LM.....	154
3.11 Discussão sobre as causas da formação das bolhas na LM .....	160
3.12 Avaliação global dos impactos decorrentes da formação das bolhas na LM .....	162
<b>CAPÍTULO 4: RECOMENDAÇÕES PARA PROJETOS DE LAGOAS COM GEOMEMBRANA.....</b>	<b>164</b>
4.1 Avaliação dos riscos envolvidos .....	164
4.2 Projeto de engenharia .....	165
4.3 Plano de controle e garantia da qualidade da obra .....	167
4.4 Requisitos associados ao material .....	169
4.5 Requisitos associados à instalação .....	170
4.6 Métodos geoelétricos e a garantia da estanqueidade global .....	171
4.7 Monitoramento e controle no comissionamento e durante a operação .....	172
4.8 Ações de monitoramento e controle da operação nos reservatórios brasileiros .....	172
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....</b>	<b>173</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>175</b>
<b>ANEXO A: ESTRUTURA ANALÍTICA DO PROJETO.....</b>	<b>192</b>
<b>ANEXO B: Imagens de furos identificados em geomembrana coberta com solo (aplicação do método dipolo).....</b>	<b>193</b>
<b>ANEXO C: Artigo publicado na revista Geotextile and Geomembrane em abril/2024.....</b>	<b>197</b>
<b>ANEXO D: Artigo apresentado no Geoaméricas 2024 – Toronto/Canadá em maio/2024 ...</b>	<b>203</b>
<b>ANEXO E: Artigo apresentado no REGEO – Salvador/Brasil em julho/2023 .....</b>	<b>212</b>

## INTRODUÇÃO

### Considerações sobre o tema

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), definiu objetivos e metas a serem atendidos pelos municípios para a adequada gestão dos resíduos<sup>1</sup>. Um dos grandes desafios para o país, após catorze anos do estabelecimento deste documento, ainda é o encerramento dos lixões e a implantação de aterros sanitários com capacidade para dispor a totalidade de rejeitos<sup>2</sup> gerados pela população brasileira.

Segundo a norma NBR 8.419 (ABNT, 1992), o aterro sanitário é o empreendimento construído para a destinação final dos resíduos sólidos urbanos sobre o solo, utilizando técnicas e tecnologia apropriada para que não sejam causados danos à saúde pública e se minimizem os impactos ambientais. O sistema de impermeabilização, empregado nos aterros sanitários é uma importante ferramenta para minimizar a contaminação do solo e a migração dos poluentes pelas águas subterrâneas. Tal sistema deve ser utilizado na área de disposição de rejeito e nas lagoas de armazenamento temporário e tratamento de lixiviados.

O uso de geomembranas (GMs) de polietileno de alta densidade (PEAD) com a função de barreira em lagoas de lixiviado é crescente, sendo recomendado como uma solução ambientalmente adequada e exigida pelos órgãos ambientais no licenciamento dos aterros sanitários. Entretanto, adoção da GM como barreira para estes reservatórios não representa garantia de estanqueidade, já que danos ocorrem no armazenamento e instalação do geossintético (Mc. DANIEL et al., 2019). Segundo GIROUD (2016), os resultados da aplicação dos métodos geométricos em 150 projetos, envolvendo 2.500.000 m<sup>2</sup> de área de GM instalada com procedimentos de controle de qualidade, evidenciaram de 5 a 6 furos/10.000 m<sup>2</sup> do geossintético. Quando tais procedimentos não foram empregados, o número de furos chegou a mais de 25/10.000 m<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS (Brasil, 2010), os resíduos sólidos são “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.”

<sup>2</sup> Segundo a PNRS (Brasil, 2010), rejeitos são “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.”

## Definição do problema e justificativa

Diversos autores têm relatado que na prática é muito difícil garantir que não existam furos na GM após sua instalação (PEGGS, 2009; ROWE, 2011). Neste sentido, THIEL; GIROUD (2011) ressaltaram a importância dos projetos de engenharia considerarem a possibilidade de vazamento e estabelecerem medidas de monitoramento e controle da integridade do sistema de impermeabilização visando mitigar o risco. No Brasil, os projetos de reservatórios de lixiviado não contemplam sistemas para monitoramento e controle da integridade da GM. Além disso, após a instalação do geossintético e depois de algum tempo de uso, a avaliação da integridade da geomembrana não é uma prática adotada (ZIDAN;FRIGO, 2016). A última revisão da norma NBR 16.199 – Barreiras Geossintéticas – Instalação de Geomembranas Poliméricas (ABNT, 2020a) incluiu a recomendação do uso dos métodos geoeletricos para verificação da estanqueidade global das obras do tipo I (aquelas em que falhas nas barreiras causam danos ambientais).

Alguns autores têm relatado um problema operacional muito frequente nas lagoas com GM (PEGGS, 2022 a, b; KOERNER et.al., 2015; KOERNER et al., 2014; GASSNER, 2017; THIEL, 2016). Trata-se do descolamento do geossintético de seu contato com o solo, formando uma bolha de gás (chamada também de “*whales*” ou “*hippos*”) que submerge sob o líquido armazenado (GUO et al., 2016). Nesta situação, além do prejuízo operacional decorrente da minimização do espaço útil da lagoa, a geomembrana ficará submetida a tensões não previstas em projeto. Segundo MARTA (2022), a formação das bolhas acontece devido à pressão de um fluido existente embaixo da GM, o qual pode ser um gás decorrente da biodegradação de matéria orgânica presente no solo, ou ser um líquido oriundo de vazamento pela GM. Nestes casos, a presença da bolha pode aumentar a taxa de vazamento pela geomembrana e quanto maior for o tempo decorrido até o reparo do problema, mais significativos serão os danos ambientais associados.

Neste sentido, a relevância da presente pesquisa está associada ao intensivo uso da GM em lagoas e reservatórios de efluentes, à alta frequência de furos na GM, mencionada na literatura, à restrita disponibilidade de dados estatísticos de furos em reservatórios com efluentes, à inexistência de registro das ocorrências de bolhas em lagoas de lixiviados no Brasil e à ausência de dados que caracterizem os impactos reais decorrentes da formação das bolhas.

## **Objetivos**

### Objetivo geral

Analisar as causas e os impactos da formação de bolhas na geomembrana de lagoas de lixiviado de aterros sanitários, tendo como base o caso das lagoas do Aterro Metropolitano de Gramacho (AMG), em Duque de Caxias, Rio de Janeiro.

### Objetivos específicos

- ✓ Realizar inspeções nas lagoas do AMG, aplicando o método dipolo, e comparar os resultados obtidos com os dados disponíveis na literatura;
- ✓ Caracterizar as bolhas presentes na geomembrana da Lagoa de Montante (LM), localizada no AMG e levantar histórico de formação.
- ✓ Identificar as possíveis causas da formação das bolhas na LM, localizada no AMG;
- ✓ Avaliar os impactos operacionais e ambientais decorrentes da formação das bolhas na LM;
- ✓ Propor recomendações para futuros projetos de lagoas de lixiviado de modo a minimizar a ocorrência de bolhas na geomembrana e os impactos ambientais associados às mesmas;
- ✓ Propor procedimentos para minimizar ocorrência de bolhas nos reservatórios de lixiviado.

## **Estrutura da tese**

A tese está estruturada em seis capítulos. O presente capítulo traz considerações iniciais sobre o tema, define o problema e a justificativa, bem como os objetivos gerais e específicos identificados. O primeiro capítulo apresenta a revisão bibliográfica, com destaque para informações sobre a geomembrana, os métodos geolétricos, dados sobre a ocorrência de vazamentos em reservatórios e sobre as bolhas. O segundo capítulo aborda a metodologia adotada nos trabalhos de campo, desenvolvidos no AMG, e os métodos dos ensaios desenvolvidos nos laboratórios. Os resultados obtidos e as

discussões referentes aos mesmos estão descritos no terceiro capítulo. As recomendações para projetos de instalação de geomembranas em reservatórios de efluentes estão apresentados no quarto capítulo. As conclusões e sugestões para pesquisas futuras seguem descritas no quinto capítulo.

## CAPÍTULO 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 Disposição final de resíduos

Segundo a PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), a disposição final ambientalmente adequada é a distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. O mesmo documento, em seu artigo 47, estabeleceu a proibição da disposição de rejeitos em praias e demais corpos hídricos e a queima ou lançamento *in natura* a céu aberto.

Segundo a norma NBR 8.419 (ABNT, 1992), o aterro sanitário é o empreendimento construído para a destinação final dos resíduos sólidos urbanos no solo, utilizando técnicas e tecnologia apropriada para que não sejam causados danos à saúde pública e se minimizem os impactos ambientais. O lixão é uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos, que se caracteriza pela simples descarga do lixo sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública (IPT, 1995). Os aterros controlados foram lixões no passado e receberam algumas medidas de controle visando a minimização do impacto ao meio ambiente. São considerados como uma forma inadequada de destinação final de resíduos. Apesar disso, ainda é possível se encontrar no Brasil alguns exemplos de aterros controlados que receberam licença ambiental com vistas à sua operação e recuperação<sup>3</sup> (LOR), como é o caso do Aterro de Saquarema, localizado no Estado do Rio de Janeiro (SAQUAREMA, 2023).

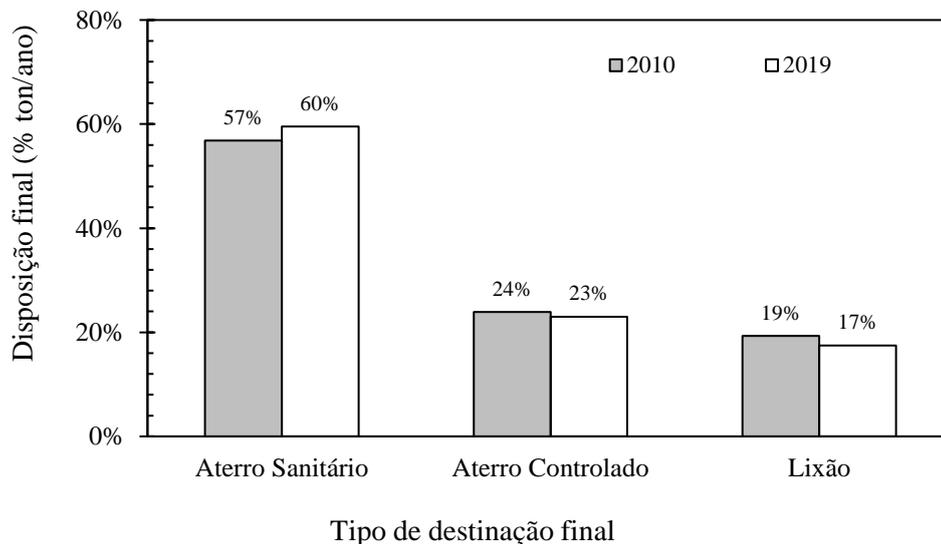
No ano de 2020, a ABRELPE (Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), que anualmente divulgava os percentuais de disposição final de resíduos, elaborou uma edição especial, durante a pandemia da COVID comparando os dados de 2010 e 2019. O objetivo deste documento era avaliar os avanços nesta atividade após nove anos da promulgação da PNRS. Os dados divulgados mostraram que à época da formalização desta PNRS, em 2010, aproximadamente 57 % do total de resíduos coletados por ano, cerca de 33 milhões de toneladas, eram destinados em aterros sanitários (ABRELPE, 2020). As 25 milhões de toneladas

---

<sup>3</sup> Ato administrativo mediante o qual o órgão ambiental autoriza a operação da atividade ou empreendimento concomitante à recuperação ambiental de áreas contaminadas (RIO DE JANEIRO, 2014). Este tipo de instrumento de licenciamento, empregado no estado do Rio de Janeiro, também está previsto de outros estados como Bahia (BAHIA, 2012) e Acre (ACRE, 2010), a denominada Licença de Regularização (LR).

restantes eram destinadas em aterros controlados ou lixões. Após 9 anos da publicação da PNRS, em 2019, o percentual de destinação adequada de rejeitos aumentou apenas 2,7%, representando que 43 milhões de toneladas de rejeitos foram destinados neste ano em aterros sanitários. Paralelamente, cerca de 29,4 milhões de toneladas de rejeitos foram dispostas em lixões ou aterros controlados neste mesmo ano, como indicado na Figura 1. Estes dados mostram que houve pouco avanço no sentido do atendimento às diretrizes da PNRS quanto à implantação da disposição final ambientalmente adequada para os rejeitos coletados no país.

Figura 1- Situação da disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, em percentual de peso e por tipo de unidade entre os anos de 2010 e 2019.

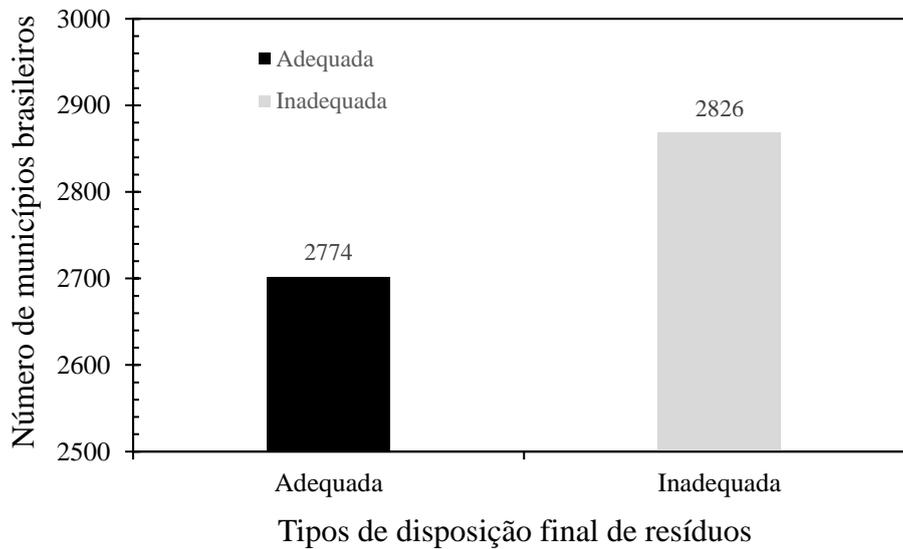


Fonte: adaptado de ABRELPE, 2020.

Quando se avaliam os dados referentes ao tipo de destinação final de resíduos adotada pelos municípios brasileiros, o cenário parece ainda mais distante do atendimento às diretrizes da PNRS, como pode ser observado na Figura 2. No ano de 2020, apenas 48,5% do municípios brasileiros, ou seja 2.702 de um total de 5.570, adotavam soluções adequadas para a destinação final de seus resíduos sólidos urbanos. Este resultado parece, em um primeiro momento contradizer o gráfico da Figura 1, mas na verdade representa os muitos municípios pequenos do país que não possuem estrutura capaz de implantar uma solução adequada de destinação final. Muitas vezes estes municípios não possuem sequer um corpo

técnico capacitado para propor soluções que representem menores impactos na gestão dos resíduos sólidos gerados.

Figura 2 - Situação da disposição final de resíduos sólidos urbanos nos municípios brasileiros no ano de 2021.

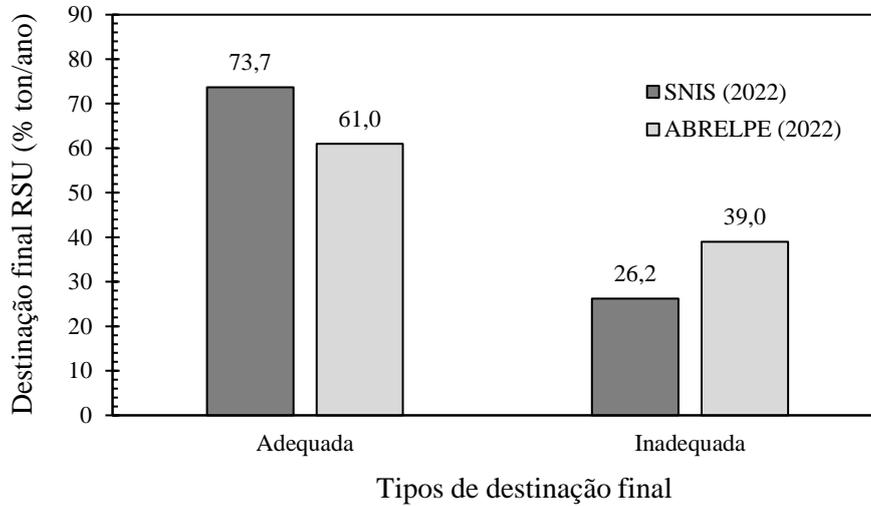


Fonte: adaptado de ABRELPE, 2022.

Os dados divulgados pela ABRELPE (2022), Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, utilizaram como base uma amostra de cerca de 450 municípios brasileiros. O mesmo estudo utiliza-se dos dados de população oriundos do censo do IBGE para estimar a geração de resíduos. Considerando um universo de 5.570 municípios no país, a amostragem feita pela ABRELPE representa cerca de 8% do total.

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico (SINISA) divulga os percentuais de disposição final de resíduos no país desde 2014. A metodologia adotada, neste caso é diferente porque se baseia no levantamento de informações com uma base amostral maior. No ano de 2022, por exemplo, 5.060 municípios (90,8% do total do país) integraram a pesquisa do SINISA. Uma comparação entre os resultados divulgados pela ABRELPE e SINISA para o ano de 2022 com relação à destinação final de resíduos sólidos urbanos no país está apresentada na Figura 3. Os dados dos dois estudos divergem, sendo que o cenário apresentado pelo SINISA apresenta um pouco mais favorável sob o ponto de vista ambiental.

Figura 3 - Comparação dos resultados do tipo de disposição final de resíduos sólidos urbanos, em percentual de peso, segundo ABRELPE (2022) e SINISA (2022).

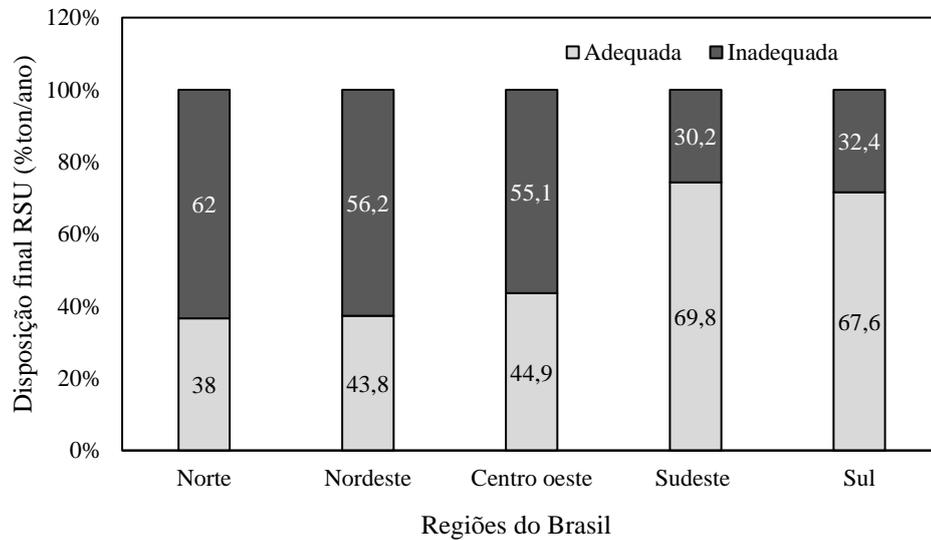


Fonte: adaptado de SINISA, 2022 e ABRELPE, 2022.

No ano de 2024 a ABREMA, Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, divulgou seu segundo relatório com dados referentes aos resíduos sólidos no país. Esta associação resultou da unificação de quatro entidades que representavam as empresas de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos no Brasil: ABETRE (Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos), ABRELPE, SELUR (Sindicato das Empresas de Limpeza Urbana) e SELURB (Sindicato Nacional das Empresas de Limpeza Urbana) (ABREMA, 2024).

O estudo divulgado pela ABREMA (2024) atualizou os dados divulgados em 2023 e considerou o volume de resíduos enviados para a disposição final e não mais aqueles coletados. Os dados que estão apresentados na Figura 4, mostram a situação da disposição adequada e inadequada nas cinco regiões brasileiras. Esses resultados mostram grande diferença na situação das regiões no que se refere às condições da disposição final dos resíduos sólidos urbanos. Enquanto no Sul e Sudeste, mais de 65% dos rejeitos coletados são dispostos em aterros sanitários, no Norte, Nordeste e Centro-Oeste, este percentual ficou em torno de 38-44% no mesmo ano. Tais resultados mostram que há muito a ser feito no país e, em especial nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, para o atendimento à PNRS no que tange à disposição final ambientalmente adequada.

Figura 4 - Situação da disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU), em percentual de peso, em 2024, nas cinco regiões do Brasil.

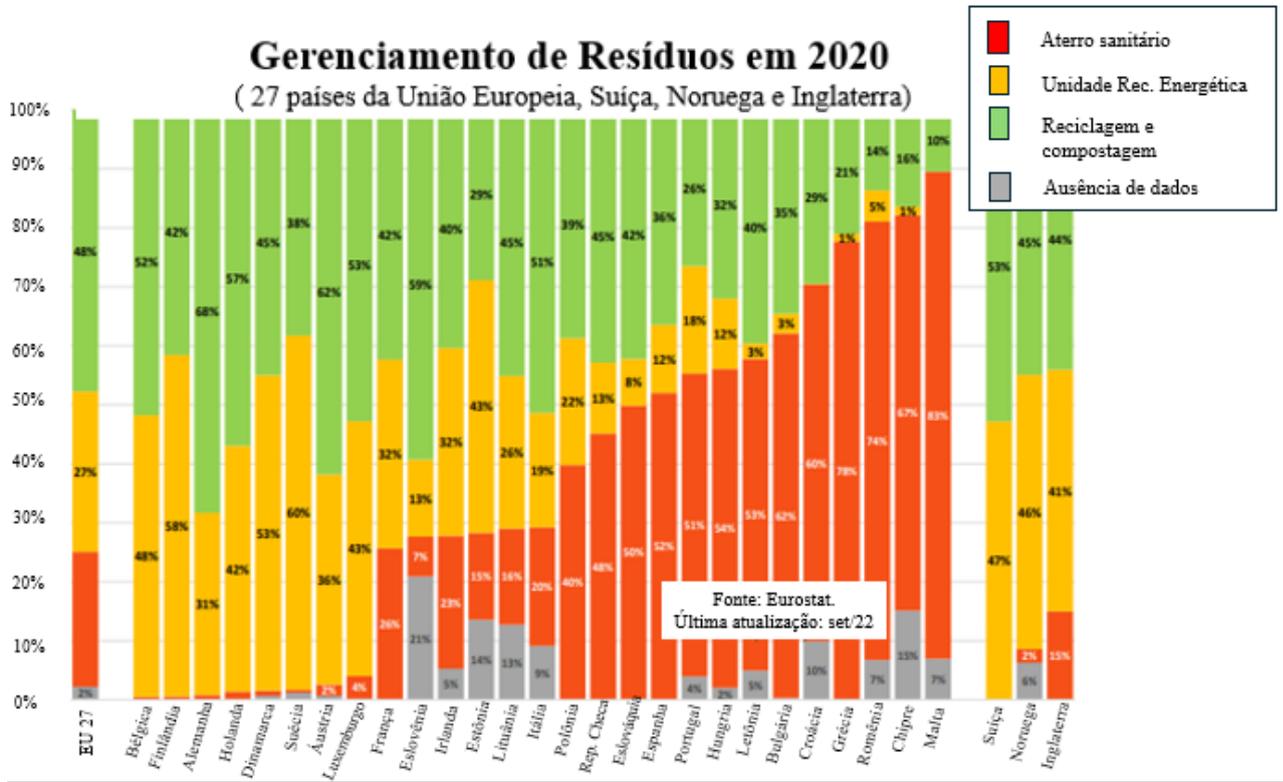


Fonte: adaptado de ABREMA (2024).

Apesar da diferença metodológica existente entre as três fontes de dados apresentados (SINISA, ABRELPE e ABREMA), os resultados mostram que há muito a ser feito no país com relação à uma transição da disposição em lixões para aterros sanitários. Uma realidade que distoa das diretrizes e prazos estabelecidos pela PNRS no ano de 2010.

A estratégia de gerenciamento de resíduos adotada pela União Europeia prioriza a não geração, a maximização da reciclagem e compostagem e a implantação de unidades de recuperação energética de resíduos (URE), como pode ser observado no diagrama da Figura 5. Apesar de os aterros sanitários ainda representarem uma alternativa adotada por alguns países da União Europeia, foram estabelecidas restrições progressivas para minimizar o envio de resíduos com potencial de reciclagem ou geração de energia para estes locais (União Europeia, 2018). Tal cenário encontra-se mais alinhado com os princípios da economia circular do que o que se observa no Brasil.

Figura 5 - Alternativas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos nos países europeus em 2022.



Fonte: adaptado de EUROSTAT (2020).

## 1.2 Lixiviado de aterros sanitários

Um dos subprodutos da disposição final de rejeitos nos aterros sanitários é o lixiviado, popularmente conhecido como “chorume”, constituído dos líquidos que percolam através dos resíduos depositados e que efluem de um aterro ou nele estão contidos. Para SALEM et al. (2008), o lixiviado de aterros sanitários é o líquido gerado como resultado da percolação das águas pluviais na área de disposição de resíduos, bem como pela umidade presente nos resíduos e o produto da degradação dos mesmos.

A geração de lixiviado está diretamente relacionada a fatores como a pluviometria, evapotranspiração, infiltração, o escoamento superficial e o grau de compactação dos resíduos (EL FADEL et al., 2002; RENOU et al., 2008). A caracterização do lixiviado, porém, é bastante variável e tem influência de fatores como a idade do aterro, já que alterações nos parâmetros ocorrem conforme o desenvolvimento das etapas de estabilização (KULIKOWSKA; KLIMIUK, 2008). No início da operação, durante a fase ácida, o lixiviado possui pH baixo e alta concentração

de matéria orgânica biodegradável, bem como ácidos voláteis (CHRISTENSEN et al., 2001). Após algum tempo de operação (cerca de cinco a dez anos), quando é observado o aumento da produção de biogás, denomina-se fase metanogênica, na qual há a elevação do pH e maior concentração de matéria orgânica como ácidos húmicos e fúlvicos (KURNIAWAN et al., 2006; KULIKOWSKA; KLIMIUK, 2008)

Considerando a variabilidade na caracterização do lixiviado ao longo da vida útil do aterro, torna-se fundamental o monitoramento de alguns parâmetros mais representativos. Aqueles comumente utilizados para caracterizar o lixiviado de aterros sanitários são: pH, DQO, nitrogênio amoniacal, nitrogênio Kjeldahl, fósforo cloreto, alcalinidade, sólidos e metais e metalóides (KJELDSSEN et al., 2002; BHATT et al., 2017).

Um estudo desenvolvido por COSTA et al. (2019) avaliou a caracterização físico-química de lixiviado de aterros sanitários brasileiros. Foi constatada a presença de altas concentrações de DQO e baixas de DBO, indicando que a matéria orgânica representa a maior fração nos aterros sanitários e que compostos recalcitrantes, como ácidos húmicos e fúlvicos estão presentes. Esta baixa relação DBO/DQO e o pH alcalino, observado nos aterros estudados são características de estágio avançado de degradação o que indicaria que o aterro estaria na fase metanogênica. Ainda segundo as mesmas autoras, a concentração de metais e metalóides é baixa em aterros brasileiros devido à baixa solubilidade dos metais em pH alcalino, condição verificada em aterros estabilizados. Apesar disto, é importante considerar que apesar das baixas concentrações, estas substâncias podem contribuir para a toxicidade do efluente. Altas concentrações de nitrogênio amoniacal foram observadas em aterros em diferentes cidades brasileiras, sendo considerado um dos principais poluentes do lixiviado com potencial de contaminação (COSTA et al., 2019).

Um estudo desenvolvido por SOUTO; POVINELLI (2007) levantou as concentrações mais prováveis do lixiviado de 25 aterros brasileiros. Um extrato destes resultados segue apresentado na Tabela 1. A grande dispersão nos valores de concentração de poluentes, sobretudo com relação ao nitrogênio amoniacal, DQO, DBO e condutividade explicam as dificuldades associadas ao tratamento deste tipo de efluente. Além disso, a presença de compostos recalcitrantes no lixiviado, principalmente em aterros sanitários mais maduros, também contribui para a necessidade de processos mais complexos de tratamento para o efluente. São necessárias

algumas etapas associadas para que se garanta que as concentrações limites para lançamento do efluente tratado sejam atingidas.

Tabela 1 - Características dos lixiviados brasileiros.

Parâmetro	Unidade	Faixa máxima	Faixa mais provável
pH		5,7-8,6	7,2-8,6
Condutividade	µS/cm	2.950-25.000	2.950-17.660
Alcalinidade total	mg/L	750-11.400	750-7.100
DBO	mg/L	< 20-30.000	< 20-8.600
DQO	mg/L	190-80.000	190-22.300
Óleos e graxas	mg/L	10-480	10-170
N-amoniacal	mg/L	0,4-3.000	0,4-1.800
Nitrito	mg/L	0-50	0-15
Nitrato	mg/L	0-11	0-3,5
Sulfato	mg/L	0-5.400	0-1.800
Cloreto	mg/L	500-5.200	500-3.000
ST	mg/L	3.200-21.900	3.200-14.400
Ferro	mg/L	0,01-260	0,01-65
Manganês	mg/L	0,04-2,6	0,04-2,0
Cobre	mg/L	0,005-0,6	0,005-0,15
Níquel	mg/L	0,03-1,1	0,03-0,5
Cromo	mg/L	0,003-0,8	0,003-0,5
Cádmio	mg/L	0-0,26	0-0,065
Chumbo	mg/L	0,01-2,8	0,01-0,5
Zinco	mg/L	0,01-8,0	0,01-1,5

Fonte: SOUTO; POVINELLI, 2007.

Alguns dos fatores que influenciam a composição e vazão do lixiviado são a forma de operação do aterro sanitário, pluviometria, tipo de resíduo depositado e estágio de degradação da matéria orgânica (GIORDANO, 2003). As variações de composição do lixiviado são observadas dentro de um mesmo aterro sanitário, ao longo do tempo, e de um aterro para outro, o que dificulta o estabelecimento de uma rota de processo de tratamento única que possa ser adotada em todos os aterros sanitários. Neste sentido, podem ser necessárias adequações na rota de tratamento de Estações de Tratamento de Lixiviados ao longo da vida útil do aterro.

Além do atingimento dos limites de lançamento definidos pela Resolução CONAMA nº 430 (BRASIL, 2011) e dos níveis máximos permitidos para a toxicidade do efluente tratado, a avaliação do impacto deste último no corpo receptor deve ser incluída nos programas de monitoramento dos aterros sanitários. Dependendo da classe

do corpo hídrico, os limites de lançamento de alguns poluentes pode ser ainda mais restritivos do que os definidos pela CONAMA nº 430.

Segundo GHOST et al. (2017), o conhecimento do potencial de toxicidade do lixiviado antes de seu descarte no corpo receptor é essencial uma vez que a alta concentração de poluentes pode, individualmente ou em combinação, levar a altos níveis de toxicidade.

### **1.3. Armazenamento de lixiviados**

Além de servirem como reservatórios de armazenamento temporário de lixiviado, as lagoas de tratamento existentes nos aterros sanitários tem a função de permitir a equalização de volume e características do lixiviado, de possibilitar a depuração da matéria orgânica biodegradável e de servir como contingência nos períodos chuvosos. Neste sentido, não há como negar a necessidade da existência de tais dispositivos e a importância da definição de critérios mínimos para que os projetos implantados garantam o mínimo vazamentos para o meio ambiente. A Figura 6 apresenta uma imagem de uma típica lagoa de tratamento de lixiviado de aterros sanitários brasileiros, os quais usualmente contemplam uma camada de argila compactada abaixo de uma geomembrana (GM) de polietileno de alta densidade (PEAD) lisa ou texturizada.

A adoção da GM de PEAD como barreira para os reservatórios de armazenamento de lixiviados, requer procedimentos adequados para transporte, armazenamento e instalação do geossintético. A norma NBR 16.199 – Barreiras Geossintéticas – Instalação da Geomembrana Polimérica (ABNT, 2020a) estabelece procedimentos para as empresas que executam a instalação da GM em obras geotécnicas, hidráulicas e de proteção ambiental com a finalidade de assegurar a correta execução dos serviços e a qualidade da obra como um todo. Procedimentos inadequados de instalação do geossintético poderão ocasionar danos por meio dos quais ocorrerão vazamento do lixiviado por este sistema de barreiras.

Da mesma forma que os processos de instalação, os procedimentos operacionais dos reservatórios de efluentes precisam refletir o cuidado com a preservação da integridade da GM. Logo, o uso de bombas, mangotes e quaisquer ferramentas ou equipamentos que possam perfurar a GM devem requerer atenção redobrada.

Figura 6 - Lagoa de lixiviado típicas dos aterros sanitários brasileiros.



Fonte: CTR VILA VELHA, 2024.

#### **1.4. Projetos de lagoas de lixiviado**

Em função dos níveis de toxicidade e concentração dos contaminantes identificados nos lixiviados, o uso de GMs de PEAD expostas (sem proteção superficial) em lagoas é crescente na indústria da gestão de resíduos e de tratamento deste efluente. Sua aplicação é recomendada como uma solução ambientalmente adequada (ABNT, 2020a) e exigida pelos órgãos ambientais no processo de licenciamento dos aterros sanitários. Entretanto, a exigência do uso da GM como requisito mínimo em sistema de barreiras não está explicitamente definidos em requisitos normativos ou legais no país.

A norma NBR 13.896 (ABNT, 1997) estabelece os critérios para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, definindo critérios relacionados à impermeabilização de base do aterro, sistema de drenagem, remoção e tratamento de lixiviado, dentre outros. Entretanto, não menciona a exigência de sistema de barreiras para reservatórios que seja compatível com o risco de uma potencial contaminação do solo ou da água subterrânea. Em países como Estados Unidos e Canadá, entretanto, tais sistemas já estão especificados por normas ou legislação (EPA, 1991; ALBERTA GOVERNAMENT, 2023).

O entendimento de que os *liners*<sup>4</sup> vazam já foi descrito por diversos autores (PEGGS, 2009; ROWE, 2011; GIROUD, 2016), o que levou inclusive ao desenvolvimento de equações para cálculos estimados do volume de lixiviado a partir de furos existentes em *liner* composto (GIROUD et al.,1989; GIROUD et al., 1992; GIROUD; BONAPARTE, 1989 a, b; GIROUD, 1997; TOUZE-FOLTZ et al., 1999 e ROWE, 2012). Paralelamente a isso, alguns destes autores participaram do desenvolvimento de um relatório técnico (EPA,1987) para a Agência Ambiental dos Estados Unidos (EPA) sugerindo a adoção de projetos de reservatórios com dupla camada de geomembrana e sistema de detecção de vazamentos, juntamente com a adoção do plano de garantia da qualidade para a instalação em projetos de lagoas de lixiviados de aterros sanitários.

THIEL; GIROUD (2011) sugeriram que os projetos de impermeabilização de reservatórios devem considerar como premissa que o *liners* vazam. Em função disso, os autores sugeriram o estabelecimento de níveis de controle diferentes para os projetos. Para líquido em que pequenos volumes de vazamento não podem ser tolerados, a implantação de barreira dupla com sistema de detecção e controle de vazamentos no reservatório é uma recomendação.

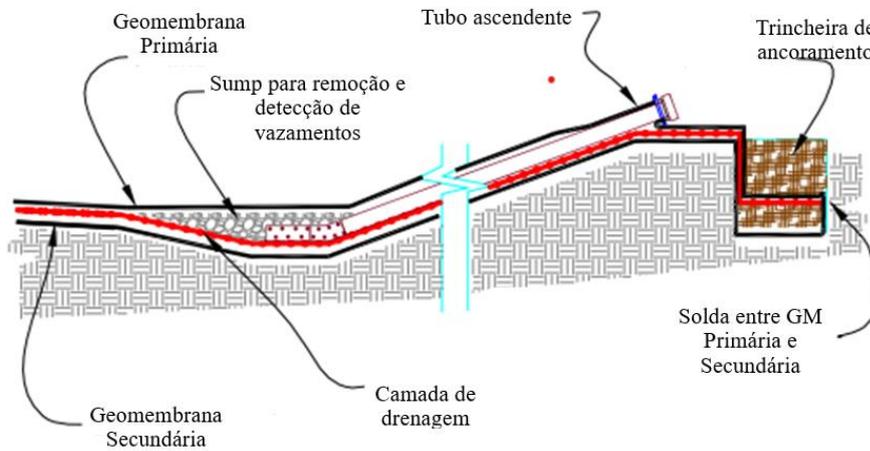
Há consenso em países como Canadá e Estados Unidos com relação à necessidade de implantação de lagoas com dupla barreira para armazenamento de lixiviados de aterros. Estabeleceu-se, inclusive, o conceito da taxa de vazamento aceitável (*Action Leakage rates* – ALR) como requisito para autorização de funcionamento e monitoramento da qualidade operacional dos reservatórios. Esta taxa (volume por área) é definida pela quantidade de lixiviado que atravessa a GM primária e chega até o sistema de detecção de vazamentos, conforme a seção do projeto de reservatório apresentada na a Figura 7.

Em projetos com seção similar ao desta Figura, o vazamento de lixiviado decorrente de furos na GM primária serão removidos pela camada de detecção por meio de bombeamento. Isto permitirá o monitoramento contínuo da taxa de vazamento do reservatório. Além disso, o bombeamento constante do lixiviado minimizará os riscos de que este atinja o solo abaixo da GM secundária.

---

<sup>4</sup> Sistema de barreiras envolvendo o uso de um geossintético.

Figura 7- Projeto de reservatório com dupla camada de GM e sistema de detecção de vazamentos para contenção de efluentes em que o vazamento mínimo não pode ser tolerado.



Fonte: adaptado de THIEL; GIROUD, 2011.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos baseou-se no documento “EPA/530-SW-87-05 – *Background Document on Proposed Liner and Leak Detection Rules*” (EPA,1987) para definir os critérios para aceitação dos sistemas de barreira, considerando taxas de vazamento permitida para que uma lagoa possa operar. O documento citado apresenta o embasamento técnico para as exigências e considerou cálculo de vazamentos pela GM a partir de estimativas da quantidade de furos encontrados em projetos que adotaram bons procedimentos de garantia da qualidade. A Divisão de Proteção Ambiental da província de Alberta (ALBERTA, 1996), a quarta mais populosa do Canadá, por exemplo, definiu que o ALR (*Action Leakage rates*) é a quantidade de lixiviado que vai ser identificada no topo da GM secundária considerando 2 furos por 10.000 m<sup>2</sup>, cada um com diâmetro de 2 mm. Adicionalmente, o ALR não pode ser maior do que a capacidade de escoamento e remoção do lixiviado no sistema de coleta e detecção de vazamentos. Desta maneira, estabeleceram-se os critérios de qualidade necessários para início da operação do reservatório e para sua manutenção ao longo de sua fase operacional. Assim, durante a fase de operação do reservatório, caso o volume de lixiviado identificado no sistema de detecção de vazamento exceda o ARL, a operação deve ser interrompida. E para sua retomada será necessária a localização e reparo dos vazamentos na primeira camada de GM de modo que a taxa de lixiviação seja reduzida às condições iniciais, ou seja, abaixo do ARL.

No Brasil, além da ausência de requisitos legais e normativos estabelecendo as exigências para o sistema de barreira de reservatórios de lixiviados, existe ainda desconhecimento sobre os reais riscos de vazamento pelas GMs danificadas. Em função disso, são utilizadas lagoas com uma camada de GM instalada sobre argila compactada e/ou GCL (geocomposto bentonítico), sem um sistema de detecção de vazamentos. Desta maneira, não se tem conhecimento sobre vazamentos pela GM e com isso não são tomadas medidas para impedir que o lixiviado atinja as camadas inferiores.

## **1.5. Geossintéticos**

### 1.5.1 Definição, tipos e funções

A norma NBR ISO 10.318-1 (ABNT, 2021a), define geossintético como o termo genérico que descreve um produto em que ao menos um de seus componentes é produzido a partir de um polímero sintético ou natural, sob a forma de uma manta, tira ou estrutura tridimensional, utilizado em contato com o solo ou outros materiais, em aplicações de engenharia geotécnica e civil.

Segundo BUENO (2004), os geossintéticos são constituídos essencialmente por polímeros e, em menor escala, por aditivos que têm a função de introduzir melhorias nos processos de fabricação ou modificar aspectos do comportamento de engenharia do polímero básico. Segundo o mesmo autor, os geossintéticos são, em sua maioria, fabricados a partir de polímeros sintéticos, derivados de petróleo, embora algumas fibras naturais, como as de juta, sisal e coco, também sejam empregadas na fabricação de alguns geotêxteis (chamados, então, de biotêxteis) e geomantas (chamadas, então, de biomantas)

Existem vários tipos de geossintéticos disponíveis para aplicação em obras de engenharia, conforme descrição do Quadro 1.

Quadro 1 - Geossintéticos com aplicação em obras de engenharia

<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
Geotêxtil	Material têxtil plano, permeável, polimérico (sintético ou natural), podendo ser não tecido, tricotado ou tecido, utilizado em contato com o solo e/ou outros materiais, em aplicações da engenharia geotécnica e civil.
Geogrelha	Estrutura polimérica plana, constituída por uma malha aberta e regular de elementos de tração completamente conectados, que podem ser unidos por extrusão, solda ou entrelaçamento, e cujas aberturas são maiores que os elementos constituintes.
Georrede	Geossintéticos constituídos por conjuntos de elementos paralelos superpostos e completamente conectados a outros elementos similares a vários ângulos
Geomanta	Estrutura tridimensional permeável, feita de monofilamentos poliméricos e/ou outros elementos (sintéticos ou naturais), interligados mecanicamente e/ou termicamente, e/ou quimicamente, e/ou outra forma.
Geocélula	Fibra tridimensional, permeável, polimérica (sintética ou natural), ou estrutura celular semelhante, feita de ligadas de geossintéticos.
Geoespaçador	Estrutura polimérica tridimensional com espaços de ar que se interconectam, utilizada em contato com o solo e/ou outros materiais em aplicações da engenharia geotécnica e civil
Barreira geossintética polimérica	Estrutura constituída de materiais geossintéticos, produzida industrialmente em forma de lâmina, na qual a função barreira é essencialmente desempenhada por polímeros.
Geocomposto	Material fabricado e montado usando pelo menos um produto geossintético entre os componentes
Geocomposto argiloso para barreira impermeabilizante (GCL)	Estrutura formada pela associação de um geossintético com um material argiloso de baixa condutividade desenvolvido

Fonte: ABNT, 2021.

Os geossintéticos podem desempenhar diferentes funções nas obras de engenharia (ABNT, 2021a):

- Barreira - uso do geossintético para prevenir ou limitar a migração de fluidos.

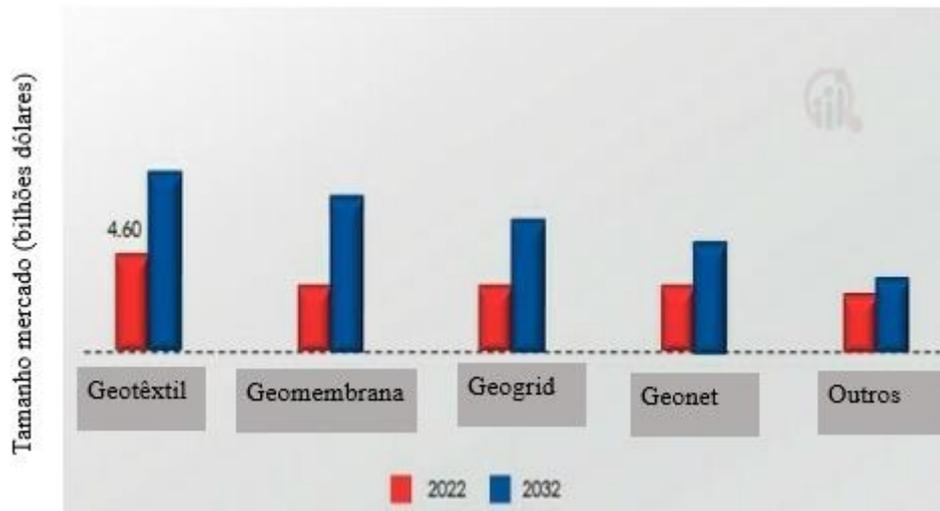
- Filtração - retenção do solo ou de outras partículas submetidas a forças hidrodinâmicas, permitindo a passagem do fluido em movimento através ou no interior de um geotêxtil ou produto correlato.
- Drenagem - coleta e condução de águas pluviais, águas subterrâneas e outros fluidos no plano de um geotêxtil ou produto correlato
- Proteção - limitação ou prevenção de danos localizados em um elemento ou material, pelo uso de um geotêxtil ou produto correlato
- Reforço - uso do comportamento tensão-deformação de um geotêxtil ou produto correlato, para melhorar o comportamento mecânico do solo ou de outros materiais de construção
- Separação - prevenção da mistura de dois materiais adjacentes de natureza diferente, solos ou material de aterro, pelo uso de um geotêxtil ou produto correlato.
- Controle de erosão superficial - uso de um geotêxtil ou produto correlato para evitar ou limitar os movimentos de partículas de solo ou de outros materiais na superfície.

#### 1.5.2 Crescimento do mercado

Um estudo desenvolvido em 2022 (MORDON INTELLIGENCE, 2023), apontou um crescimento anual de 9% para o mercado de geossintéticos entre 2018 e 2028, tendo como destaque a região da Ásia-Pacífico, em função da participação da China e Índia na adoção destes materiais.

Os dados divulgados por MARKET RESEARCH FUTURE (2024) apresentam a segmentação do mercado de geossintéticos, indicando a participação relativa de produtos com maior destaque na receita global em 2022 e projetando o crescimento até 2032. A Figura 8 mostra que o geotêxtil apresentou a maior receita dentre os geossintéticos vendidos no mercado em 2022 e a GM figura entre os produtos relevantes e com projeção de crescimento importante até 2032.

Figura 8 - Segmentação do mercado global de geossintéticos em função da receita, por tipo de produto para o ano de 2022 e projeção para 2032.



Fonte: adaptado de MARKET RESEARCH FUTURE, 2024.

Outro estudo (EXACTITUDE CONSULTANCY, 2023) apresentou a expectativa de crescimento para o mercado de GMs no mundo, com projeção de chegar a mais de 3.919 milhões de dólares em 2025, como mostra a Figura 9. O mesmo estudo divulgou que o mercado de GMs por aplicação é dividido em gestão de resíduos, gestão de água, mineração, túnel e construção civil. A mineração e a gestão de resíduos são as principais aplicações das GMs. Em ambos os casos o geossintético é prioritariamente empregado com a função de barreira.

Figura 9 - Expectativa de crescimento do mercado global de GMs 2018-2025.



Fonte: adaptado de EXACTITUDE CONSULTANCY, 2023.

### 1.5.3 Propriedades dos geossintéticos

De acordo com BUENO; VILAR (2004), a escolha dos geossintéticos deve estar baseada na avaliação das propriedades de engenharia que traduzam as condições técnicas a que serão submetidos quando em serviço. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios de campo ou, mais comumente, de laboratório, os quais, para serem realistas, precisam reproduzir os aspectos importantes da interação do geossintético com o meio em que será inserido.

Segundo o IGS Brasil (IGS, 2020), existem dois grupos de ensaios para a caracterização dos geossintéticos: ensaios de caracterização (ou propriedades índice) e ensaios de desempenho.

COLMANETTI (2006) definiu ensaios de caracterização como aqueles que objetivam caracterizar o produto de modo geral sem considerar as peculiaridades inerentes a um determinado projeto. Permite o controle de qualidade de produção durante a fabricação. A mesma autora publicou que os ensaios de desempenho objetivam determinar as propriedades funcionais do material visando a obtenção de parâmetros de projeto para efeito de dimensionamento. Assim ela conclui que os ensaios de caracterização são influenciados pelos materiais enquanto que os de desempenho são influenciados pelas condições ambientais e pelo estudo de tensões que os geossintéticos estarão submetidos em campo.

O Instituto de Pesquisas em Geossintéticos (GRI) publicou em 2023 a 17ª revisão da especificação GM-13: “*Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes*”, que estabelece requisitos mínimos para as propriedades físicas, de durabilidade e mecânicas das geomembranas. A NBR 16.757-2 (ABNT, 2020b) estabelece, no Brasil, os ensaios recomendados para avaliação das propriedades da geomembrana pelos fabricantes. Entretanto, alguns critérios de aceitação para os ensaios elencados não foram estabelecidos, o que acaba por limitar a adoção desta norma. A Tabela 2 apresenta a comparação entre os ensaios sugeridos pelas duas normas, evidenciando quais deles possuem critérios de aceitação definidos.

Tabela 2 - Comparação entre ensaios propostos pela NBR 16.757-2 e GM-13.

Propriedades	Requisitos	NBR 16.757-2	CA*	GM-13	CA*
Físicas	espessura	Sim	Não	Sim	Sim
	densidade	Sim	Não	Sim	Sim
Mecânicas	resistência à tração alongamento na carga máxima	Sim	Não	Sim	Sim
	resistência punção estático	Sim	Não	Sim	Sim
	resistência ao rasgo	Não	Não	Sim	Sim
	conteúdo de negro de fumo	Sim	Sim	Sim	Sim
	dispersão de negro de fumo	Sim	Sim	Sim	Sim
Durabilidade	resistência à oxidação resistência ao <i>stress</i> <i>cracking</i>	Não	Não	Sim	Sim
	tempo de oxidação induzida	Sim	Sim	Sim	Sim
	exposição à radiação UV	Não	Não	Sim	Sim
		Sim	Sim	Sim	Sim

\*Existência de Critério de Aceitação.

Fonte: adaptado de ABNT, 2020b e GRI, 2023.

## 1.6 Geomembrana de PEAD

### 1.6.1 Histórico e aplicações

LAVOIE et al. (2020) apresentam um histórico sobre a utilização das geomembranas, mencionando que o início do seu uso teria ocorrido em 1930, tendo as mesmas se tornando “usuais” em 1940. De acordo com STAFF (1984) os registros das primeiras aplicações nos Estados Unidos foram com geomembrana de PVC em piscinas na década de 30 e 40. Segundo GIROUD (1984), as aplicações da geomembrana vinham sendo discutidas em artigos e conferências, mas a primeira apresentação do termo “geomembrana” somente ocorreu em um artigo publicado por este autor em 1977.

As geomembranas de PEAD passaram ser utilizada inicialmente na Europa e África do Sul e, posteriormente na América do Norte (LAVOIE et al., 2020). O uso da GM de PEAD em aterros sanitários municipais e na indústria de resíduos perigosos dos Estados Unidos teve avanços significativos desde 1985, principalmente em decorrência da adoção de regulamentação federal específica (LENGE; SIEBKEN, 1996). Dados publicados por Koerner, 1998 (in PALMEIRA, 2018) mostram que as vendas de

geomembranas em 1985 eram cerca de 6 vezes maiores do que no ano de 1980 na América do Norte.

Este geossintético vem sendo empregado como barreira em obras de proteção ambiental como aterros sanitários, lagoas de tratamento de efluentes e obras de mineração. Sua aplicação é função do baixíssimo coeficiente de permeabilidade, tipicamente  $10^{-11}$  a  $10^{-13}$  cm/s (PALMEIRA, 2018).

Os solos argilosos possuem condutividade hidráulica na faixa de  $10^{-6}$  a  $10^{-7}$  cm/s e, por isso, podem atenuar o transporte de alguns contaminantes por processos de sorção. Em face disso, passou-se a associar o solo argiloso com as GMs em sistemas de barreiras. Desta forma, nos sistemas de barreiras compostas, a camada de solo compactado (CCL), tem a função de servir de suporte para a GM, provendo uma superfície lisa e uma base resistente, e ser uma segunda linha de defesa em caso de vazamentos na GM (BOSCOV, 2008).

No Brasil, os projetos de aterros sanitários vem empregando as GMs de PEAD de 1,5 a 2,0 mm no sistema de barreiras juntamente com uma camada de solo argiloso compactado. Acima da GM, comumente, é empregada uma camada de solo compactado de 30 a 50 cm e, eventualmente, uma camada de geotêxtil antes da aplicação do solo acima da GM. Não é frequente encontrar projetos de aterros sanitários brasileiros que empreguem dupla camada de GM.

As lagoas de lixiviados vem sendo construídas no Brasil com aplicação da GM de 1,5 a 2,0 mm sobre uma camada de solo compactado. Não é usual aplicar camada de proteção sobre a GM neste tipo de empreendimento, exceto em casos específicos onde há uso de equipamentos para agitação, aeração ou bombeamento.

A GM é vendida em rolos no Brasil, mas já foram citados alguns projetos nos Estados Unidos em que o geossintético é fabricado em tamanhos maiores e sob medida para o projeto, com o objetivo de reduzir a quantidade de soldas e o tempo de instalação em campo (FGI, 2019). São produzidas com superfície lisa ou texturizada em um ou nos dois lados.

#### 1.6.2 Formulação, envelhecimento e vida útil

As geomembranas de PEAD são formuladas com 96-97,5% de polietileno, 2-3% de proteção UV, usualmente negro de fumo e 0,5-1,0% de antioxidante e termoestabilizante. Entretanto, este geossintético, exposto ao envelhecimento, pode

experimental mudanças nas propriedades devido às quebras na cadeia molecular, reticulação polimérica e quebra de ligação (LAVOIE et al., 2020). Tal fato pode reduzir a durabilidade do geossintético devido a seu envelhecimento precoce.

Os métodos atualmente utilizados para avaliar a durabilidade da geomembrana de PEAD são os testes de OIT (*Oxidative Induction Time*) e HPOIT (*High Pressure Oxidative Induction Time*), ambos previstos na norma GM-13. Estes testes avaliam a resistência do material à degradação oxidativa, causada por fatores como radiação UV, temperatura e exposição à agentes químicos (LAVOIE et al., 2020).

Além das mudanças das propriedades da geomembrana pelos fatores de degradação mencionados, muitos estudos têm associado ao *stress cracking*, o aumento da passagem de efluentes pelo sistema de barreira.

De acordo com PEGGS; CARLSON (1989) a falha devido ao *stress cracking* está associada a defeitos ou imperfeições que causam o aumento das tensões de tração existentes. Os defeitos podem ser de vários tipos e formas, e geralmente incluem arranhões na superfície, sulcos de esmerilhamento, remendos e emendas. Além disso, a presença de agentes químico externo, como o lixiviado pode acelerar o *stress cracking*.

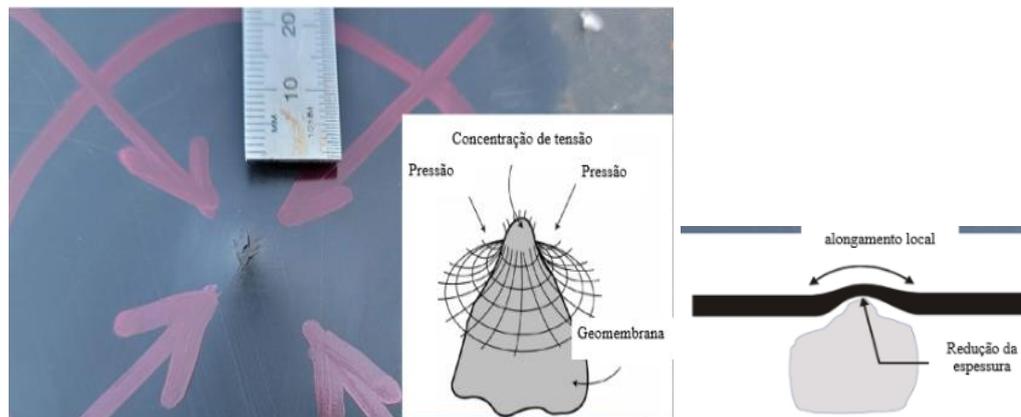
Segundo BRAZ et. al. (2017) o *Environmental Stress Cracking* (ESC) é um fenômeno em que um material polimérico, sob tensão, é deteriorado por um agente químico agressivo, uma vez que o ESC é um processo essencialmente físico que não envolve degradação química do polímero. É um modo de falha induzido por um fluido, na qual os efeitos deletérios do agente químico e tensões mecânicas resultam em fissuras e trincas, limitando a aplicação do material.

A Figura 10 apresenta a imagem de uma falha, por *stress cracking*, em geomembrana instalada indevidamente sob tensão, em um talude abaixo do qual havia solo compactado com presença de pedregulhos de pequena dimensão. Os diagramas esquemáticos da Figura demonstram a concentração da tensão no ponto em que a geomembrana estava apoiada no pedregulho, o que foi determinante para causar as fissuras no geossintético.

Segundo ROWE; SANGAM (2002) a importância do *stress cracking* está relacionada à possibilidade de pequenas fissuras permitirem a passagem de lixiviado pela geomembrana e abaixo desta haver deslocamento lateral do efluente em áreas de contato inadequado entre a geomembrana e o solo e à possibilidade do crescimento das fissuras com o tempo. Em ambos os casos, uma vez que o vazamento aumenta

substancialmente, a geomembrana deixa de cumprir a função de barreira para a qual foi designada.

Figura 10 – Imagem de falha por *stress cracking*, em geomembrana instalada em um talude sob o qual havia solo compactado com presença de pedregulhos de pequena dimensão.



Fonte: SCHEIRS; MARTA, 2024.

### 1.6.3 Requisitos de fabricação e instalação

Uma das grandes vantagens do uso dos geossintéticos em substituição aos insumos naturais como solo, areia e pedregulhos é a possibilidade de uso de um material com propriedades conhecidas e homogêneas, aliado à maior agilidade na sua aplicação. São necessárias menos operações durante o processo de aplicação do geossintético e, por consequência, menor necessidade de utilização de recursos humanos e equipamentos.

Entretanto, para garantir a qualidade do geossintético é necessário que suas propriedades sejam testadas após sua fabricação e antes de seu uso, pois somente desta maneira poderá ser garantida sua funcionalidade. Neste sentido, as normas GM-13 (GRI, 2023) e NBR 16.757-2 (ABNT, 2020b) apresentam requisitos e critérios de aceitação para verificação das propriedades da GM fabricada.

De acordo com o documento intitulado “*Quality Assurance and Quality Control for Waste Containment Facilities*” (EPA,1993), a garantia e o controle da qualidade da fabricação dos geossintéticos é reconhecidamente crítica para quaisquer tipos de instalações que envolvam a contenção de resíduos, sejam eles de quais tipos forem. Este documento apresentou duas definições importantes (EPA, 1993):

- a) Controle da qualidade da fabricação (CQF) - sistema planejado de inspeções, usado para monitorar e controlar diretamente a fabricação de um material que é originado na fábrica. O CQF é normalmente realizado pelo fabricante de materiais geossintéticos e é necessário para garantir que os valores mínimos (ou máximos) especificados no produto fabricado estejam conforme com os requisitos inicialmente estabelecidos.
- b) Garantia da qualidade da fabricação (GQF) - sistema planejado de atividades que fornece garantia de que os materiais foram fabricados conforme especificado nos documentos de referência. GQF inclui inspeções em instalações de fabricação, auditorias e avaliação das matérias-primas e produtos geossintéticos para avaliar a qualidade dos materiais fabricados. GQF refere-se às medidas tomadas por uma organização terceira, para determinar se o fabricante está em conformidade.

Considerando a criticidade das propriedades de resistência da GM para o sistema de barreiras em obras de proteção ambiental é possível compreender a relevância dos processos de CQF e GQF para garantia da qualidade do material e por consequência da obra como um todo.

A norma NBR 16.199 (ABNT, 2020a) estabelece os procedimentos de transporte, manuseio, estocagem, armazenamento e instalação das GMs no Brasil. Os requisitos deste documento, porém, não substituem a experiência necessária dos instaladores de GMs neste tipo de serviço. A qualificação do pessoal responsável é extremamente relevante para a qualidade da instalação da GM. A falta de supervisão adequada para os serviços, durante a instalação do geossintético, pode ocasionar falhas não percebidas e que, posteriormente, poderão representar pontos de vazamento no reservatório.

Algumas recomendações referentes à instalação das GMs de PEAD são apresentadas a seguir e explicitam a especificidade do serviço:

- Fatores climáticos: a instalação não deve ser efetuada em momentos em que a intensidade dos ventos possa prejudicar o lançamento da GM ou mesmo pôr em risco os instaladores.

- Devem estar previstas ancoragens temporárias com sacos de areia ou terra no intervalo de tempo entre a colocação do material, as emendas e sua ancoragem definitiva;

- Temperatura: o cronograma dos serviços de instalação deve evitar soldagens nas horas mais quentes do dia, a fim de minimizar o tracionamento das soldas na retração natural do material;

- Trânsito de veículos: não é permitido trânsito de veículos sobre a GM instalada na ausência de camada de proteção.

- *As built* da localização dos painéis: deverá ser registrado, em forma de relatório, o número, a localização e a data de colocação de cada painel, assim como deverá ser feito o “*as-built*” diário de toda a GM instalada, sendo apresentado, posteriormente, ao contratante, como parte da garantia apresentada pelo instalador.

#### 1.6.4 Controle e garantia da qualidade da instalação

O engenheiro Glen Toepfer atuou em atividades de controle de qualidade em projetos de geração de energia nuclear, acompanhando a instalação de 2 milhões de metros quadrados de GM dupla em lagoas de evaporação nos Estados Unidos, entre 2009 e 2013. É autor do artigo: “*Lessons Learned from 30 Years of Construction Quality Assurance in Geosynthetic Lined Containment Systems*” (TOEPFER, 2023). Nele divulga experiências e reflexões relevantes sobre a garantia da qualidade na construção (GQC) em sistemas de contenção envolvendo geossintéticos. Afirma que as ações de GQC são fundamentais para minimizar a ocorrência de vazamentos na GM durante sua instalação e, após esta, na etapa de operação do reservatório. Sugere que a GQC possibilita o retorno do investimento para o proprietário do projeto ou empreendimento por atuar na minimização dos vazamentos que são indesejáveis em lagoas impermeabilizadas e podem gerar custos futuros adicionais.

Toepfer afirma que as atividades de GQC não se resumem à serviços desenvolvidos durante os trabalhos de campo, de instalação da GM, eles envolvem uma série de ações que se iniciam no planejamento e desenvolvimento do Plano de GQC. Os registros gerados ao longo das atividades de instalação representam garantias para os proprietários do projeto e agências ambientais de que os serviços foram executados conforme planejado, minimizando a ocorrência de vazamentos (TOEPFER, 2023).

A Figura 11 apresenta a estrutura da qualidade de projetos. Por meio dela é possível compreender que as falhas identificadas nos serviços de campo tem origem em atividades prévias, como é o caso do envolvimento e responsabilidade dos proprietários, na seleção de fornecedores, aquisição de materiais e equipamentos e especificações em projetos. Sugere-se, pela Figura 11, que as ações de GQC devem contemplar muito mais do que simples testes de verificação em campo, mas o envolvimento de vários departamentos da empresa ou do projeto buscando a minimização das falhas. Neste sentido a consciência da equipe de projeto sobre a criticidade do sistema de barreiras para os reservatórios é extremamente relevante.

Figura 11 - Estrutura de qualidade em projetos.



Fonte: adaptado de TOEPFER, 2023.

Da mesma forma que para a fabricação da GM existem os conceitos de controle e garantia da qualidade (CQ e GC respectivamente) para a construção de reservatórios impermeabilizados com GM eles também são aplicáveis e foram definidos pela EPA (1993) por sua criticidade:

- a) Controle de Qualidade da Construção (CQC): sistema planejado de inspeções que é usado para monitorar e controlar diretamente a qualidade de um projeto de construção (EPA, 1986). O controle de qualidade de construção é normalmente realizado pelo instalador de geossintéticos, ou para materiais naturais do solo pelo empreiteiro de terraplanagem, e é necessário para

alcançar a qualidade em o sistema construído ou instalado. O controle de qualidade de construção (CQC) refere-se a medidas tomadas pelo instalador ou contratante para determinar a conformidade.

- b) Garantia da Qualidade da Construção (GQC): sistema planejado de atividades que fornece a garantia ao proprietário e à agência ambiental de que a instalação foi construída conforme especificado em projeto (EPA, 1986). A garantia da qualidade da construção inclui inspeções, verificações, auditorias e avaliações de materiais e mão de obra necessários para determinar e documentar a qualidade da instalação construída.

Aqui no Brasil, a norma NBR 16.199 (ABNT, 2020a) define o termo “garantia da qualidade de fabricação e de instalação” como o conjunto de atividades programadas para verificar se o produto fabricado, o material recebido e os serviços de instalação estão sendo realizados conforme as normas técnicas pertinentes e as especificações de projeto executivo. A norma também define ensaios de controle de qualidade para “obras do tipo I”, nas quais falhas na barreira (GM) causam danos ambientais. Propôs ensaios destrutivos e não destrutivos para as soldas. Além disso, foram estabelecidos requisitos para verificação da estanqueidade global da obra, os quais incluem a aplicação dos métodos geoeletricos.

Embora os Métodos Geoeletricos estejam citados na NBR 16.199 (ABNT, 2020a), a metodologia para a sua execução não está definida em normas brasileiras. Entretanto, tais métodos já estão consolidados em normas ASTM (American Society of Testing and Materials), como é o caso das ASTM 6747 (ASTM, 2015) e ASTM D7007 (ASTM, 2016).

## **1.7 Métodos geoeletricos**

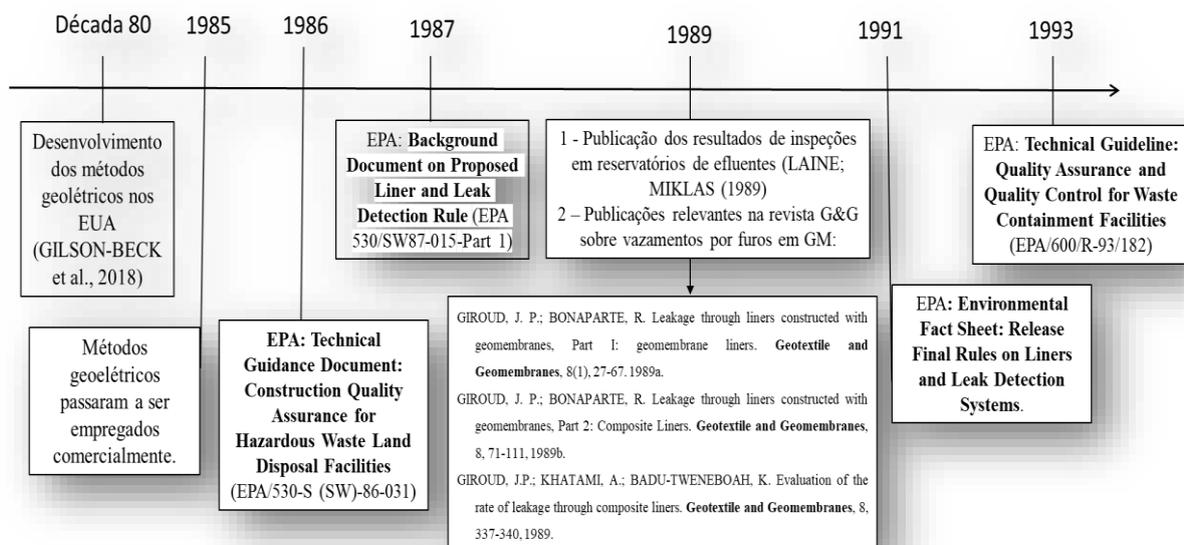
Os métodos geoeletricos, dentre os quais está incluído o método dipolo, foram desenvolvidos nos Estados Unidos na década de 1980 (GILSON-BECK et al., 2018).

Têm sido empregados comercialmente desde 1985, particularmente em aterros sanitários. Estes métodos, já estabelecidos por meio dos padrões normativos internacionais (ASTM, 2015), permitem a identificação de danos extremamente

pequenos em inspeções que abrangem a totalidade da área da GM instalada, possibilitando que os reparados sejam feitos antes do início de seu uso.

A partir do surgimento e aplicação dos métodos geoeletricos, os resultados das inspeções tornaram-se disponíveis para a comunidade científica que realizou algumas publicações correlacionadas aos impactos dos vazamentos na GM (GIROUD; BONAPARTE, 1989a; GIROUD; BONAPARTE, 1989b; GIROUD et al., 1989). Além disso, a própria comunidade científica disponibilizou ao EPA (agência ambiental norte americana) por meio de um documento intitulado “*Background Document on Proposed Liner and Leak Detection Rule*” (EPA, 1987), informações sobre a ocorrência de vazamentos na GM e os impactos nas camadas inferiores. A partir disso esta agência ambiental definiu requisitos para implantação do sistema de barreiras e de detecção de vazamentos em empreendimentos com armazenamento de resíduos e efluentes (EPA, 1991). Foram estabelecidos também requisitos associados ao controle e garantia da qualidade de empreendimentos envolvendo a contenção de resíduos (EPA, 1993). Este desencadeamento de fatos, posteriores ao surgimento dos métodos geoeletricos, está ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Linha do tempo do surgimento de requisitos de controle e garantia da qualidade em reservatórios impermeabilizados com geomembrana nos Estados Unidos.

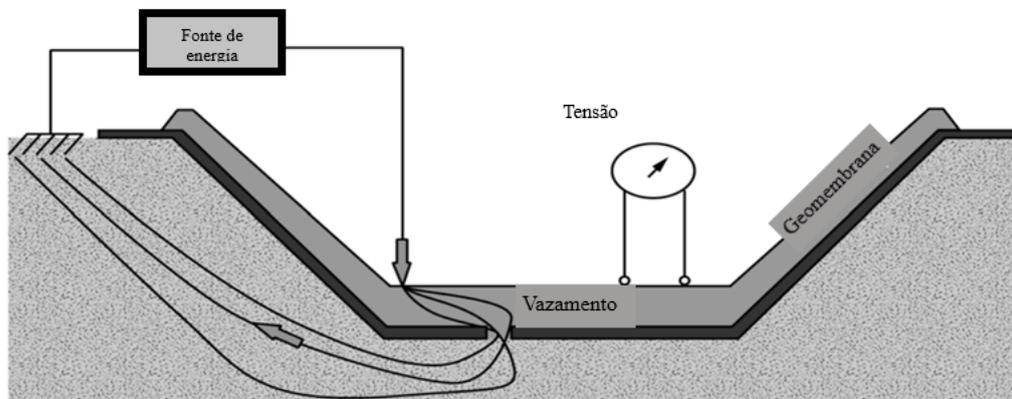


Fonte: a autora, 2024.

A aplicação dos métodos geoeletricos tem sido um requisito obrigatório para aterros sanitários, em pelo menos 4 estados dos EUA: Nova Jersey, Nova Iorque, Wisconsin e Carolina do norte (KOERNER et al., 2016).

O princípio dos métodos geoeletricos está baseado na aplicação de uma tensão elétrica através da GM e na localização de anomalias no campo elétrico que caracterizem a presença de vazamentos, como representado na Figura 13.

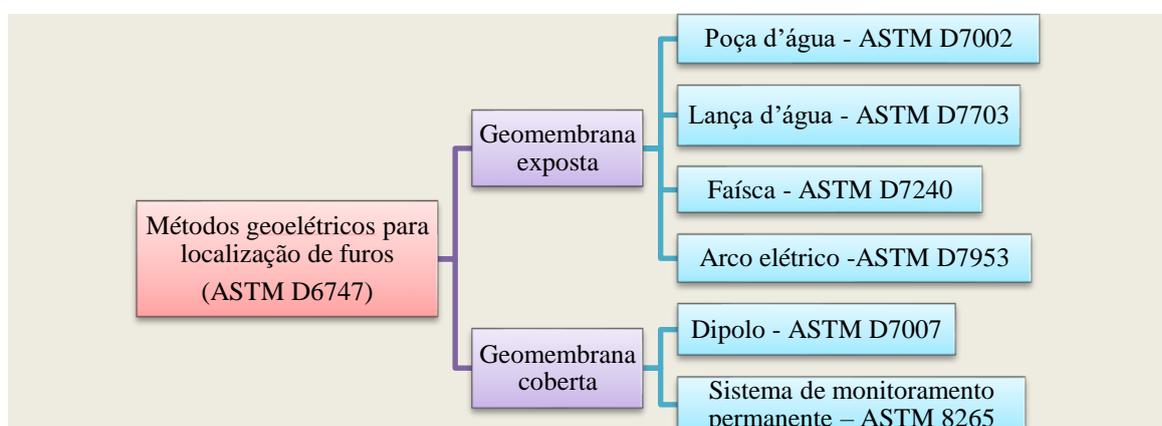
Figura 13 - Diagrama esquemático do princípio dos métodos geoeletricos.



Fonte: adaptado da ASTM, 2015.

A inspeção pode ser feita com a GM exposta, quando não há qualquer material de cobertura sobre ela ou com a GM coberta com líquidos, solo, areia e até concreto, ou seja, materiais que conduzem corrente elétrica. Neste último caso, em que o geossintético está coberto, o método denomina-se dipolo, como representado no diagrama da Figura 14.

Figura 14 - Diagrama esquemático dos métodos geoeletricos para inspeção em GMs.

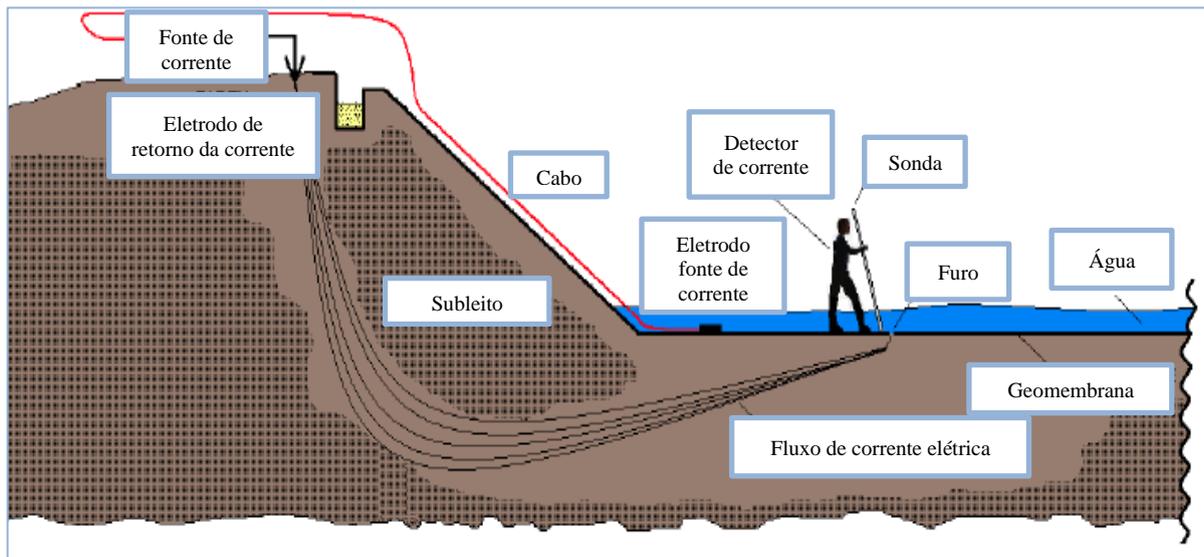


Fonte: a autora, 2023.

Na aplicação do método dipolo em reservatórios cheios, como é o caso das lagoas de lixiviados, instala-se um eletrodo no líquido e outro no solo abaixo da GM (no caso de *liner* simples) e aplica-se uma tensão elétrica por meio do eletrodo posicionado no líquido, conforme representado na

Figura 15.

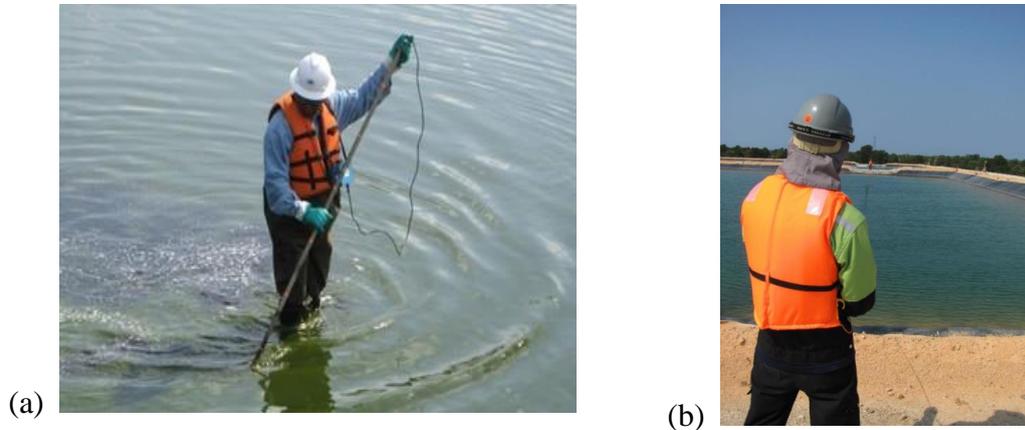
Figura 15 - Representação da aplicação do método dipolo em reservatório com líquido.



Fonte: adaptado de LLSI, 2016.

Medições são feitas ao longo de toda a área da GM coberta pelo líquido. A área é seccionada por um *grid* demarcado nas bordas do reservatório e possui um espaçamento pré-definido. Podem ser realizadas com o nível do líquido, em uma altura de 60-70 cm da base, quando o operador faz as medições com uma sonda em formato de haste andando dentro da lagoa. Neste caso, chama-se inspeção em nível raso. A medição também pode ser realizada com o nível completo do reservatório, situação em que dois operadores promovem o deslocamento de uma sonda fixada a um cabo de um lado e a um cabo de nylon do outro, o que se denomina inspeção em nível alto. As duas modalidades da inspeção estão representadas na Figura 16.

Figura 16 - Imagens da aplicação do método dipolo em reservatórios impermeabilizados com GM na condição de nível raso (a) e alto (b) do líquido.



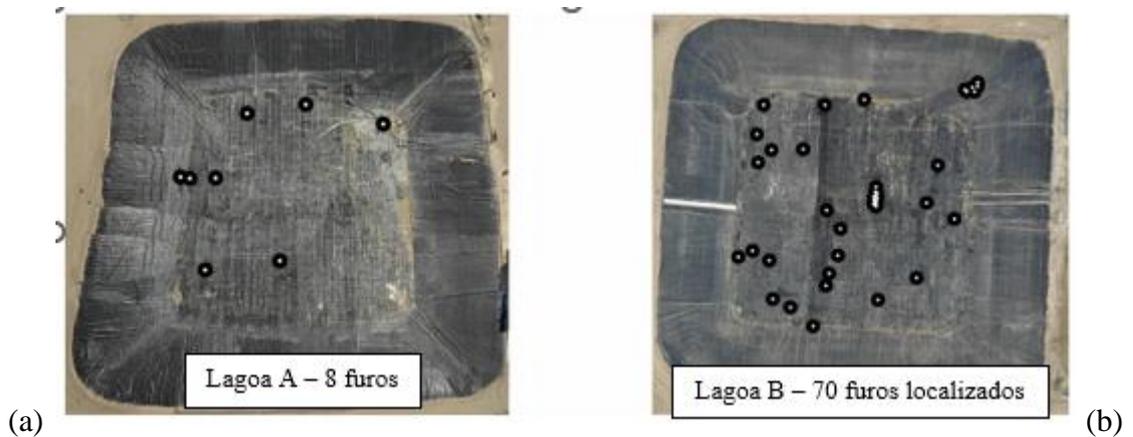
Fonte: LLSI, 2018.

### 1.8 Danos na geomembrana

A afirmação: “todos os *liners* vazam” foi feita por GIROUD; BONAPARTE (1989a) há mais de 30 anos. Segundo os autores esta afirmação não representa uma impossibilidade de se dispor de métodos seguros para estocar líquidos. Entretanto, o reconhecimento de que todos os *liners* vazam é o primeiro passo para projetar um sistema de contenção seguro para os líquidos. Cada nível de controle desejado exigirá uma solução adequada usando a GM, incluindo GM simples, *liner* composto e GM dupla.

Mc. DANIEL et al. (2019) afirmaram que o simples fato de usar um geossintético em um projeto não é garantia de total estanqueidade da barreira de proteção. Segundo ROWE (2011), na ausência de furos, o vazamento de água ou lixiviado pela GM PEAD de 1,5 mm é praticamente insignificante. Entretanto, o uso deste geossintético como barreira envolve uma série de etapas que expõe o mesmo a danos potenciais. Segundo Mc. DANIEL et al. (2019), a experiência mostra que em média 10 furos por 10.000 m<sup>2</sup> podem ser encontrados em projetos que adotaram procedimentos de controle e garantia da qualidade na instalação da GM, como o caso dos exemplos apresentados pela Figura 17.

Figura 17 - Imagens de furos identificados na GM de lagoas vazias, pela aplicação de método geométrico em GM exposta. (a) lagoa com 8 furos e (b) lagoa com 70 furos.



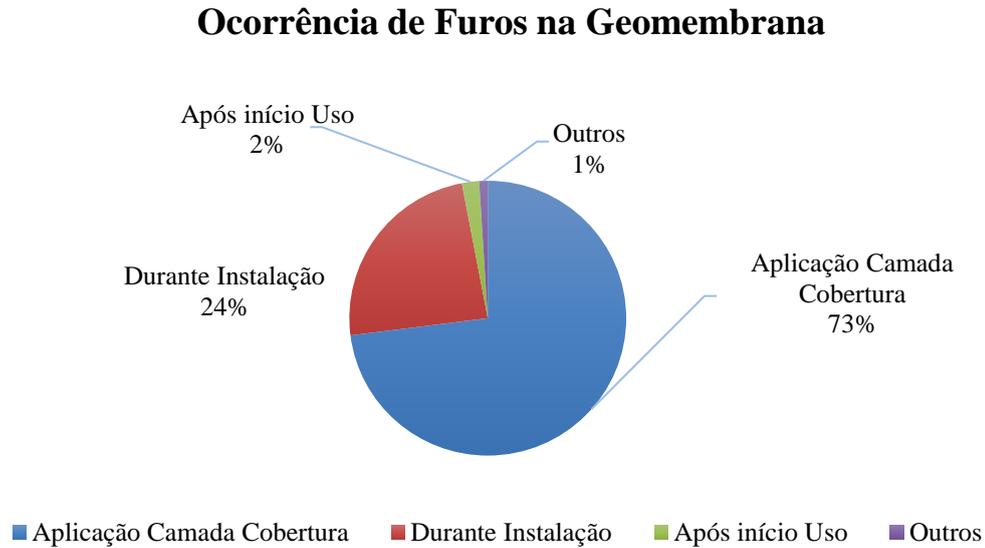
Fonte: adaptado de Mc. DANIEL et al., 2019.

GIROUD (2016) relatou os resultados de um estudo desenvolvido em 150 projetos, totalizando 2.500.000 m<sup>2</sup> de área, onde foram aplicados os métodos geométricos diretamente na GM de PEAD para avaliar sua integridade. Neste estudo, de 5 a 6 furos/10.000 m<sup>2</sup> de GM foram encontrados ao final da instalação da mesma. Tais resultados foram compatíveis com projetos onde houve a adoção de procedimentos de garantia da qualidade. Em projetos onde estes procedimentos não foram empregados, o número de furos chegou a mais de 25 por cada 10.000 m<sup>2</sup>.

NOSKO; TOUZE (2000) avaliaram os resultados obtidos na aplicação dos métodos geométricos em cerca de 3.250.000 m<sup>2</sup> de GM coberta com solo (300 projetos diferentes). Os autores identificaram que a maior parte dos furos acontece na área plana onde foi instalada a GM. E nas áreas planas, as principais causas de furos são as rochas e trânsito de máquinas pesadas.

Os resultados da aplicação do mesmo método em 89 projetos envolvendo 2.652.000 m<sup>2</sup> de GMs cobertas com solo mostraram que em média entre 4 e 22 furos são encontrados a cada 10.000 m<sup>2</sup> (FORGET et al., 2005). Segundo os autores do trabalho, a variação na quantidade de furos depende do nível de controle de qualidade utilizado durante a instalação da GM. Além disso, a análise dos dados permitiu identificar que a maior parte dos furos aconteceu durante a aplicação da camada de proteção da GM e durante sua instalação, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 - Ocorrências de furos em GM instalada e coberta com solo.



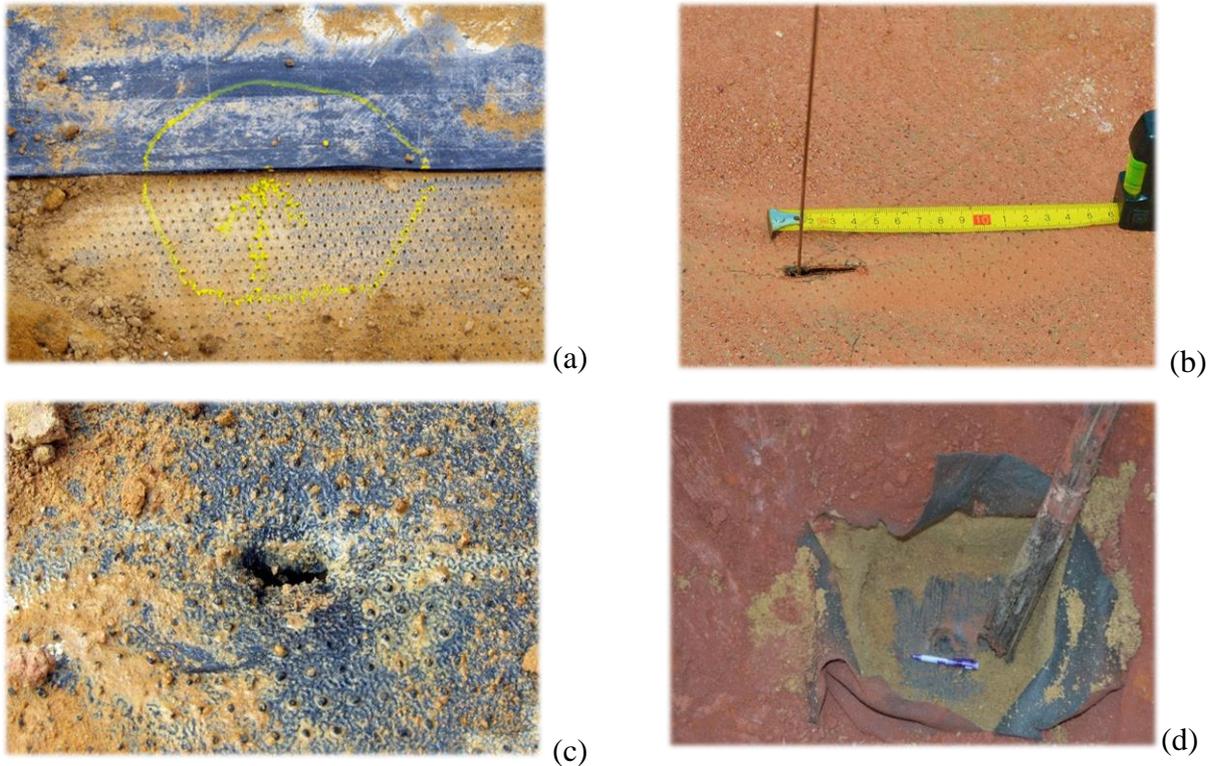
Fonte: adaptado de FORGET et al., 2005.

ZIDAN; FRIGO (2016) apresentaram o resultado da aplicação do método dipolo em 310.000 m<sup>2</sup> de área de GM coberta com solo, na Central de Tratamento de Resíduos CTR-Rio na cidade de Seropédica (estado do Rio de Janeiro). A densidade de furos obtida ao longo dos 4 primeiros anos de operação do empreendimento foi de 0,5 a 8 furos/10.000 m<sup>2</sup>.

A causa da formação dos furos na GM pode variar de um projeto para outro e dentro de um mesmo projeto. A Figura 19 mostra imagens de alguns furos causados por diferentes fatores relacionados à instalação do geossintético e aplicação do solo de cobertura.

GIROUD (2016) sugere a adoção de um Plano de Garantia da Qualidade da Construção para este tipo de obra, no qual estarão previstos testes não destrutivos para avaliar a integridade das soldas, inspeções visuais na GM e a adoção dos métodos geoeletricos de maneira complementar, principalmente para os projetos em que a mão de obra empregada na construção não possui padrão de excelência.

Figura 19 - Imagens de furos em GM após aplicação do solo de proteção, utilizando-se o método dipolo: (a) falha em solda, (b) corte com estilete, (c) punção por rocha e (d) dano causado por estaca.



Fontes: ZIDAN et al., 2019 e ZIDAN et al., 2017

### 1.8.1 Ocorrência de vazamentos em reservatórios

Apesar da existência do risco real da ocorrência dos vazamentos na GM, existem poucas publicações com dados estatísticos que demonstrem esta realidade em reservatórios já construídos e com algum tempo de operação. ROWE et al. (2003) apresentaram um caso histórico de exumação de uma lagoa de lixiviado de aterro sanitário, que utilizava uma camada de GM de PEAD de 1,5 mm sobre solo compactado e que após 14 anos e uso, apresentou 528 defeitos/10.000 m<sup>2</sup> na GM em uma inspeção visual.

BHOWMIK et al. (2015) publicaram sobre um caso histórico de rompimento de uma barragem impermeabilizada com GM de PEAD em que furos no geossintético ocasionaram a vazamento de líquido no talude. Após algum tempo, a erosão do solo do talude chegou a uma proporção tão significativa que acabou por ocasionar o rompimento da barragem.

LAINE; MIKLAS (1989) adotaram o método dipolo para inspecionar 14 lagoas cheias e impermeabilizadas com 149.191 m<sup>2</sup> de GM e encontraram uma média de 96 vazamentos/10.000 m<sup>2</sup>, com resultados variando entre 4 e 208 vazamentos/10.000 m<sup>2</sup>.

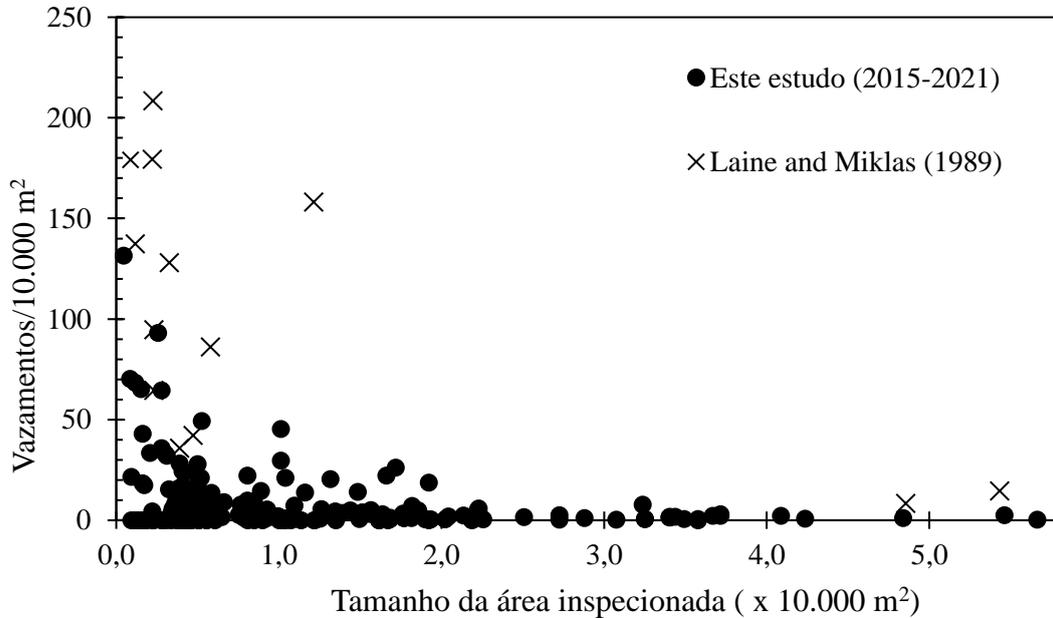
ZIDAN et al. (2024) publicaram os resultados da inspeção em 195 projetos de lagoas cheias e impermeabilizadas com GM nos Estados Unidos (n=159), Canadá (n=30) e México (n=11), utilizando o método dipolo. Este artigo foi o primeiro produto do doutorado da autora, vinculado a esta tese, e segue apresentado no anexo C. A área total inspecionada entre 2015-2021 foi de 3.221.100 m<sup>2</sup> e a quantidade de furos identificados foi de 1.230. Os dados indicaram uma média de 14 vazamentos por 10.000 m<sup>2</sup> com projetos apresentando entre 0-689 vazamentos/10.000 m<sup>2</sup>. Cerca de 74 das lagoas inspecionadas possuíam GM simples, 120 possuíam GM dupla e 1 GM tripla (localizada nos Estados Unidos).

Alguns dos principais resultados apresentados por ZIDAN et al. (2024) seguem apresentados na sequência:

a) Número de vazamentos encontrados por área inspecionada:

Figura 20 apresenta uma comparação do número de vazamentos encontrados por cada 10.000 m<sup>2</sup>, plotado contra o tamanho da área inspecionada para projetos inspecionados entre 2015 e 2021 (n=195) e os publicados por LAINE; MIKLAS (1989). Apesar da diferença de mais de vinte anos entre o período de realização dos dois estudos, os elevados resultados de vazamentos/área inspecionada encontrados no artigo de 1989 foram observados em alguns projetos avaliados no estudo mais recente. Entretanto, a maioria dos projetos deste estudo (98%) apresentaram menos do que 80 vazamentos/10.000 m<sup>2</sup>, enquanto para LAINE; MIKLAS (1989) o percentual foi de 43%. Os dados dos dois estudos mostraram que o número de vazamentos é menor em áreas maiores (maiores do que 20.000 m<sup>2</sup>). Este mesmo comportamento foi observado por GIROUD; TOUZE-FOLTZ (2003) e por GIROUD (2016). Tal resultado sugere que, reservatórios maiores devam estar sendo implantados em empreendimentos com melhores estruturas de pessoal e procedimentos adequados de controle e garantia da qualidade da instalação da GM.

Figura 20 - Distribuição dos resultados de vazamentos/10.000 m<sup>2</sup> pela área inspecionada dos projetos avaliados entre 2015-2021 (n=195) e por LAINE; MIKLAS (1989) (n=14). Dados obtidos pelo método dipolo aplicado em lagoas com GM em nível alto do líquido armazenado.

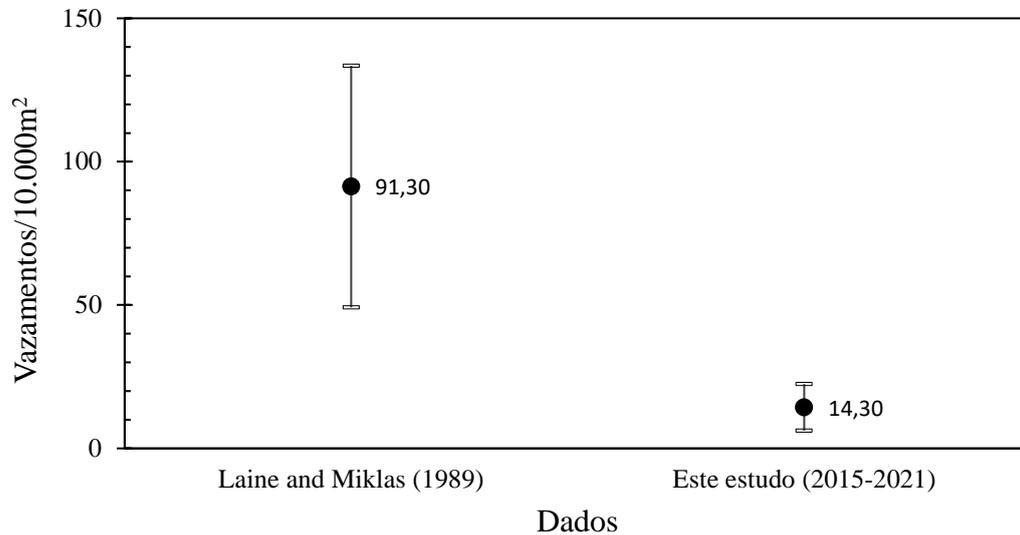


Fonte: adaptado de ZIDAN et al., 2024.

b) Média de vazamentos encontrados:

A Figura 21 apresenta o gráfico de 95% do intervalo de confiança da média de vazamentos/10.000 m<sup>2</sup> para os dados das inspeções realizadas entre 2015 e 2021 (n=195) e aqueles publicados por LAINE; MIKLAS (1989) (n=14). A Figura evidencia que a média dos resultados das inspeções realizadas em 2015-2021 é inferior aos dos de LAINE; MIKLAS (1989). Esta diferença sugere que melhorias nos procedimentos de controle de qualidade tenham ocorrido ao longo do tempo decorrido entre os dois estudos (ZIDAN et al., 2024).

Figura 21 - Intervalo de confiança de 95% da média de vazamentos/10.000 m<sup>2</sup> para as inspeções realizadas entre 2015-2021 (n=195) e dos de LAINE; MIKLAS (n=14).



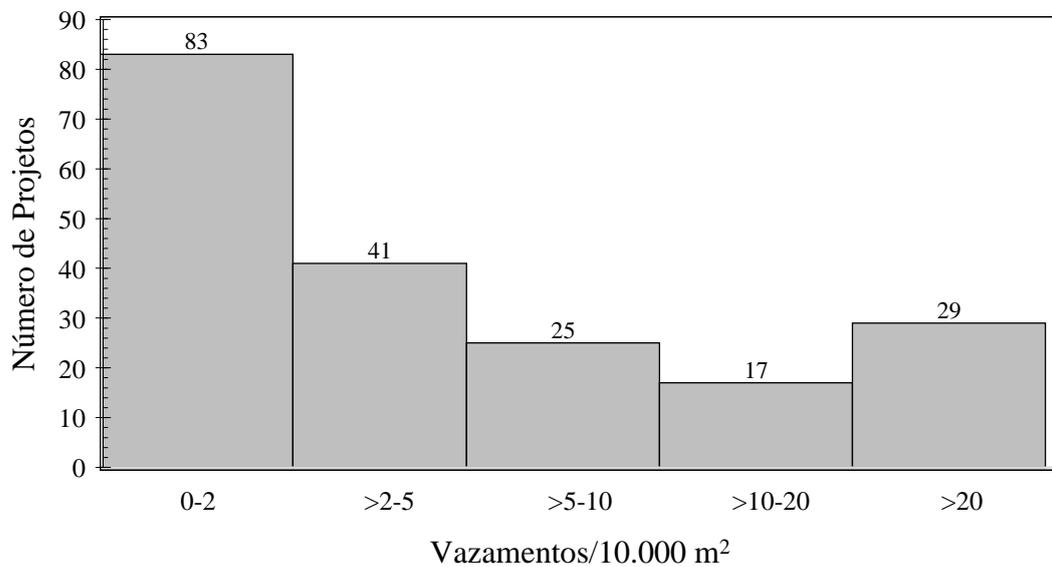
Fonte: adaptado de ZIDAN et al., 2024.

c) Histograma do número de projetos por faixa de vazamentos/10.000 m<sup>2</sup>:

O histograma apresentado na Figura 22 mostra o número de projetos inspecionados (n=195) distribuídos em diferentes faixas de vazamentos/10.000 m<sup>2</sup> (0-2; >2-5; >5-10; >10-20 e > 20). Os dados revelam uma grande concentração de projetos na faixa de 0-2, seguida pela >2-5 vazamentos/10.000 m<sup>2</sup>. Juntas, estas duas faixas acumulam cerca de 64% das lagoas inspecionadas. As faixas >5-10 e >10-20 apresentaram 25 e 17 projetos respectivamente, totalizando 21,5% das lagoas inspecionadas. Entretanto, um grupo de 29 reservatórios apresentou mais de 20 vazamentos/10.000 m<sup>2</sup>, incluindo 9 projetos com uma camada de geomembrana e 20 com dupla camada. Devido à ausência da camada de drenagem em projetos com GM simples, os vazamentos não podem ser facilmente identificados. Desta forma, a infiltração no solo não pode ser evitada, resultando em contaminação e/ou danos geotécnicos, como mencionado por THIEL; GIROUD (2011). Por outro lado, dentre os 20 projetos com dupla camada de GM que apresentaram mais de 20 vazamentos/10.000 m<sup>2</sup>, foram observados projetos com 689, 387 e 132 vazamentos/10.000 m<sup>2</sup>. Apesar de os projetos com dupla camada de GM, em geral, apresentarem camada drenante, a taxa

de vazamento não deve exceder a capacidade de remoção deste sistema, como recomendado por THIEL; GIROUD (2011). Estes autores sugerem que quando a taxa de vazamento excede a capacidade de remoção do sistema a lagoa deve ficar fora de serviço até o reparo dos vazamentos.

Figura 22 - Histograma com o número de projetos inspecionados (n=195) distribuídos em cinco faixas de vazamentos/10.000 m<sup>2</sup>: 0-2; >2-5; >5-10; >10-20 e >20. Resultados da aplicação do método dipolo, entre 2015 e 2021, em lagoas com GM e nível alto de líquido.



Fonte: adaptado de ZIDAN et al., 2024.

Os resultados de vazamentos/área de GM chamam a atenção e representam cenários muito diferentes daqueles publicados previamente na literatura. De acordo com GIROUD; BONAPARTE (1989a), a frequência de 25 furos/10.000 m<sup>2</sup> ou mais é possível quando a garantia da qualidade é limitada a um engenheiro checando o trabalho de instaladores de GM. Com base nesta afirmação, é possível que os projetos inspecionados que apresentaram números altos de vazamentos/área não devam ter implementado procedimentos efetivos de controle de qualidade durante a instalação da GM ou adotaram procedimentos operacionais inadequados nas lagoas. Como a data de início da operação dos reservatórios inspecionados não foi disponibilizada para a pesquisa, não é possível avaliar o momento em que os vazamentos surgiram. Estudos complementares, envolvendo apenas reservatórios em operação ou recém-instalados poderão avaliar as origens dos vazamentos.

Complementarmente é importante mencionar que 151 dos 195 reservatórios avaliados apresentaram pelo menos um vazamento e deste grupo 56 possuem apenas uma GM e 94 possuem dupla.

#### 1.8.2 Considerações sobre reservatórios de lixiviados no Brasil

Considerando que no Brasil a maior parte dos projetos de lagoas de lixiviados de aterros sanitários inclui apenas uma GM e não possui camada de detecção de vazamentos, os resultados apresentados por ZIDAN et al. (2024) evidenciam grande vulnerabilidade neste tipo de concepção de projeto. Desta forma, fica claro que a alta probabilidade de ocorrer um vazamento na GM durante a sua instalação ou fase de operação não está sendo considerada como premissa de projeto, conforme recomendado por THIEL; GIROUD (2011). Em função disto, as medidas de controle que poderiam ser adotadas para monitorar e controlar quaisquer vazamentos não estão aplicadas, como acontece nos projetos de dupla camada de GM que vêm sendo empregados nos Estados Unidos (THIEL; GIROUD, 2011 e EPA, 1991).

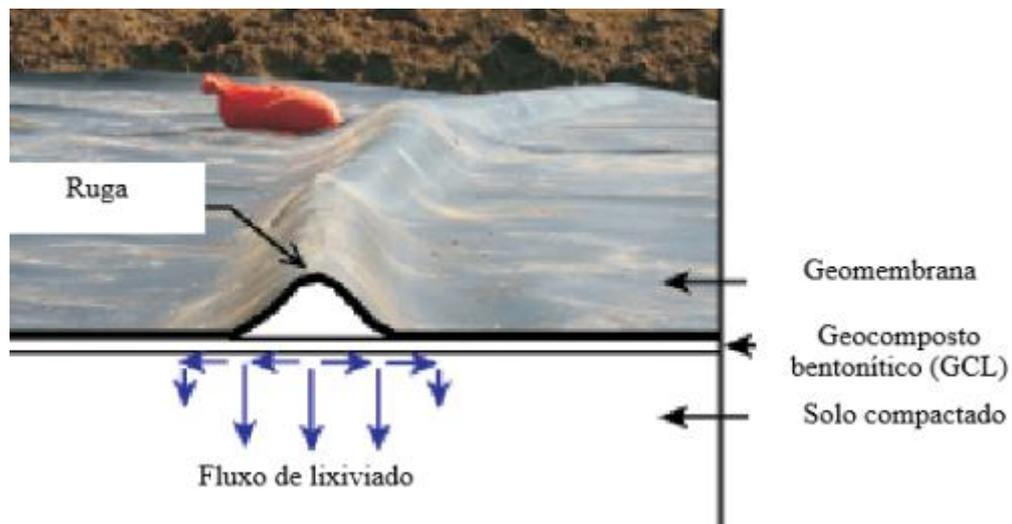
#### 1.8.3 Transporte de contaminantes e rugas

Durante o tempo de serviço da geomembrana em um sistema de barreiras composto, o transporte de contaminantes pela base de uma área impermeabilizada será controlado por processos difusivos e advectivos através da GM (EL-ZEIN; ROWE, 2008). O transporte por difusão dependerá principalmente do contaminante e pode ser significativo para alguns compostos orgânicos voláteis, mas negligenciável para muitos compostos inorgânicos como os metais pesados (ROWE et al., 2004). Um estudo publicado por LACERDA et al. (2014), mostrou que a migração do íon cloreto pela geomembrana, por meio de processo difusivo, não deve ser desconsiderada, pois apresenta valores mensuráveis e mais altos do que os do obtidos para potássio e íon amônio. O transporte advectivo, porém, irá depender do vazamento por furos na geomembrana (SAIDI et al., 2008), mas também da presença de rugas com os furos (ROWE, 2005).

Rugas são elevações verticais da geomembrana de PEAD, dentro das quais existe um espaço físico entre a geomembrana e o material abaixo dela (Figura 23). São

formadas no processo de instalação da geomembrana, quando ocorre a expansão do material pela exposição a temperaturas elevadas.

Figura 23 – Diagrama esquemático apresentando uma ruga formada na geomembrana e o fluxo de lixiviado que pode ocorrer entre ela e a camada inferior à geomembrana.



Fonte: adaptado de TAKE et al., 2007.

A principal implicação das rugas é que o vazamento de lixiviado por furos em geomembranas é maximizado quando eles estão conectados ou próximos às rugas. As equações para cálculo dos vazamentos por furos em geomembranas com rugas já foram desenvolvidas por Rowe (ROWE, 1998; ROWE et al., 2004) e demonstram a maximização dos vazamentos. As rugas propiciam o espalhamento do lixiviado por uma área muito maior do que o furo original na geomembrana.

### 1.9 Formação de bolhas em lagoas de lixiviado

Fora do Brasil, alguns autores têm relatado um problema operacional muito frequente nas lagoas impermeabilizadas com GM (PEGGS, 2022 a, b). Trata-se do descolamento do geossintético de seu contato com o solo, formando uma bolha de gás que submerge sob o líquido armazenado (GUO et al., 2016). Estas bolhas, que podem ser observadas na

Figura 24, são chamadas pela comunidade científica de “*whales*” ou “*hippos*” (THIEL, 2016), possivelmente devido à semelhança com a imagem de uma baleia ou hipopótamo, parcialmente submersos no líquido.

Figura 24 - Imagem de lagoa impermeabilizada por GM com formação de bolhas acima do nível do líquido.



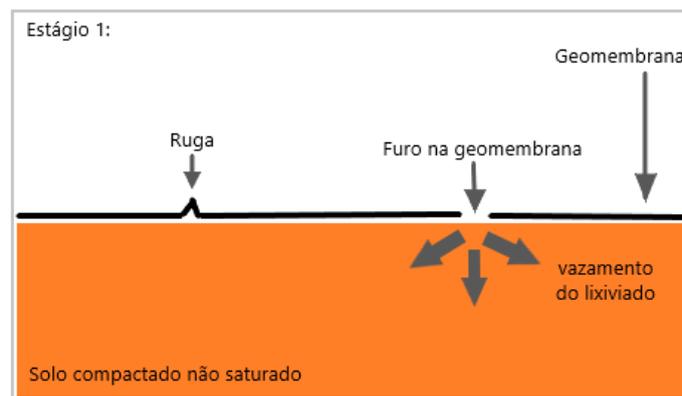
Fonte: adaptado de MARTA, 2022.

### 1.9.1 O processo de formação das bolhas e possíveis causas

Segundo MARTA (2022), a formação das bolhas acontece devido à pressão de um fluido existente embaixo da GM, o qual pode ser um gás decorrente da biodegradação de matéria orgânica presente no solo, ou ser um líquido oriundo de vazamento pela GM.

GUO et al. (2016) citam que o lixiviado de lagoas de contenção pode vazar através de furos na GM, os quais são decorrentes de diversos fatores como: defeitos de fabricação do material, manipulação dos rolos, processo de estocagem do geossintético, implantação do sistema de drenagem, tráfego de veículos sobre a camada de proteção, dentre outros. A partir do vazamento do lixiviado para o solo abaixo da GM, o ar presente nos poros ou biogás irá migrar para regiões onde há rugas ou pontos mais altos da GM. Esta condição inicial pode ser visualizada através da Figura 25.

Figura 25 - Estágio inicial do processo de formação da bolha.

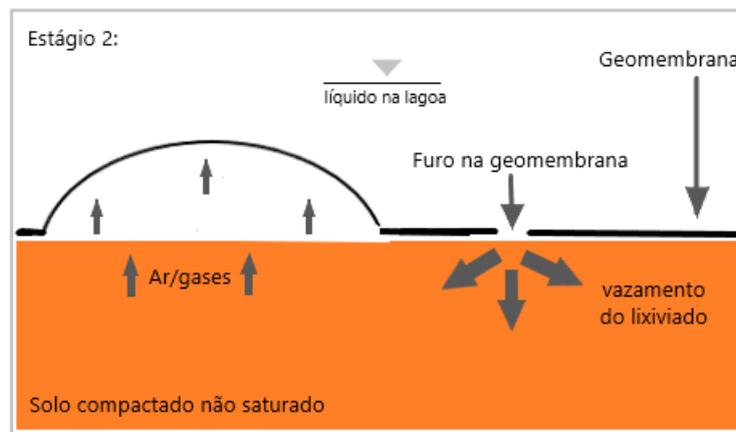


Fonte: ZIDAN; RITTER, 2023.

Segundo os mesmos autores, quando a quantidade de gás abaixo da GM possibilita que a pressão do gás supere a pressão hidráulica, a GM se desprende do solo gerando uma bolha, como pode ser observado na Figura 26.

De acordo com GUO et al. (2016), a formação da bolha irá aliviar a pressão de gás abaixo da GM, alongando a mesma e tornando-a mais fina, aumentando o risco de falha e reduzindo a capacidade de estocagem do reservatório.

Figura 26 - Estágio avançado do processo de formação da bolha.



Fonte: ZIDAN; RITTER, 2023.

KOERNER; KOERNER (2016) relataram em seu artigo outras causas possíveis para a formação das bolhas de gás, nas lagoas com geomembranas, além daquela citada por GUO et al. (2016):

- Degradação da matéria orgânica existente embaixo da GM;
- Volatilização de hidrocarbonetos em áreas contaminadas;
- Aumento do nível de água do lençol freático;
- Mudanças na pressão barométrica.

### 1.9.2 Consequências da formação das bolhas na lagoa

THIEL (2016) citou alguns problemas ocasionados pela formação da bolha nos reservatórios: perda do volume efetivo de armazenamento, abertura de uma grande área acima do solo compactado para infiltração do líquido através do furo na GM, aumento da suscetibilidade do geossintético à danos mecânicos causados pela exposição do

mesmo próxima ou acima da superfície do líquido estocado (Figura 27) e perda da capacidade de alongamento devido à tensão e deformação pela pressão do gás, até o ponto de ruptura da GM.

Figura 27 – Imagem evidenciando a presença de bolhas em lagoa impermeabilizada com geomembrana.



Fonte: THIEL et al. (2024).

ELDESOUKY et al. (2023) desenvolveram um estudo, utilizando análise tridimensional, geometricamente não linear, de elementos finitos para quantificar a deformação da GM em bolhas de reservatórios. Foram elaborados gráficos para avaliar a tensão em uma bolha ou identificar a altura máxima do líquido de modo a limitar a deformação a GM a um valor definido. Os autores ressaltam que a resistência da GM em termos de deformação admissível é importante e dependerá de diversos fatores específicos da condição em que a bolha está e esteve submetida. São citados: o tipo da GM, a temperatura, presença de qualquer situação de tensão/deformação como soldas e riscos, a duração da condição da bolha em alta tensão, a amplitude e frequência da tensão cíclica e de qualquer degradação da GM em decorrência de fatores físicos ou ambientais. Portanto, o estudo propôs que a definição de um valor admissível de tensão máxima para bolhas formada em uma condição específica deverá envolver, previamente, uma consistente avaliação de engenharia.

Considerando que na região da bolha haverá uma grande área acima do solo compactado para infiltração do lixiviado, haverá um aumento expressivo do volume de percolação do lixiviado, já que neste local a contenção do efluente passará a ser feita

apenas pela camada de solo compactado e não mais pela camada composta (GM e solo). Neste sentido, quanto maior o tempo decorrido entre a identificação da bolha e as medidas de remediação, maior deverá ser o vazamento do lixiviado para as camadas inferiores.

As ações de remediação da bolha devem envolver a substituição da GM e a troca do solo abaixo da mesma até o nível em que o solo não foi atingido pelo lixiviado. A simples substituição da GM ou remoção do biogás e reparo do furo não irá impedir que uma nova bolha seja formada futuramente no mesmo local.

### 1.9.3 Propostas para evitar a ocorrência de bolhas e para realizar reparos temporários

O artigo de KOERNER; KOERNER (2016) faz referência a duas outras publicações, sobre o tema:

- “*Underdrain Design for Geomembrane Lined Surface Impoundments to Avoid Whales/Hippos form Occurring*” (KOERNER et al., 2015);
- “*In situ Repairs of Geomembrane Bubbles, Whales and Hippos*” (KOERNER et al., 2014).

Estas publicações apresentam recomendações sobre a instalação dos drenos abaixo da GM (KOERNER et al., 2015) e orientações para reparo das bolhas em campo (KOERNER et al., 2014). São indicadas, pelos autores, alternativas para viabilizar a retirada dos gases de dentro da bolha e a retomada das condições operacionais da lagoa de forma temporária, até que o reparo definitivo possa ser desenvolvido.

Segundo GUO et al. (2016) a solução para evitar a ocorrência das bolhas é a implantação de uma camada de material permeável abaixo da GM, o qual possibilite a captura e condução lateral dos gases até os taludes e depois liberação dos mesmos para a atmosfera, através de um *vent* (respiro) instalado.

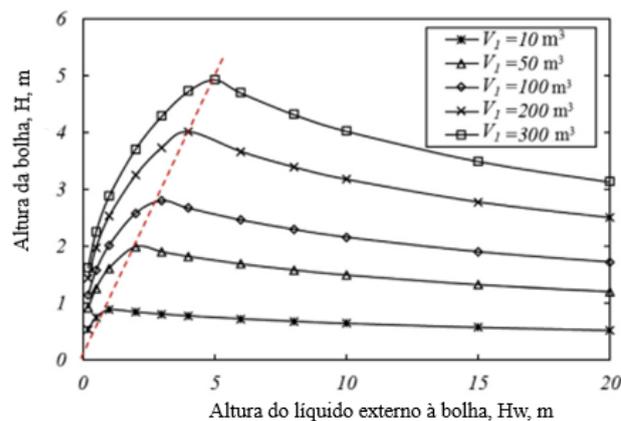
### 1.9.4 Correlações para uso prático

GUO et al. (2016) propuseram uma solução analítica para avaliar a geometria e a resistência à tração ao longo da bolha. Além disso, foram desenvolvidos estudos paramétricos para identificar a influência de fatores chaves e desenvolver gráficos de previsão para uso prático. Destacam-se três correlações apresentadas na sequência.

Correlação 1: Relação entre a altura da bolha e a do líquido externo à mesma (Figura 28).

De acordo com o gráfico apresentado nesta Figura 28, para cada volume de líquido percolado pelo furo da GM ( $V_1$ ) a curva apresenta uma altura máxima ( $H$ ) que a bolha pode atingir até ser submersa pelo volume externo. Antes de atingir sua altura máxima, a bolha vai aumentando de tamanho de forma não linear com a altura do líquido externo ( $H_w$ ). Após o pico, o líquido externo submerge e comprime a bolha, fazendo com que sua altura diminua com o aumento da altura do líquido na lagoa.

Figura 28 - Variação da altura da bolha ( $H$ ) em função da altura do líquido externo à mesma ( $H_w$ ), considerando diferentes volumes de líquido percolado  $V_1$  pelo furo da GM.



Fonte: adaptado de GUO et al., 2016.

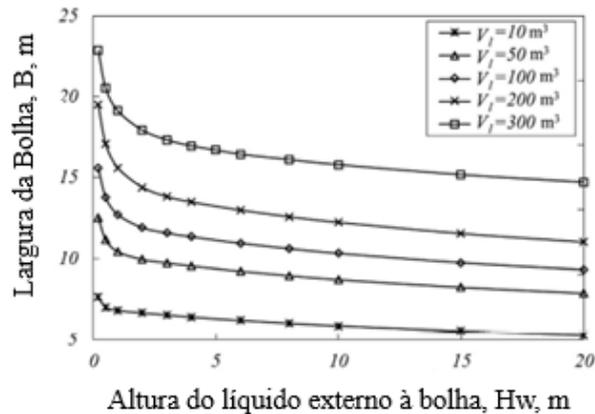
A partir desta correlação apresentada, é possível observar, que quanto maior o volume de líquido percolado através do furo (dentro da faixa avaliada), maior será a altura máxima atingida pela bolha. Além disso, pode se supor que as bolhas devem estar presentes na lagoa sem que estejam visíveis, nas situações em que o vazamento de lixiviado foi pequeno e a altura do líquido externo é significativa.

Esta informação vai ao encontro do que foi mencionado por GASSNER (2017), que apresentou o resultado de sua experiência na investigação e remediação de seis casos em que houve formação de bolhas em reservatórios com GM: as bolhas podem existir total ou parcialmente submersas nas lagoas. Em um dos casos apresentados por GASSNER (2017) foi mencionado um reservatório em que o diâmetro da bolha acima da superfície era de aproximadamente 5 m e, após esvaziamento do líquido, o diâmetro real da bolha era de 35 m.

Correlação 2: Relação entre a largura da bolha e a altura do líquido externo à mesma (Figura 29).

O gráfico apresentado na Figura 29 mostra uma redução da largura da bolha de forma não linear com o aumento da altura do líquido externo. Entretanto, podem ser identificados dois momentos: o primeiro quando a redução da largura é mais expressiva com o aumento do líquido, o que ocorre antes do ponto de submersão da bolha. Após este processo, que seria o segundo momento, a redução da largura ocorre mais lentamente com o aumento do líquido externo.

Figura 29 - Variação da largura da bolha (B) em função da altura do líquido externo à mesma ( $H_w$ ), considerando diferentes volumes de líquido percolado ( $V_l$ ) pelo furo da GM.



Fonte: adaptado de GUO et al., 2016.

Nota-se por meio da Figura 29 que, para uma mesma altura de líquido externo, a elevação do volume de percolado ocasiona aumento representativo da largura da bolha. Tal fato possui um significado importante: a área de contato do lixiviado com o solo, que era inicialmente o ponto de furo da GM, passa a ser toda a área da base da bolha formada.

Correlação 3: Influência do módulo elástico da GM.

Ainda segundo GUO et al. (2016), quanto maior for o produto entre o módulo elástico e espessura da GM menor será o tamanho da bolha formada. Isto porque uma GM mais rígida apresentará maior habilidade para confinar os gases, conferindo um tamanho menor à bolha.

### 1.9.5 Estudos de caso apresentados

GASSNER (2017) relatou sua experiência em processos de investigação e remediação de seis casos reais de formação de bolha em reservatórios impermeabilizados com GM. O autor apresenta informações sobre os projetos, possíveis causas, relata sobre períodos de observação da bolha e descreve o que foi identificado após o rebaixamento do nível do reservatório. As causas apontadas para a formação da bolha foram diversas, envolvendo não somente a elevação do nível do lençol freático e furos na GM. Em nenhum dos casos relatados houve apresentação de resultados de análise de solo, água ou de caracterização da GM danificada. As ações de remediação foram distintas em cada um dos cenários.

Podem ser citadas as seguintes medidas relacionadas à remediação dos casos apresentados: troca da GM no local onde houve formação da bolha e o geossintético apresentou comprometimentos relacionados à sua estrutura (por exemplo, deformação); troca de GM associada à recomposição do solo compactado abaixo da mesma; inspeção da GM, por método dipolo, para localização de furos no reservatório e a correção dos mesmos, dentre outras (GASSNER, 2017).

Ao final de cada caso o autor cita as lições aprendidas. A seguir, apresentam-se as lições mais relevantes:

- Quando a deformação da GM ocorre em decorrência de uma grande bolha é necessária a reposição do *liner* em função da extensão da deformação;
- O tamanho da bolha formada pode ser muito maior do que o que se pode ver na superfície do líquido estocado;
- Uma bolha grande pode ser formada a partir de um pequeno furo na GM, especialmente se esta estiver sobre solo compactado, onde o líquido abaixo da GM ocasiona a flutuação do polietileno. A presença do gás ou do ar embaixo da GM irá posteriormente aumentar a probabilidade de formação da bolha;
- As bolhas no *liner* podem ser formadas pelo ar preso embaixo da GM, mas este tipo de bolha não tende a aparecer acima da superfície do líquido;
- Um vazamento através da GM pode levar muito tempo para formar a bolha. A formação da bolha é influenciada pelo formato geométrico da GM e a

existência de interferências na superfície da mesma. A presença de rugas pode iniciar a formação da bolha.

Por fim, GASSNER (2017) apresenta algumas conclusões muito relevantes:

- A taxa de formação da bolha pode ser baixa ou alta e geralmente está relacionada à taxa de vazamento pela GM;
- Algumas bolhas são formadas pela combinação de líquido (oriundo da lagoa) e ar ou gás e outras se formam apenas pela presença do líquido abaixo da GM;
- A formação da bolha não é sempre decorrente de furo na GM, mas pode estar relacionada à uma alta pressão abaixo de uma GM intacta;
- Em geral as bolhas se formam em *liners* compostos por GM e solo compactado de baixa permeabilidade, onde a taxa de dissipação do líquido e do ar é baixa. Por isso, a inclusão de drenos abaixo da GM reduz a probabilidade de formação e o tamanho das bolhas.

### **1.10 Aterro Metropolitano de Gramacho (AMG)**

O Aterro Metropolitano de Gramacho (AMG) foi projetado em 1974 e operou de forma desordenada de 1977 a 1995, em uma área de 1,4 milhões de metros quadrados, localizada no município de Duque de Caxias, estado do Rio de Janeiro (GIORDANO, 2003). Foi implantado sobre um depósito argiloso de mangue, localizado no estuário do rio Iguaçu (BARBOSA, 1994), sendo margeado pelos rios Sarapuí e Iguaçu e pela Baía de Guanabara, conforme mostra a Figura 30.

Segundo BARBOSA (1994), a operação do AMG envolvia espalhamento e compactação dos resíduos, mas não incluía sistema de coleta e tratamento para o lixiviado produzido, o qual fluía diretamente para o mangue que o cercava. Não existia drenagem de biogás e por isso eram visíveis os pontos de escape do mesmo e pequenos incêndios, conforme mostra a Figura 31. A operação era ainda prejudicada pela presença de inúmeros catadores no local.

Figura 30 - Imagem aérea do Aterro Metropolitano de Gramacho (AMG) destacando os corpos hídricos que o cercam: rios Sarapuí e Iguaçú e a Baía de Guanabara.



Fonte: adaptado do Google Earth, 2020.

A área recebeu resíduos sólidos urbanos, resíduos industriais e resíduos do serviço de saúde, sendo que parte deles foi queimada em focos de incêndio no local. Segundo GIORDANO (2003) os municípios atendidos pelo AMG eram Rio de Janeiro (71% do lixo recebido), Duque de Caxias (11%) e Nilópolis, São João de Meriti e Queimados (os três com 18%) e Nova Iguaçu, apenas para a disposição de resíduos do serviço de saúde.

Em 1991 firmou-se um convênio entre a COPPE-UFRJ e a COMLURB para o desenvolvimento de estudos sobre o aterro e o lixiviado, visando a elaboração de um projeto de recuperação da área, incluindo tratamento de lixiviado e limitações técnicas para o alteamento das pilhas de resíduos (BARBOSA, 1994). O resultado deste estudo foi a base para o desenvolvimento de um projeto básico, elaborado posteriormente pela empresa IESA-Internacional Engenharia S.A. (BARBOSA, 1994).

O manguezal do entorno da área de disposição dos resíduos apresentava-se bastante degradado até 1996, conforme pode ser visto na Figura 31, quando foi construída uma vala periférica que funcionava como canal coletor do lixiviado. Esta medida era parte das ações previstas no projeto de recuperação da área.

Figura 31 - Imagens do AMG nos anos de (a) 1980 e (b) 1995, antes da implantação de medidas para controle da área, implantadas em 1996 pela COMLURB.



(a)



(b)

Fonte: FERREIRA, 2021.

De 1996 a 2012 o AMG operou com medidas de controle que envolviam: drenagem e tratamento de lixiviado, drenagem e queima de biogás, balança para pesagem dos veículos, cadastramento dos catadores e um programa e recuperação do manguezal.

Em julho de 2012, com o início da operação do Centro de Tratamento de Resíduos (CTR-Rio), na cidade de Seropédica (estado do Rio de Janeiro), o AMG foi encerrado. Desde então, recebeu cobertura de solo final, plantio de vegetação, tratamento de biogás (*flares*) e de lixiviado. A

Figura 32 apresenta uma imagem do AMG no ano de 2023.

Figura 32 - Imagem aérea do AMG.



Fonte: STATLED BRASIL, 2023.

O AMG possui atualmente algumas lagoas de armazenamento e tratamento de lixiviados, porém, apenas duas delas são impermeabilizadas com uma camada de GM: lagoas sul e de montante. As demais possuem camada de impermeabilização com solo argiloso apenas. A Figura 33 apresenta uma planta do AMG com a localização das lagoas de lixiviado existentes.

Figura 33 - Imagem do AMG com a localização das lagoas de armazenamento de lixiviado.



Fonte: adaptado de STATLED BRASIL, 2023.

Muitos estudos já avaliaram as características do lixiviado do AMG. A Tabela 3 apresenta alguns destes resultados.

Tabela 3 - Composição do lixiviado do AMG.

Estudo	pH	Condutividade de (mS/cm)	Cloretos (mg/L)	DQO (mg/L)	Nitrogênio amoniacal (mg/L)
BARBOSA (1996) <sup>2</sup>	6,40	12,70	704,5	n.d. <sup>1</sup>	1.330
RITTER (2000) <sup>2</sup>	n.d. <sup>1</sup>	n.d. <sup>1</sup>	5.735	n.d. <sup>1</sup>	1.561
RITTER (2001) <sup>2</sup>	8,80	25,70	5.398	n.d. <sup>1</sup>	1.519
RITTER (2003) <sup>2</sup>	7,90	24,40	4.367	n.d. <sup>1</sup>	1.815
FERNANDES (2005) <sup>2</sup>	8,30	18,00	4.175	2.665	1.116
EDUARDO (2007)	8,10	22,00	4.480	3.085	1.330
LIMA (2016)	8,47	3,42	4.958	2.998	3.050

<sup>1</sup>dados não disponibilizados

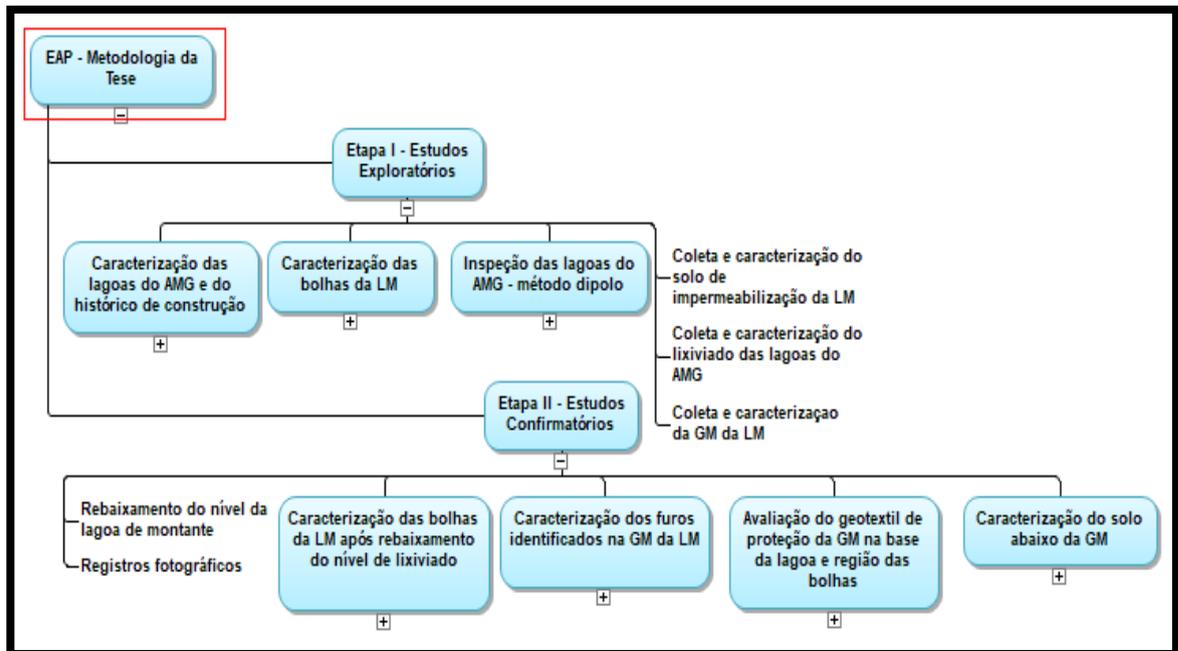
<sup>2</sup> dados adaptados de EDUARDO (2007)

## CAPÍTULO 2: METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa baseou-se no estudo de caso das duas lagoas existentes no Aterro Metropolitano de Gramacho (AMG) e que foram impermeabilizadas com geomembrana: as lagoas sul (LS) e de montante (LM). Foram desenvolvidas atividades de campo em agosto/2023 e em junho/2024, além de atividades laboratoriais para análise das amostras coletadas.

Cronologicamente as atividades da metodologia foram segmentadas em dois momentos: estudos exploratórios (etapa I), que contemplam a primeira parte dos trabalhos de campo, quando as lagoas se encontravam com líquido em nível operacional e os estudos confirmatórios (etapa II), iniciados após o rebaixamento do líquido na LM. Estes dois momentos foram organizados em uma Estrutura Analítica de Projeto (EAP) que contempla os principais pacotes de atividades envolvidos na pesquisa. Esta estrutura visa facilitar o entendimento sobre a metodologia completa deste trabalho. A Figura 34 apresenta um extrato da EAP e o detalhamento da mesma está apresentado no Anexo A.

Figura 34 - Extrato da Estrutura Analítica de Projeto (EAP) referente à metodologia desta pesquisa.



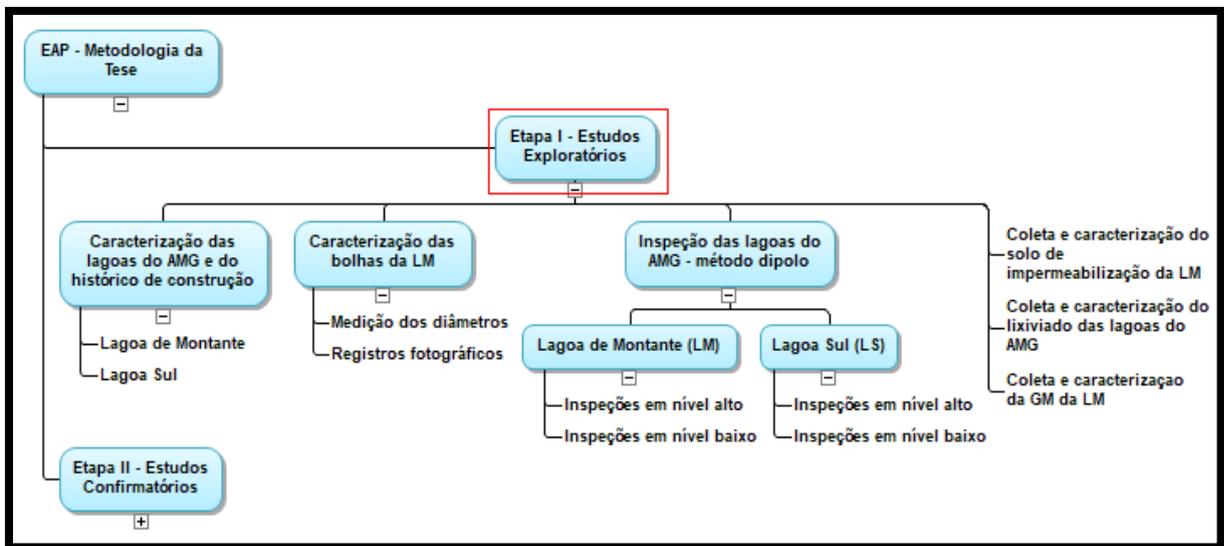
Fonte: a autora, 2024.

Nos itens a seguir está apresentado o detalhamento de cada uma das etapas das atividades definidas na Figura 34.

## 2.1 Etapa I: estudos exploratórios

Esta etapa dos estudos iniciou-se no planejamento das primeiras atividades de campo que foram realizadas no AMG. A Figura 35 apresenta uma visão geral do que foi desenvolvido na etapa I dos estudos. Na sequência segue o detalhamento de cada item previsto.

Figura 35 - Visão geral das atividades desenvolvidas na etapa I dos estudos.



Fonte: a autora, 2024.

### 2.1.1 Caracterização das lagoas do AMG e levantamento do histórico de construção

Com o objetivo de caracterizar as duas lagoas do escopo deste estudo, foram feitas consultas aos atuais responsáveis pela gestão do AMG. Não foram disponibilizados documentos históricos com evidências do perfil do sistema de barreiras das lagoas. Entretanto, algumas informações sobre o perfil construtivo foram passadas por colaboradores que atuavam no AMG desde antes de seu encerramento. Utilizou-se o aplicativo Google Earth Pro para levantar informações sobre o período de construção das lagoas. O histórico de imagens está apresentado no item de resultados.

### 2.1.2 Caracterização das bolhas existentes na lagoa de montante (LM)

A caracterização das bolhas da LM, nesta etapa I dos estudos, baseou-se em registros fotográficos e medição das dimensões externas (acima do nível de lixiviado).

Na data em que foram feitos os registros das bolhas da LM (agosto/23), o nível do medidor, posicionado na região de jusante da lagoa, indicava que o líquido encontrava-se a 1 metro da crista do talude neste ponto.

Foram feitos registros fotográficos das bolhas presentes na LM. Além disso, efetuaram-se medições das dimensões da superfície exposta da GM de cada bolha, com auxílio de uma trena, conforme apresentado na Figura 36. As bolhas foram catalogadas com registro aproximado de seu formato, dimensões e posição em relação às marcações feitas na crista do talude da lagoa.

Figura 36 - Imagens do levantamento das dimensões das bolhas.



Fonte: a autora, 2023.

### 2.1.3 Inspeção das lagoas do AMG pelo método dipolo

As inspeções em campo foram realizadas após uma visita prévia no AMG (agosto/23) para marcação do *grid*, a cada 1 metro, em torno do perímetro das duas lagoas: sul e de montante. Foram feitas marcações com tinta diretamente na GM, as

quais funcionaram como referencial de localização para todo este trabalho, haja vista que não estavam disponíveis levantamentos topográficos prévios das lagoas.

Foram realizadas medições de nível raso, feitas por um único operador, e de nível alto, quando dois operadores atuaram simultaneamente. Utilizaram-se: detector eletrônico de vazamento (Figura 37), sondas de varredura submersível, transformador de corrente elétrica com tensão variável e um gerador para fornecimento de energia.

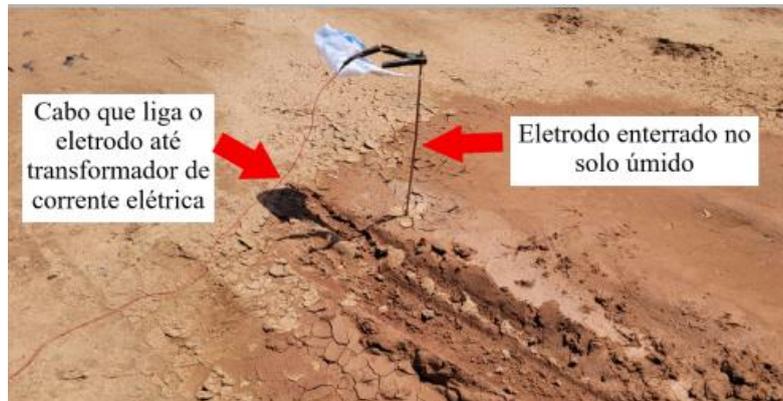
Figura 37 – Imagem do detector e da sonda de nível alto.



Fonte: a autora, 2024.

Um eletrodo foi instalado no solo abaixo da GM (Figura 38) e o outro posicionado dentro da lagoa. Pelo menos duas vezes por dia era realizado o teste com o furo artificial para verificar o funcionamento do sistema.

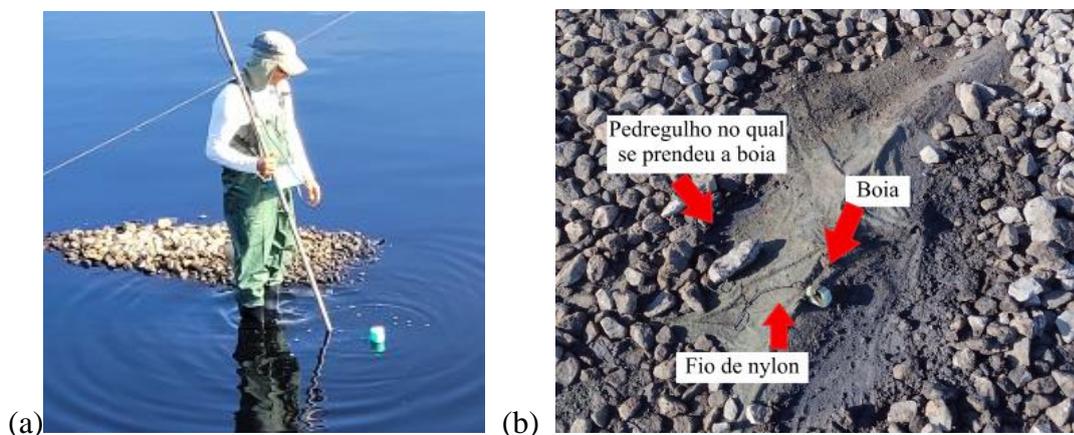
Figura 38 – Imagem do eletrodo instalado no solo abaixo da GM



Fonte: a autora, 2024.

Nas medições de nível raso, o operador andou pela lagoa movimentando a sonda até ouvir um sinal sonoro indicando um possível vazamento. Neste local, uma boia foi amarrada por um fio de nylon a um dos pedregulhos existentes na base da lagoa de montante (os pedregulhos que estavam aplicados sobre o geotêxtil da lagoa) e a sacos de areia na lagoa sul. O objetivo destas boias era possibilitar a identificação dos vazamentos após o rebaixamento o nível do lixiviado da lagoa (vide Figura 39). Usualmente estas boias ficam presas a sacos de areia posicionados no fundo da lagoa, funcionando como uma espécie de âncora, como foi feito na lagoa sul.

Figura 39 – Imagens que evidenciam: (a) boia em nível de lixiviado operacional e (b) boia com nível de lixiviado rebaixado na LM, mostrando que a mesma estava presa ao fundo por um fio de nylon preso a um pedregulho existente na base da lagoa.



Fonte: a autora, 2023 e 2024.

Nas medições de nível alto, cada um dos operadores posicionou-se em uma das extremidades da lagoa e a sonda, presa a um cabo de nylon e a um cabo elétrico, era movimentada de um lado a outro da lagoa. Quando sinais indicando vazamento ocorriam nas medições de nível alto, uma marcação com tinta era feita nas bordas da lagoa naquela direção.

#### 2.1.3.1 Lagoa sul (LS)

O nível de lixiviado nesta lagoa possibilitou a realização da inspeção utilizando o equipamento adequado para a avaliação da GM com nível alto de líquido e, posteriormente, a confirmação dos pontos de vazamento encontrados, utilizando-se a sonda de inspeção em nível raso (Figura 40). Como antes do início da inspeção não se tinha certeza sobre a regularidade da cota de base da lagoa, optou-se por realizar a inspeção com os operadores do lado de fora da lagoa em um primeiro momento. Após esta etapa, verificou-se que seria possível que um dos operadores entrasse na lagoa para validar os pontos de vazamento com a sonda de nível raso.

O nível de líquido nos dias da inspeção era de cerca de 1 metro da base de acordo com medidor de nível local (posicionado na face mais próxima do acesso ao AMG).

Figura 40 - Inspeção na LS aplicando método dipolo com sonda para medição em nível raso.



Fonte: a autora, 2023.

### 2.1.3.2 Lagoa de montante (LM)

O nível de líquido nos dias da inspeção da LM era de 1 metro abaixo da crista do talude onde está posicionado o medidor de nível local (face da lagoa que fica próxima da Estação de Tratamento de Lixiviado do AMG).

Existe um desnível na lagoa do seu ponto de montante onde estimou-se que o nível de lixiviado estivesse a 0,5 m acima da base e o ponto de jusante onde o líquido deveria estar com cerca de 3 a 4 m de altura, acima da base (vide indicações na Figura 41). Esta foi a condição do nível do lixiviado da LM quando da realização da inspeção e era a condição operacional desta lagoa.

Em função dos diferentes níveis de lixiviado na lagoa adotaram-se as duas modalidades de inspeção: nível alto e raso. Na região do ponto de montante da lagoa (indicada na Figura 41), onde estão posicionadas as bolhas na GM, realizou-se a inspeção utilizando o equipamento adequado para nível raso (região delimitada por duas linhas laranjas, na Figura 41).

Figura 41 - Imagem aérea da LM com indicação dos pontos de montante e jusante da lagoa.

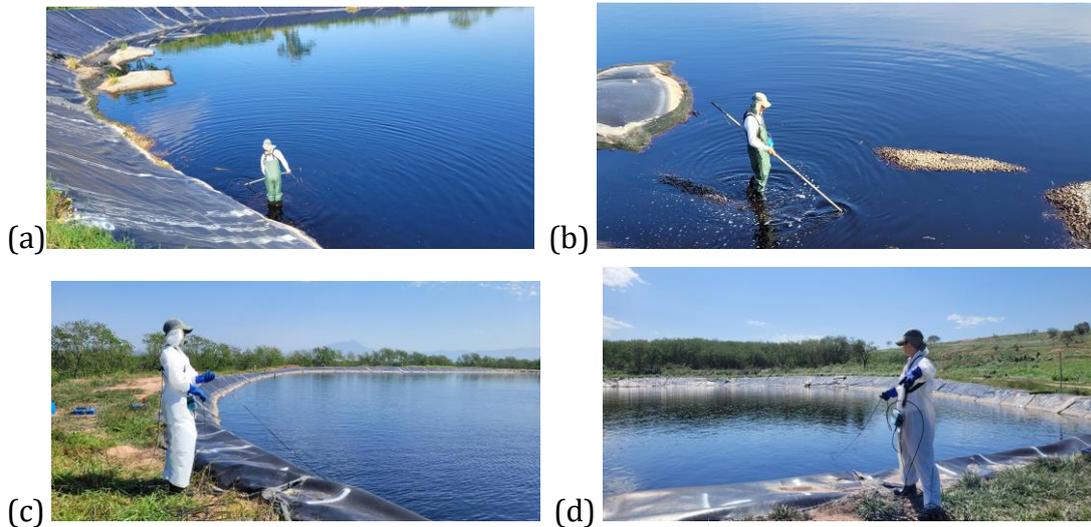


Fonte: adaptado do Google Earth, 2023.

Nesta região delimitada pela linha laranja (Figura 41), o operador entrou na lagoa com o equipamento de inspeção, conforme mostram a Figura 42 (a) e (b). Fora desta

região, a área da GM foi avaliada utilizando-se os equipamentos para inspeção em nível alto, conforme mostram a Figura 42 (c) e (d).

Figura 42 - Imagens das inspeções na LM com equipamento para nível raso (a) e (b) e nível alto (c) e (d) de líquido.



Fonte: a autora, 2023.

O *grid* adotado para a inspeção utilizou como base as marcações feitas com tinta na GM, em toda a borda da LM (conforme mencionado no item 2.1.3). Deste modo, a lagoa foi subdividida em quatro lados: A, B, C e D, os quais receberam uma numeração sequencial, que pode ser observado na Figura 43.

As seguintes sequências de varredura com a sonda de nível alto foram:

- Varredura da sonda por 80 m com um operador posicionado no lado A e o outro no lado C, fazendo a avaliação do lado A (0-170);
- Varredura com um operador posicionado no lado B (de 0 a 117) e o outro no lado D varrendo 60 m nas proximidades do lado B. Esta varredura continuou até o ponto 20 do lado C, inspecionando a região próxima a este lado C;
- Inspeção com um operador no lado C e outro no lado A e sonda varrendo 70 m do lado C (0-170);
- Varredura de 25 m do lado D (0-22) com um operador deste lado e outro do lado B.

Figura 43 - Imagem aérea da LM com indicação do grid definido para varredura pelo método dipolo nos trechos em que a lagoa estava com nível alto.



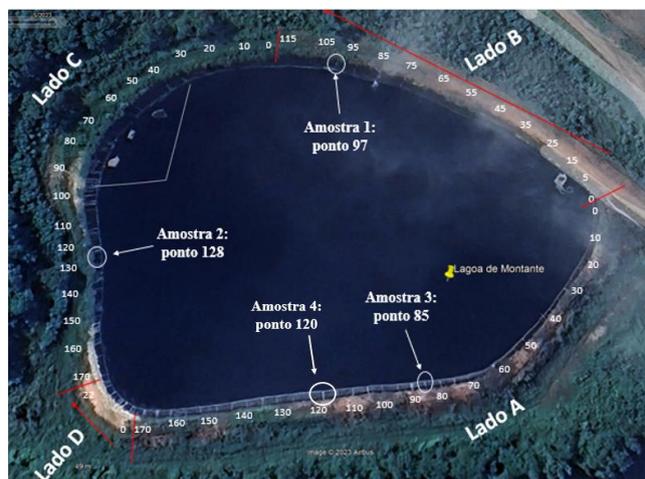
Fonte: adaptado do Google Earth, 2023.

#### 2.1.4 Coleta e caracterização do solo abaixo da LM

Com o objetivo de caracterizar o solo empregado no sistema de barreiras da LM retiraram-se 3 amostras de cerca de 2 kg da região da ancoragem da GM de PEAD nos pontos 85, 97 e 128 (Figura 44). Além disso, no ponto 120, foi retirada uma amostra de solo (amostra 4) de cerca de 30 kg, para realização do ensaio de permeabilidade além dos de caracterização.

Segundo informado por funcionário que atua no AMG desde antes da construção da LM, o solo da área da ancoragem da geomembrana seria o mesmo que foi aplicado abaixo da geomembrana, constituindo a camada de solo compactado.

Figura 44 - Imagem da LM com a indicação dos pontos de coleta das amostras de solo compactado.



Fonte: adaptado do Google Earth, 2023.

A imagem da Figura 45 evidencia o local de onde foi retirada uma das amostras de solo para ensaios de caracterização e permeabilidade.

Figura 45 - Imagem do ponto de coleta do solo compactado empregado no sistema de barreiras da LM.



Fonte: a autora, 2023.

Os ensaios de caracterização e permeabilidade do solo foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e estão apresentados na Tabela 4, juntamente com a metodologia empregada.

Tabela 4 - Ensaios realizados com as amostras do solo abaixo da GM da LM.

Descrição	Método adotado	ID mostras ensaiadas
Granulometria	NBR 7.181 (ABNT, 2018a)	1,2, 3 e 4
Limite de liquidez	NBR 6.459 (ABNT, 2018b)	1,2, 3 e 4
Limite de Plasticidade	NBR 7.180 (ABNT, 2016a)	1,2, 3 e 4
Índice de Plasticidade	NBR 7.180 (ABNT, 2016a)	1,2, 3 e 4
Classificação do solo	Sistema Unificado <sup>1</sup>	1,2, 3 e 4
Compactação	NBR 7.182 (ABNT, 2016b)	4
Permeabilidade	NBR 14.545 (ABNT, 2021b)	4

<sup>1</sup> A classificação criada originalmente pelo Prof. Casagrande e atualmente utilizada pelos geotécnicos que trabalham em barragens de terra (PINTO, 2006).

#### 2.1.5 Coleta e caracterização do lixiviado das lagoa sul (LS) e de montante (LM)

Uma amostra de lixiviado, composta por frações coletadas em quatro pontos distintos de cada lagoa, foi preparada e encaminhada ao Laboratório de Engenharia

Sanitária da UERJ para análise em agosto/2023. Frascos de plástico foram utilizados para o acondicionamento do lixiviado, conforme imagens apresentadas na Figura 46 (a) e (b).

Figura 46 - Imagens das amostras de lixiviados das lagoas: (a) de montante e (b) sul.



Fonte: a autora, 2023.

Os parâmetros estabelecidos para a caracterização do lixiviado e as respectivas metodologias analíticas seguem apresentados na Tabela 5.

De forma complementar, mais duas amostras de lixiviado foram coletadas na lagoa de montante em junho/2024. Os ensaios desenvolvidos nestas amostras foram os mesmos apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaio de caracterização do lixiviado das lagoas sul e montante.

<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>	<b>Equipamento</b>
pH	4500-H-B <sup>1</sup>	eletrodo Quimis/QH0045
Nitrogênio amoniacal	4500-NH <sub>3</sub> D <sup>1</sup>	eletrodo seletivo (Orion 290 A)
Cloreto	4500-Cl-B <sup>1</sup>	NA (titulação)
Condutividade	2510 B <sup>1</sup>	eletrodo (MS TecnoPON/mCA)
DQO	5220 D <sup>1</sup>	espectrofotômetro Hach DR 2800-COD digital reactor
Sódio	3500 – Na B <sup>1</sup>	fotômetro de chamas analyser 910 M
Potássio	3500 – K B <sup>1</sup>	fotômetro de chamas analyser 910 M

<sup>1</sup> APHA, 2012.

#### 2.1.6 Coleta e caracterização da geomembrana de ancoragem da LM

Com o objetivo de caracterizar a GM de PEAD utilizada no sistema de barreiras da LM retiraram-se 3 amostras de aproximadamente 50 x 30 cm do material na região da ancoragem da lagoa de montante (LM). Os pontos de onde foram coletadas as

amostras foram os mesmos 85, 97 e 128 utilizados para coleta do solo e indicados na Figura 44. As imagens apresentadas na Figura 47 (a) mostram o local de onde foi coletada uma das amostras de GM, a qual estava posicionada abaixo do geotêxtil de proteção. A GM não estava exposta à radiação ultravioleta (UV). A Figura 47 (b) apresenta a amostra já coletada da GM.

Figura 47 - Imagens que evidenciam: (a) o local de coleta da GM da LM e (b) uma amostra já coletada da GM e com a devida identificação.



Fonte: a autora, 2023.

As amostras da GM de PEAD da LM foram encaminhadas ao Laboratório de Geossintéticos da USP-São Carlos para a realização dos ensaios definidos na Tabela 6. Todos estes ensaios realizados estão previstos na norma GM-13 (GRI, 2023).

Os resultados dos ensaios de resistência ao puncionamento foram obtidos a partir da média aritmética dos valores obtidos para dois corpos de prova. Já os resultados de resistência à tração foram calculados a partir da média aritmética dos valores obtidos para a transversal e longitudinal em três corpos de prova.

Tabela 6 - Ensaio de caracterização da GM da LM.

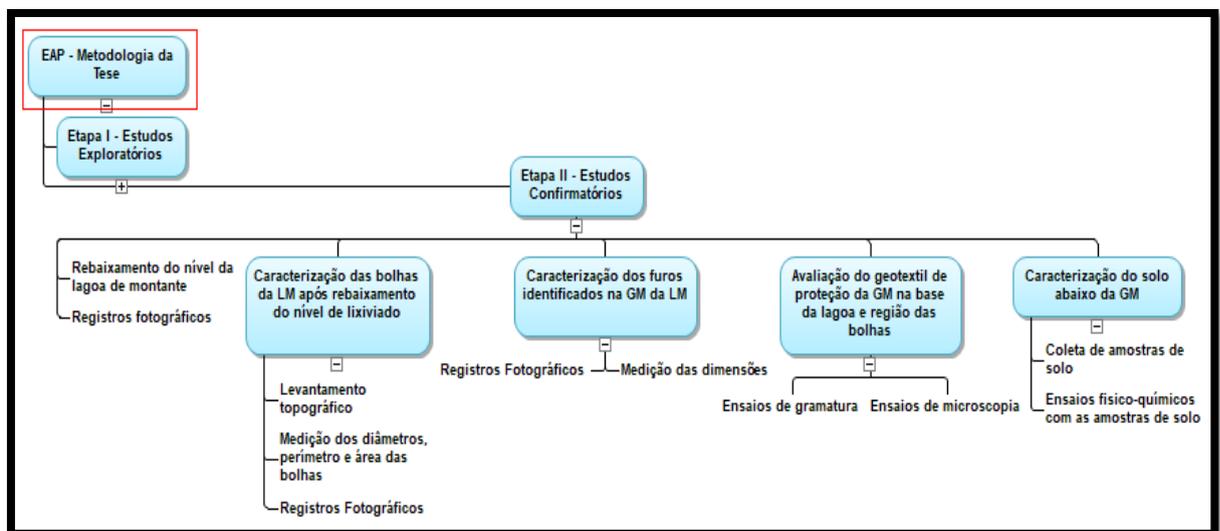
<b>Descrição</b>	<b>Norma de referência</b>
Resistência ao puncionamento	D 4833 (ASTM, 2020a)
Alongamento no escoamento	D6693, tipo IV (ASTM,2020b)
Alongamento na ruptura	D6693, tipo IV (ASTM,2020b)
Resistência no escoamento	D6693, tipo IV (ASTM,2020b)
Resistência na ruptura	D6693, tipo IV (ASTM,2020b)

## 2.2 Etapa II: estudos confirmatórios

Os estudos confirmatórios, desenvolvidos a partir das atividades de campo de junho/2024, envolveram atividades relacionadas apenas à lagoa de montante.

A Figura 48 apresenta o detalhamento das atividades desenvolvidas na etapa II dos estudos. Posteriormente, seguem descritos os materiais e métodos empregados em cada uma destas atividades.

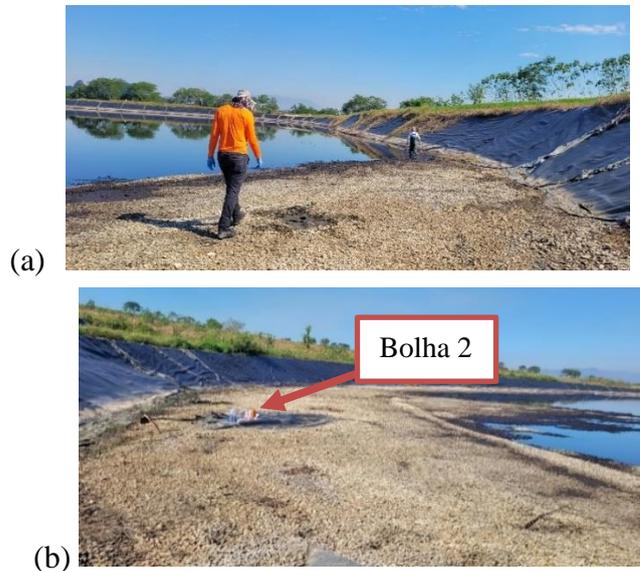
Figura 48 - Visão geral das atividades desenvolvidas na etapa II dos estudos.



Fonte: a autora, 2024.

A segunda etapa dos trabalhos de campo foi iniciada após o rebaixamento do nível de lixiviado da lagoa de montante, o que aconteceu em junho/2024, ou seja, 9 meses após o desenvolvimento das atividades de campo realizadas na etapa I deste estudo. Não foi possível o esvaziamento completo da lagoa, pois a funcionalidade da mesma, de alimentação da Estação de Tratamento de Lixiviado do AMG, precisou ser mantida durante o desenvolvimento dos trabalhos. A Figura 49 mostra a condição da LM em que foram desenvolvidos os trabalhos de campo da etapa II: parte da base da lagoa na região das bolhas ficou exposta e o restante da lagoa ficou com líquido.

Figura 49 - Imagens da região das bolhas da LM após o rebaixamento do nível do lixiviado: (a) face direita da região das bolhas e (b) face esquerda da região das bolhas.



Fonte: a autora, 2024.

Durante a primeira etapa dos trabalhos (etapa I), havia a intenção da equipe gestora do AMG de que fosse construída uma nova lagoa na área. Este novo reservatório possibilitaria a manutenção das atividades operacionais da LM enquanto esta passasse por processo de recuperação, objetivando o reparo dos vazamentos na GM. Neste sentido, havia a possibilidade da presente pesquisa acompanhar a exumação da GM durante o processo de recuperação da LM.

Entretanto, considerando o tempo necessário para obtenção da autorização ambiental para construção da nova lagoa e aprovação de orçamento destinado à obra, não foi possível contemplar o acompanhamento da exumação da LM nesta pesquisa. As obras de construção da nova lagoa estão previstas para serem concluídas em abril/2025 e, em função disto, a previsão para a realização dos reparos na LM, de acordo com a equipe de gestora do AMG é posterior a esta data.

Apesar da impossibilidade de acompanhar a exumação completa da LM, a equipe de gestão do AMG autorizou a realização desta segunda etapa dos trabalhos de campo. Neste sentido, o nível da LM foi reduzido de modo a possibilitar a identificação dos pontos de vazamento na GM da LM, ou seja, o geossintético ficou descoberto de líquido por cerca de 7 dias, no mês de julho/2024, para os registros dos furos existentes e coleta de amostras de solo que fossem viáveis de serem coletadas sem que houvesse novos danos a GM.

### 2.2.1 Caracterização das bolhas da LM após o rebaixamento do nível do lixiviado

Durante o processo de rebaixamento do nível do lixiviado na LM, foi realizado levantamento planialtimétrico na região das bolhas. As atividades foram desenvolvidas por um topógrafo da empresa JF Topografia ao longo de um dia de trabalho. Foi utilizado o equipamento GNSS CHC I50 – (GPS RTK I50) para o levantamento de campo. O processamento inicial dos dados (coordenadas), obtidos no levantamento de campo foi feito por meio do “Serviço online para pós processamento de dados GNSS do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE-PPP)”. Posteriormente utilizou-se o software Topograph 98SE versão 4.10 para a segunda etapa de processamento dos dados (pontos de cota). Para a confecção das plantas foi utilizado o software Autocad 2024 na versão em inglês.

A Figura 50 apresenta imagens tiradas durante os trabalhos de levantamento planialtimétrico. O serviço foi desenvolvido em duas condições diferentes do nível de lixiviado na LM com o objetivo de possibilitar a avaliação da alteração do perfil das bolhas com a mudança do nível da lagoa. Além disso, realizou-se também o mapeamento dos pontos de vazamento identificados na inspeção de agosto/2023, para identificação das coordenadas e inclusão nas plantas do levantamento planialtimétrico.

Figura 50 - Imagens do levantamento planialtimétrico da região das bolhas, desenvolvido durante o processo de rebaixamento do nível de lixiviado na LM: (a) mostra levantamento em cima da bolha e (b) apresenta etapa do levantamento da base da LM.



Fonte: a autora, 2024.

### 2.2.2 Caracterização dos furos identificados na GM da LM

Com o rebaixamento do nível do líquido da LM foi possível encontrar os pontos de vazamentos identificados na inspeção da GM. Foi feita uma busca pelas boias instaladas à época da inspeção. Para os furos encontrados, avaliou-se também a condição do geotêxtil posicionado em cima da GM de modo a verificar se estava danificado ou não. Foram feitos registro fotográfico e a medição do tamanho de cada um dos furos com uso de uma trena. Além disso, realizou-se uma classificação do tipo do furo empregando a seguinte nomenclatura: corte linear, corte irregular e punção. Além disso, sugeriram-se as causas prováveis para cada um dos furos pela comparação das imagens visualizadas em campo (no AMG) com furos similares identificados em inspeções de geomembrana coberta com solo (Evolui, 2019-2023).

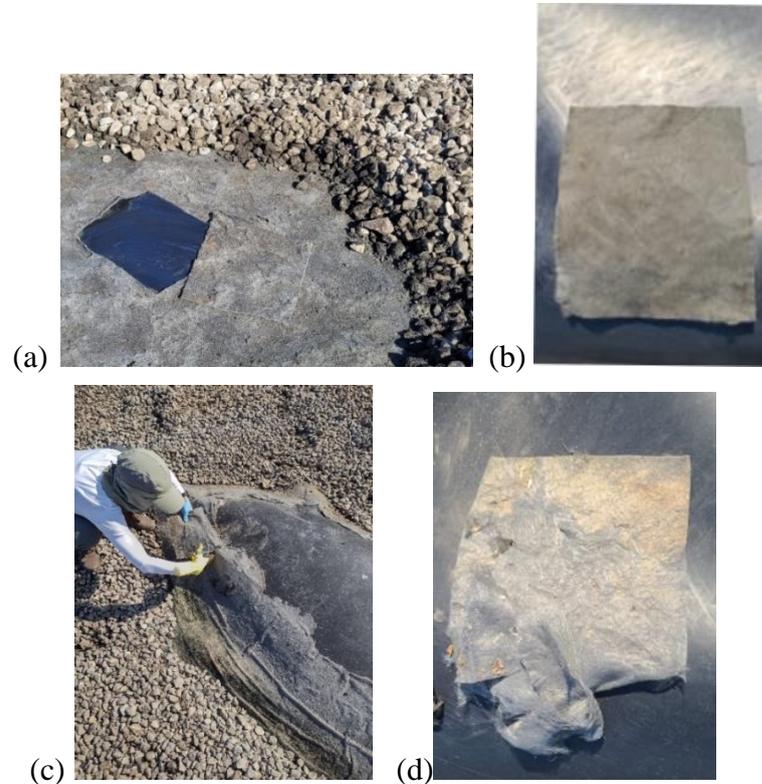
Importante mencionar que esta etapa de caracterização dos furos foi feita após finalizado o processo de rebaixamento do lixiviado da LM até a condição limite permitida pela equipe de gestão do AMG. Nesta condição, a lagoa ainda atuava como reservatório de armazenamento para a Estação de Tratamento de Lixiviados do AMG.

### 2.2.3 Caracterização do geotêxtil de proteção da GM na base da lagoa e região das bolhas

Para a caracterização do geotêxtil de proteção da GM, foram retiradas duas amostras do material, com dimensões aproximadas de 15 x 20 cm, em dois pontos da base da LM, sendo um dos locais onde foi encontrado um furo na GM e o outro sem a presença de furo. A amostra retirada no local onde havia um furo não era do ponto exato onde o furo foi localizado, mas do entorno. Além disso, foram coletadas duas outras amostras do geotêxtil presente em cima das bolhas 2 e 5. A planta com a localização dos pontos de coleta das amostras de geotêxtil está apresentada no capítulo de resultados, pois foi desenvolvida com base no levantamento planialtimétrico da área.

As imagens que mostram duas das amostras coletadas e os locais da coleta estão apresentadas na Figura 51.

Figura 51 - Imagens do local de coleta das amostras de geotêxtil retiradas na LM: (a) na base da lagoa e (c) em cima da bolha 5. A amostra coletada na base da lagoa está representada em (b) e amostra retirada de cima da bolha, em (d).



Fonte: a autora, 2024.

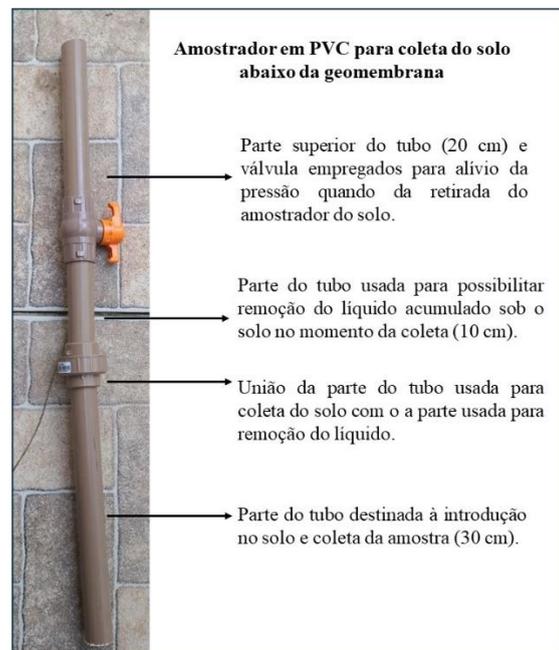
As quatro amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Pesquisa do Instituto Mauá de Tecnologia para ensaios de determinação da massa por unidade de área do geossintético. A metodologia empregada nestes ensaios está definida na norma NBR ISSO 9.864 – Geossintéticos – Método de ensaio para a determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos (ABNT, 2013). Os ensaios de massa por unidade de área foram determinados a partir da média do resultado da análise de cinco amostras retiradas da amostra original de geotêxtil.

Além da determinação da massa por unidade de área, foram registradas imagens das mesmas amostras, com aumento de 142, 712 e 2.030 vezes, utilizando-se o microscópio digital de alta resolução DSX 1000 do Laboratório de Metrologia do Instituto Mauá de Tecnologia.

#### 2.2.4 Caracterização do solo abaixo da GM

Em três dos furos localizados na GM foi possível introduzir o amostrador para a coleta de solo abaixo do geossintético. Nos demais furos isso não foi possível, pois as aberturas na GM tinham tamanho inferior ao diâmetro do amostrador. A ferramenta empregada foi construída para aplicação neste trabalho. Utilizaram-se tubo de PVC (policloreto de vinila) com 2,54 cm de diâmetro, união, cola e válvula, conforme apresentado na Figura 52.

Figura 52 - Imagens do amostrador empregado para a coleta do solo abaixo da GM com a indicação da funcionalidade de cada um de seus componentes.



Fonte: a autora, 2024.

Na Figura 53 são apresentadas imagens do momento da coleta das amostras de solo abaixo da GM da LM.

A planta com a localização dos pontos de coleta das amostras de solo está apresentada no capítulo de resultados, pois foi desenvolvida com base no levantamento planialtimétrico da área e após a avaliação da viabilidade da coleta nos pontos dos furos localizados na GM da LM.

Figura 53 - Imagens do momento da coleta de duas das amostras de solo abaixo da GM da LM utilizando o amostrador desenvolvido com tubo de PVC: (a) coleta na base da lagoa e (b) coleta no talude.



(a)



(b)

Fonte: a autora, 2024.

As amostras coletadas foram encaminhadas para o Laboratório de Engenharia Sanitária da UERJ para realização de ensaios de lixiviação do solo. Neste local, foram conservadas em refrigerador até a data da realização dos ensaios. O preparo das amostras envolveu as seguintes atividades: adição de 300g de solo a um recipiente com água destilada em uma proporção de 1:2 solo:água (m/m) com agitação por 24 h. Depois disso, a suspensão foi centrifugada por 15 minutos a 2.500 rpm e depois filtrada em membrana de fibra de vidro de 0,45 mm. O sobrenadante foi utilizado para análise dos parâmetros indicados na Tabela 7, a qual também apresenta as respectivas referências metodológicas empregadas.

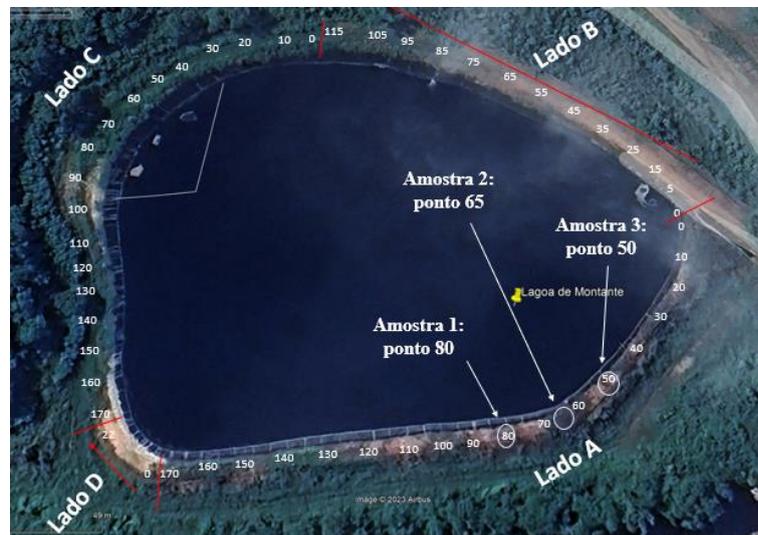
Tabela 7 – Parâmetros a serem avaliados no lixiviado do solo abaixo da GM da LM.

Parâmetro	Método	Equipamento
Condutividade	2510 B <sup>1</sup>	eletrodo (MS Tecnopon/mCA)
pH	4500-H-B <sup>1</sup>	eletrodo Quimis/QH0045
DQO	5220 D <sup>1</sup>	espectofotômetro Hach DR 2800-COD digital reactor
Sódio	3500 – Na B <sup>1</sup>	fotômetro de chamas Analyser 910 M
Potássio	3500 – K B <sup>1</sup>	fotômetro de chamas Analyser 910 M
Cloreto	4500-Cl-B <sup>1</sup>	NA (titulação)
Nitrogênio Amoniacal	4500-NH <sub>3</sub> D <sup>1</sup>	eletrodo seletivo (Orion 290 A)

<sup>1</sup>APHA, 2012.

Como forma de poder comparar os valores de concentração nas amostras de solo abaixo da geomembrana com o solo local, foram também avaliadas duas amostras de solo do talude externo da lagoa de montante, as quais foram denominadas de *background*. Os locais de coleta destas amostras seguem indicados na Figura 54.

Figura 54 - Imagem da LM com a indicação dos pontos de coleta das amostras de solo do talude externo, utilizadas como *background*.



Fonte: a autora, 2023.

## **CAPÍTULO 3: RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A metodologia da pesquisa foi apresentada em duas etapas de desenvolvimento dos estudos (etapas I e II), o que foi norteado pela cronologia do desenvolvimento das atividades. Entretanto, os resultados obtidos e as discussões não serão apresentados nesta lógica temporal e sim pela interrelação dos aspectos avaliados com os objetivos deste estudo.

### **3.1 Caracterização das lagoas do AMG**

A avaliação comparativa de imagens do Google Earth na área do AMG nos anos de 2012 e 2023 permite compreender a importância das lagoas de armazenamento de lixiviado mesmo após o encerramento das atividades de disposição de resíduos. A Figura 55 (a) apresenta uma vista superior do AMG registrando a situação da área em agosto/2012, momento muito próximo do encerramento do aterro que foi em junho do mesmo ano. Pela imagem é possível notar que existe uma conformação geométrica na área de resíduos, que há cobertura de solo em toda a área e que existem drenos para escoamento das águas pluviais que caem sobre o maciço. A mesma imagem apresenta a lagoa de montante, estudada nesta pesquisa e que foi impermeabilizada com geomembrana. Este cenário caracteriza a condição do AMG logo após o encerramento do recebimento de resíduos.

A Figura 55 (b) apresenta a imagem do mesmo local, porém referente a maio/2023. É notório perceber a significativa presença da vegetação na área nesta data quando comparada à imagem de 2012. A imagem da Figura 55 (b) retrata o cenário que foi encontrado no AMG durante as atividades de campo (em 2023 e 2024). Notou-se a presença de vegetação em toda a área (arbustos e até árvores), de espécies de pássaros que integravam o local e da segunda lagoa impermeabilizada com GM, a lagoa sul (LS) (avaliada nesta pesquisa).

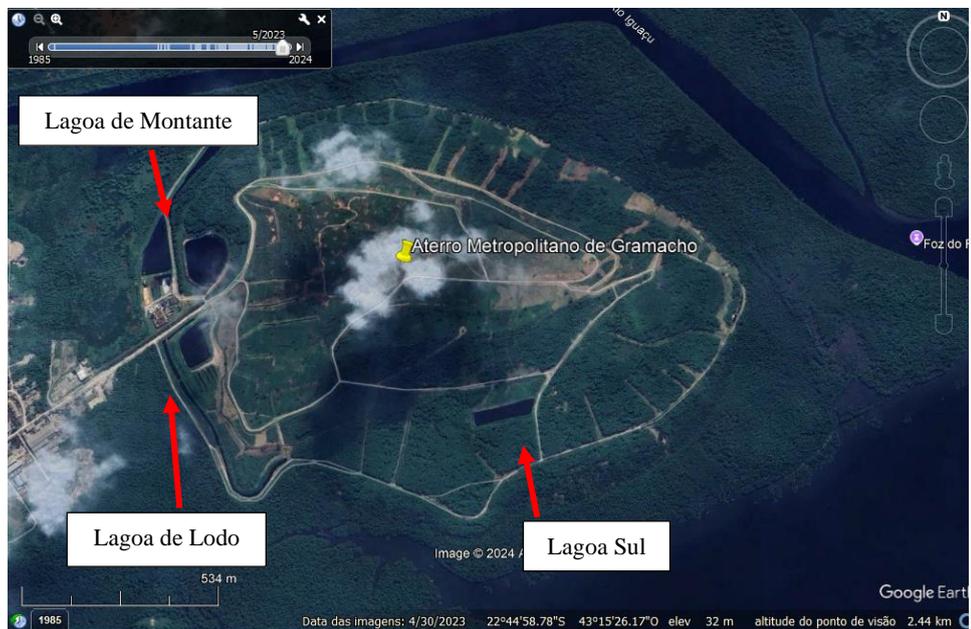
A partir dos aspectos percebidos por meio das imagens do Google Earth, pelas observações de campo e, considerando que se passaram doze anos da paralização do recebimento de resíduos no AMG, esperava-se encontrar redução no volume estocado de lixiviado e na concentração dos parâmetros que caracterizam este efluente em relação ao período operacional. Segundo EL FADEL et al., (2002) e RENOUE et al., (2008), a geração do lixiviado está diretamente relacionada a fatores como pluviometria, evapotranspiração, escoamento superficial e o grau de compactação dos resíduos. Com a presença da vegetação e dos drenos pluviais, a infiltração das chuvas tenderia a reduzir e a evapotranspiração

umentar. Além disso, considerando a permanência da operação da Estação de Tratamento de Lixiviado do AMG, seria esperada uma redução gradual no volume de lixiviado estocado.

Figura 55 - Imagem do Google Earth na área do AMG em dois momentos: (a) agosto/2012 e (b) maio/2023.



(a) Agosto/2012



(b) Maio/2023

Fonte: adaptado do Google Earth, 2023.

Entretanto, nota-se que na imagem de 2023 existiam duas lagoas a mais do que na de 2012: as lagoas sul e de lodo, indicadas com setas vermelhas na Figura. Tal fato parece

indicar que, mesmos após 12 anos de encerramento das atividades do AMG, suspensão da disposição de resíduos, cobertura da área com solo, presença de cobertura vegetal em toda a área e a permanência do tratamento de lixiviado, a quantidade estocada do efluente aumentou. Esta condição reforça a necessidade da presença dos reservatórios impermeabilizados de lixiviado em aterros sanitários e antigos lixões de modo a possibilitar o acondicionamento deste efluente por um longo período.

Adicionalmente é importante mencionar que os processos de encerramento de lixões no Brasil adotam, quando possível, medidas de recuperação similares às aquelas empregadas no AMG. E muitas vezes, diferentemente do que acontece em Gramacho, os antigos lixões recuperados não possuem recursos para a manutenção da área após as obras de encerramento, o que ocasiona o não tratamento do lixiviado e a impossibilidade de manter a qualidade do sistema de drenagem pluvial instalado (surgem erosões com as chuvas).

Estas realidades reforçam a importância do acompanhamento do período pós-encerramento destes empreendimentos, contemplando atividades de monitoramento, operação da Estação de Tratamento de lixiviado, manutenção dos drenos pluviais, monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, análise da toxicidade do lixiviado dentre outros. É fundamental ainda, que estas medidas sejam acompanhadas pelo órgão ambiental, no âmbito do processo de autorização para encerramento da área.

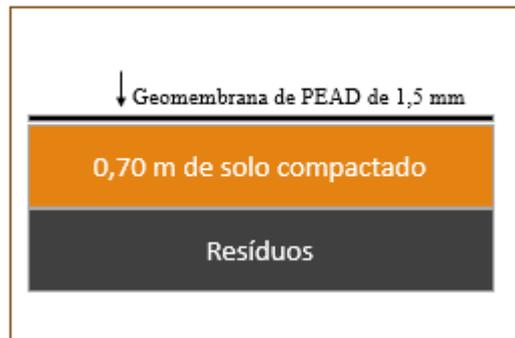
### **3.2 Caracterização das lagoas sul (LS) e de montante (LM)**

Na sequência serão apresentadas as caracterizações referentes as lagoas sul e de montante que são objeto do presente estudo.

#### **3.2.1 Caracterização da lagoa sul (LS)**

O perfil construtivo da LS, segundo informações da equipe de gestão do AMG, inclui as seguintes camadas, de baixo para cima: resíduos, 70 cm de solo compactado e GM lisa de PEAD de 1,5 mm, conforme apresentado na Figura 56 – Perfil transversal do sistema de barreiras e seus componentes na lagoa Sul.

Figura 56 – Perfil transversal do sistema de barreiras e seus componentes na lagoa Sul.



Fonte: a autora, 2024.

As dimensões aproximadas da lagoa são 160 m x 50 m e a capacidade total informada é de 10.500 m<sup>3</sup>. Entretanto, a inspeção realizada compreendeu apenas a fração da GM que estava coberta com lixiviado, ou seja, a inspeção contemplou toda a base da lagoa e taludes até 1 metro de altura a partir da cota da base da lagoa. Na condição da LS cheia, teria sido possível avaliar a GM dos taludes até uma altura de 2,5 m da cota da base da lagoa.

A Figura 57 mostra a lagoa sob diferentes ângulos: (a) face oposta à entrada do AMG e (b) mesma face da entrada do AMG.

Figura 57 - Imagens da LS: (a) face oposta do acesso ao AMG e (b) mesma face da entrada ao AMG.



(a)



(b)

Fonte: a autora, 2023.

### 3.2.2 Histórico de construção da lagoa sul (LS)

As imagens obtidas a partir do aplicativo Google Earth Pro permitem evidenciar o histórico de construção da lagoa sul, deixando claro que sua construção ocorreu entre julho

e outubro/2016 (Figura 58) e que, portanto, a lagoa possuía cerca de 7 anos em agosto/23, quando foi inspecionada.

Figura 58 - Imagens aéreas extraídas do Google Earth Pro da área da LS: (a) em julho/2016, durante a construção da lagoa; (b) outubro/2016, lagoa com lixiviado.



(a) Julho/2016



(b) Outubro/2016

Fonte: adaptado do Google Earth, 2023.

### 3.2.3 Caracterização da lagoa de montante (LM)

O perfil construtivo da LM inclui as seguintes camadas, de baixo para cima: resíduos, 70 cm de solo compactado e GM lisa de PEAD de 1,5 mm, uma camada de geotêxtil e depois pedregulho, conforme apresentado na Figura 59. Notou-se que parte do geotêxtil aplicado nos taludes se rompeu, escorregando para a base da lagoa. O geotêxtil da região das duas maiores bolhas também se encontra danificado.

Figura 59 - Perfil transversal do sistema de barreiras e seus componentes na Lagoa de Montante.



Fonte: a autora, 2024.

A lagoa apresenta uma geometria irregular e assimétrica, com dimensões longitudinal e transversal de 150 x 144 m (conforme Figura 60), área de geomembrana de aproximadamente 15.000 m<sup>2</sup> (área coberta com lixiviado) e capacidade total informada de 24.000 m<sup>3</sup>, entretanto a inspeção realizada compreendeu apenas a área da GM coberta com lixiviado.

Figura 60 – Imagem aérea da lagoa de montante (LM) evidenciando suas dimensões longitudinal e transversal.



Fonte: adaptado do Google Earth, 2024.

Como existe um desnível ao longo da cota da base da LM, durante a inspeção, foi verificado que o nível de lixiviado na face jusante da lagoa (próxima à Estação de Tratamento de Lixiviado do AMG) encontrava-se a cerca de 3 - 4 m da base da lagoa. Na face de montante, na região das bolhas, porém, o nível de lixiviado variava em torno de 0,5 e 1 m da base. Esta diferença de nível do lixiviado nas regiões de montante e de jusante da LM pode ser notada a partir das imagens da Figura 61. A existência deste desnível na cota da base da lagoa impossibilitou a inspeção da GM do talude da região de montante, pois esta se encontrava exposta (sem líquido) e por isso não podia ser avaliada pelo método dipolo.

Figura 61 – Imagens da região de jusante (a) e de montante (b) da LM que evidenciam a diferença no nível de lixiviado, tendo como referência a maior e menor exposição do talude.



Fonte: a autora, 2024.

A Figura 62 apresenta duas imagens tiradas em uma das faces da LM e evidencia a presença das bolhas e o nível de lixiviado nesta região.

Figura 62 - Imagem da LM evidenciando a presença das bolhas com destaque para a superfície exposta de uma das bolhas, a qual apresenta geotêxtil e pedregulhos.



Fonte: a autora, 2023.

### 3.2.4 Histórico de construção da LM e do surgimento das bolhas

As imagens obtidas a partir do aplicativo Google Earth Pro permitem evidenciar o histórico de construção da lagoa e do surgimento das bolhas, conforme representados na Figura 63. As imagens evidenciam que a lagoa foi construída dentro do período compreendido entre janeiro/10 e julho/11. A imagem de abril/11 evidencia o momento em que os pedregulhos já haviam sido instalados acima do geotêxtil e da geomembrana.

A observação das imagens deste período permite notar que existia uma drenagem subsuperficial de lixiviado no terreno (seta vermelha indicando) antes do início da construção da LM. Este sistema permitia a condução do lixiviado do aterro até a lagoa que alimentava a estação de tratamento de lixiviado do AMG. Com a implantação da LM, esse dreno foi interrompido e tornou-se o ponto de recepção do lixiviado na lagoa, como pode ser observado na imagem de julho/2011 (indicação com seta vermelha). Atualmente a LM possui dois pontos de entrada de lixiviado: este que pôde ser observado na Figura, no qual o lixiviado entra por gravidade e advém dos drenos instalados na cota 17 do maciço de resíduos e outro ponto com bombeamento diretamente das valas do AMG. Estas valas (Figura 33), construídas durante a implantação das medidas de controle no AMG entre 1996 e 2002, contornam o maciço de resíduos para conter e encaminhar as drenagens do lixiviado, por gravidade, até a Estação de Tratamento deste efluente.

Pelas imagens também é possível concluir que a LM tem 13 anos de serviço e que as bolhas, atualmente visíveis, surgiram cerca de 2 anos depois da lagoa ter iniciado sua operação (julho/2011), como mostra a imagem de maio/13. Importante destacar também a permanência das bolhas na mesma posição ao longo destes onze anos (2013-2024).

Figura 63 - Imagens aéreas extraídas do Google Earth Pro da área da LM: (a) em janeiro/2010; (b) abril/2011; (c) julho/2011; (d) maio/2013; (e) janeiro/2014 e (f) maio/2023.



(a) Janeiro/2010



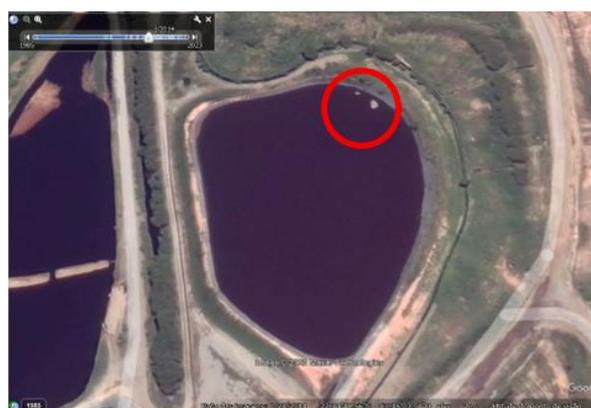
(b) Abril/2011



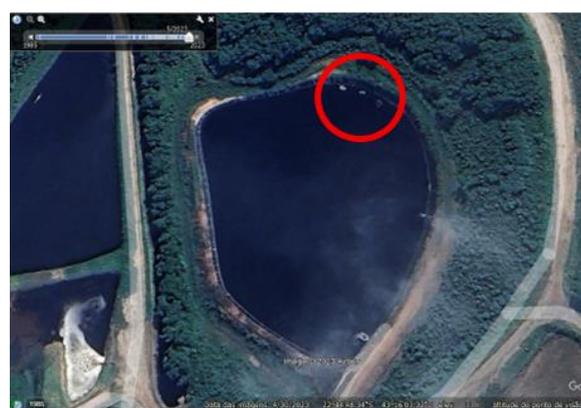
(c) Julho/2011



(d) Maio/2013



(e) Janeiro/2014



(f) Maio/2023

Fonte: adaptado do Google Earth, 2023.

### 3.3 Caracterização das bolhas da LM

Os resultados apresentados neste item contemplam dois momentos da caracterização das bolhas da LM: cadastro inicial, realizado em ago/23 com o nível de lixiviado na condição operacional e cadastro após rebaixamento do nível do efluente, realizado em junho/24. A seguir apresenta-se o que se depreende de cada um dos momentos.

#### 3.3.1 Cadastro inicial das bolhas

No período da realização dos trabalhos de campo da etapa I, agosto de 2023, foram registradas 6 bolhas acima do nível do lixiviado na LM, conforme indicado na Figura 64. Na data em que foi registrada esta imagem, o nível do medidor da lagoa, posicionado a jusante da mesma, indicava que o líquido encontrava-se a 1 metro da crista do talude neste ponto. Na região das bolhas (região de montante), porém, o nível de lixiviado variava entre 0,5 e 1 m da base da lagoa, o que possibilitava que o operador caminhasse sobre a geomembrana.

Figura 64 - Imagem das bolhas identificadas na LM do AMG.



Fonte: a autora, 2023.

Os registros sobre o formato aproximado, tamanho e localização das bolhas, conforme levantamento inicial de campo, seguem apresentados na Tabela 8. Este cadastro inicial das bolhas serviu de referência para o desenvolvimento do levantamento planialtimétrico do local.

Tabela 8 - Resultados da caracterização das bolhas da LM.

<b>Identificação da bolha</b>	<b>Referência de localização <sup>a</sup></b>	<b>Formato</b>	<b>Tamanho (m)<sup>b</sup></b>
1	55	triangular	2,0
2	60	circular	5,0
3	70	triangular	2,9
4	70	triangular	3,2
5	75	circular	4,2
6	94	circular	4,3

<sup>a</sup> Conforme marcações feitas na borda da lagoa (vide Figura 43)

<sup>b</sup> Para formato triangular, tamanho da altura do triângulo e para formato circular, diâmetro.

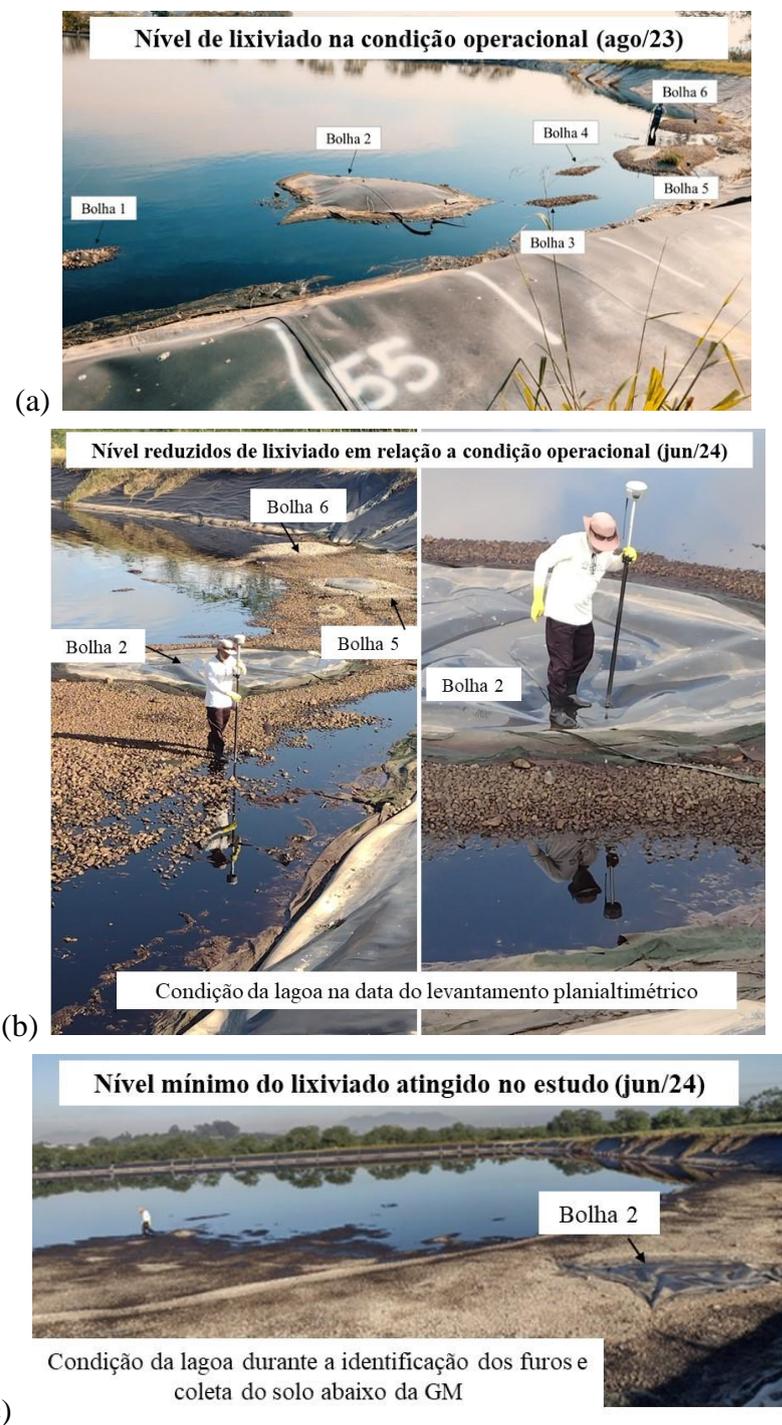
### 3.3.2 Cadastro das bolhas após rebaixamento do nível do lixiviado

Com o rebaixamento do nível de lixiviado, notou-se visivelmente a redução da altura de topo das bolhas, conforme pode ser observado na Figura 65. Estas três imagens retratam a condição do nível de lixiviado na LM: condição operacional (quando foi realizada a inspeção pelo método dipolo), nível reduzido de líquido (ocasião do desenvolvimento do levantamento planialtimétrico) e nível mínimo de líquido atingido no estudo (data da identificação dos furos na GM e coleta de solo abaixo da mesma).

Além da percepção visual com relação a altura da bolha, notou-se, ao caminhar por cima das bolhas 2 e 5, que a pressão de gás interna era muito alta quando o nível de lixiviado estava na condição operacional, como pode ser observado especialmente na bolha 2 na Figura 65 (a). Com o rebaixamento do líquido, conforme a Figura 65 (b), a redução da pressão interna da bolha foi percebida pelo movimento de caminhar em cima da bolha, o qual ocasionou algumas ondulações na GM da área da bolha.

O fenômeno que pôde ser observado a partir da comparação das três imagens é decorrente do aumento da pressão no gás presente na bolha devido à elevação do nível do líquido externo à mesma. Para a LM, a condição operacional representa a máxima coluna de líquido sobre GM, condição que provoca o aumento da pressão de gás dentro da bolha. Quando esta altura de lixiviado foi diminuída, durante o levantamento planialtimétrico, a pressão interna da bolha reduziu sensivelmente e, assim, já era possível caminhar sobre a bolha sem notar pressão embaixo da geomembrana.

Figura 65 - Imagens das bolhas presentes na LM em três condições diferentes do nível de lixiviado: (a) nível operacional inicial; (b) nível reduzido de líquido e (c) nível mínimo de lixiviado que foi possível atingir neste estudo.



Fonte: a autora, 2024.

Conforme apresentado por GUO et al. (2016), para um mesmo volume de líquido percolado, até a altura de submersão da bolha, quanto maior o nível da líquido externo,

maior será a altura da bolha. Isto explica o que foi observado na Figura 66. Com a redução do nível de lixiviado na LM, a altura das três bolhas foi sensivelmente reduzida.

Figura 66 - Imagens que evidenciam a diferença na pressão interna das bolhas nas duas condições de nível do lixiviado na lagoa: (a) nível operacional com operador com cerca de 70 kg em cima da bolha 5 (ago/23); (b) nível reduzido de líquido com operador com cerca de 70 kg em cima da bolha 2 (jun/24).



Fonte: a autora, 2024.

Esta variação observada em relação à altura das bolhas evidencia também a oscilação da tensão que a GM foi submetida nesta região ao longo do tempo de existência das bolhas. Segundo PALMEIRA (2018) quando a GM tem a função de barreira não deve ser tracionada, pois tais esforços favorecem danos e auxiliam no desenvolvimento de trincamentos sob tensão (*stress cracking*).

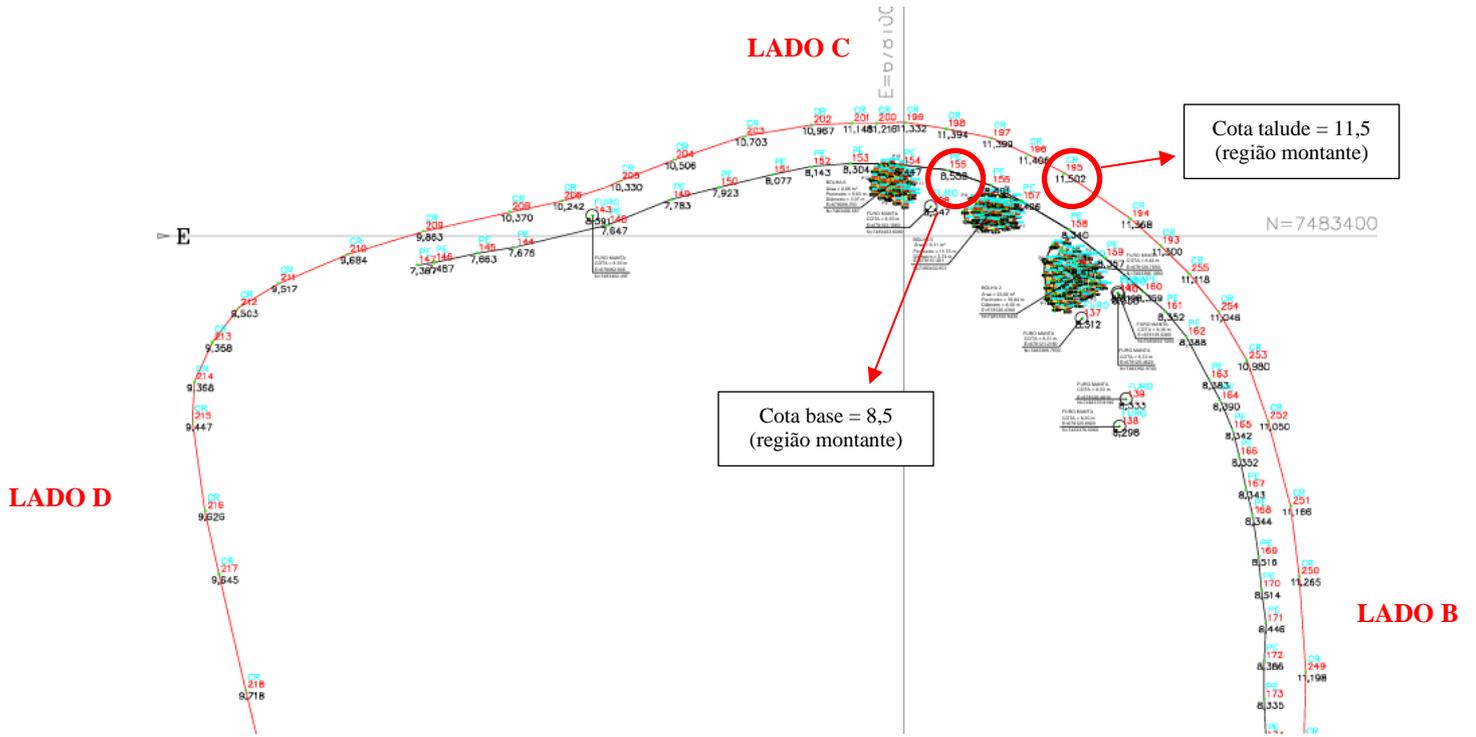
O levantamento planialtimétrico realizado na LM possibilitou uma avaliação mais pormenorizada das bolhas apresentaram maiores dimensões na etapa 1 dos estudos: as 2, 5 e 6 (conforme Figura 64).

### 3.3.2.1 Levantamento planialtimétrico

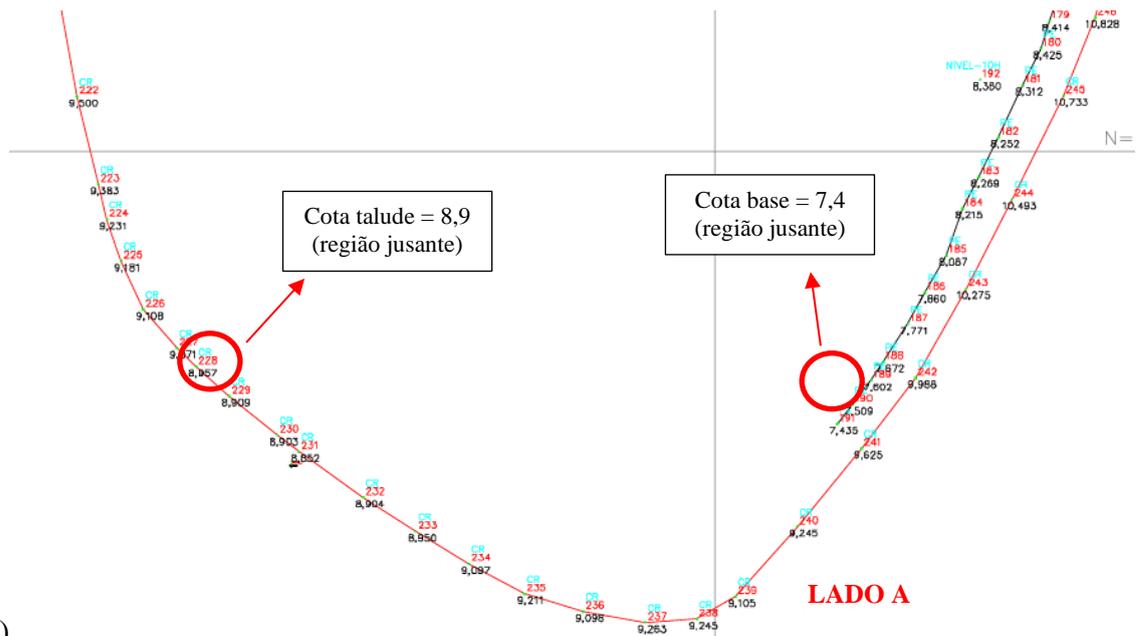
A Figura 67 apresenta o resultado do levantamento planialtimétrico realizado na LM. A partir destas imagens é possível confirmar a diferença de nível no entorno da lagoa, que havia sido observada na primeira etapa dos trabalhos, evidenciando a presença de uma região de montante (próxima das bolhas) e de jusante (na fase oposta). Nota-se uma diferença de cota no talude de jusante (cota 11,5) (Figura 67 (a)) em relação ao de montante (cota 8,9) (Figura 67 (b)). Há ainda diferença na cota da base da lagoa: 8,5 na margem da lagoa próxima às bolhas e 7,4 na face direita do lado oposto (Figura 67 (a) e (b)). A diferença

de cotas nos taludes de montante e jusante limita o nível operacional máximo de lixiviado que a LM pode atingir.

Figura 67 – Cortes da planta do levantamento planialtimétrico feito nos taludes e bordas da lagoa de montante com o posicionamento das três maiores bolhas identificadas.



(a)

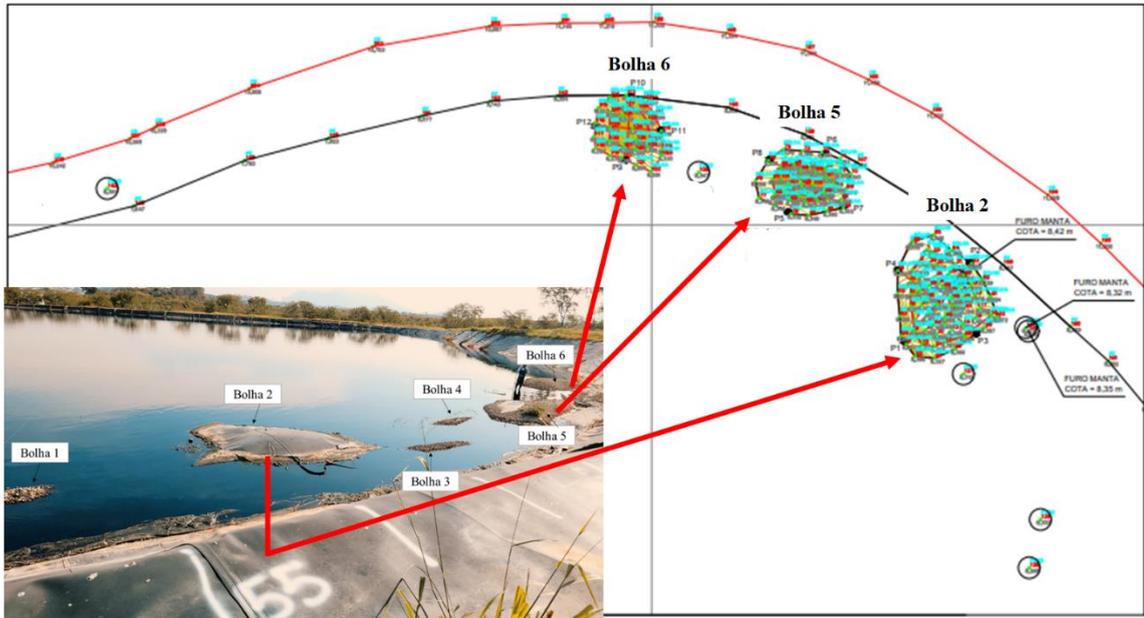


(b)

Fonte: adaptado de JF Topografia, 2024.

A Figura 68 apresenta o levantamento planialtimétrico juntamente com a imagem inicial de registro das bolhas.

Figura 68 - Imagem do levantamento planialtimétrico das bolhas correlacionado com o cadastramento inicial das mesmas identificadas na LM.



Fonte: adaptado de Fonte: JF Topografia, 2024.

Para as três bolhas cadastradas no levantamento topográfico (2, 5 e 6), foram levantados: coordenadas, área, perímetro, diâmetro e as cotas máxima e mínima, conforme pode ser verificado na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do levantamento planialtimétrico da região das bolhas da LM.

ID da bolha	Coordenadas	Cota máxima (m) <sup>1</sup>	Cota mínima (m) <sup>1</sup>	Altura estimada (m) <sup>2</sup>	Perímetro (m)	Diâmetro (m) <sup>3</sup>	Área (m <sup>2</sup> )
2	E = 678120.4380 / N = 74833.9430	8,41	8,29	0,12	18,84	6,00	23,06
5	E = 678110.201 / N = 7483402.801	8,69	8,32	0,37	11,75	3,74	9,11
6	E = 678098.700 / N = 7483406.587	8,55	8,29	0,26	9,63	3,07	6,68

<sup>1</sup> Cotas do extraídas do segundo levantamento feito nos dois perfis avaliados para cada uma das bolhas.

<sup>2</sup> Estimativa calculada pela subtração entre a cota máxima e a mínima de cada bolha.

<sup>3</sup> Diâmetro médio, calculado a partir do perímetro da bolha.

### 3.3.2.2 Levantamento do perfil das bolhas

Com o objetivo de caracterizar as variações da altura da bolha com o nível de lixiviado na lagoa, foram feitas leituras da cota de cada uma das três bolhas em duas condições diferentes de nível de lixiviado na LM. A primeira leitura foi feita quando o nível da lagoa estava menor (processo de esvaziamento da lagoa) e a segunda em um nível um pouco mais alto (processo de enchimento da lagoa). As variações de uma condição para outra foram pequenas dado que as duas leituras foram feitas no mesmo dia e isto representou oscilações pouco representativas no nível do lixiviado da lagoa. Os resultados dos levantamentos geraram o cadastramento de dois perfis (longitudinal e transversal) de cada uma das três bolhas (2, 5 e 6) nas duas condições de nível de lixiviado, os quais estão avaliadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados do levantamento planialtimétrico do perfil das bolhas 2, 5 e 6.

Bolha 2			Bolha 5			Bolha 6											
Perfil 1 - transversal			Perfil 2 - longitudinal			Perfil 1 - transversal			Perfil 2 - longitudinal								
Cb	Ca	df	Cb	Ca	df	Cb	Ca	df	Cb	Ca	df	Cb	Ca	df	Cb	Ca	df
8,28	8,29	13	8,38	8,35	-32	8,41	8,32	-87	8,36	8,37	4	8,43	8,29	-140	8,28	8,30	17
8,35	8,33	-19	8,41	8,38	-24	8,39	8,40	12	8,38	8,37	-14	8,43	8,43	7	8,31	8,33	12
8,39	8,37	-20	8,44	8,37	-71	8,63	8,65	13	8,58	8,54	-37	8,49	8,55	56	8,43	8,50	72
8,38	8,40	15	8,39	8,40	6	8,62	8,60	-25	8,69	8,69	-3	8,37	8,48	101	8,44	8,46	18
8,38	8,40	19	8,37	8,41	35	8,36	8,36	3	8,57	8,60	37	8,28	8,30	17	8,37	8,36	-12
8,39	8,40	8	8,40	8,39	-7	8,34	8,38	49	8,43	8,46	25	8,28	8,36	87	8,40	8,37	-27
8,38	8,36	-26	8,34	8,34	3				8,42	8,43	6						
8,35	8,33	-23	8,36	8,35	-13												
8,35	8,33	-23															

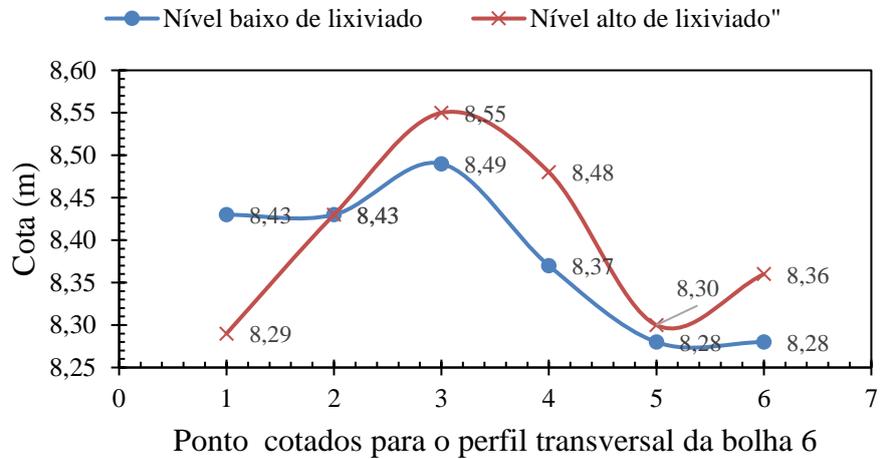
Cb -cota (m) do perfil da bolha na condição do nível de lixiviado mais baixa.

Ca – cota (m) do perfil da bolha na condição do nível de lixiviado mais alta.

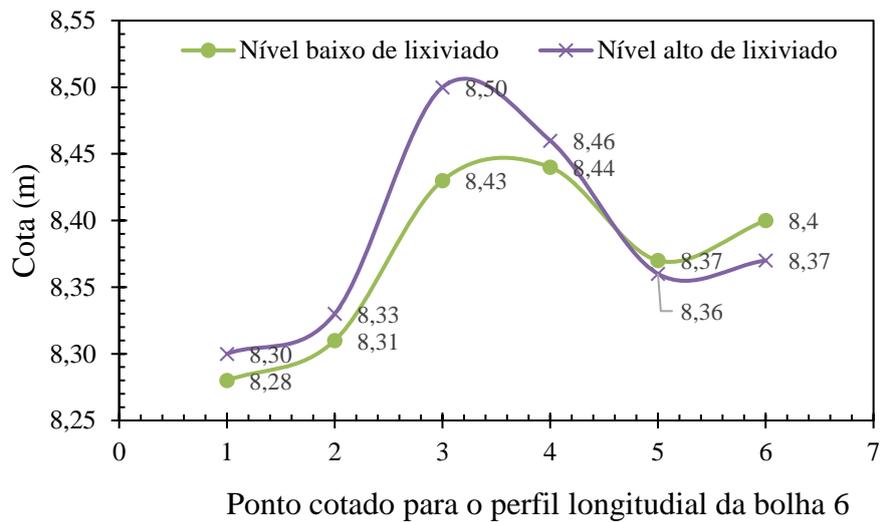
df – diferença entre Ca e Cb.

A Figura 69 apresenta o gráfico com o levantamento das cotas (altimetria) mapeadas para os perfis transversal e longitudinal da bolha 6 nas duas condições de nível de lixiviado: mais alta e mais baixa, a partir dos resultados da Tabela 10. Os gráficos evidenciam as diferenças na altura máxima da bolha e em seu perfil nas duas condições, deixando claro que a maior altura da bolha foi obtida na condição de nível mais alto do lixiviado, como já observado por GUO et al. (2016).

Figura 69 – Resultados de altimetria dos perfis transversal (a) e longitudinal (b) para a bolha 6 nas duas condições de nível de lixiviado: alto e baixo. Levantamento na LM em junho/2024.



(a)



(b)

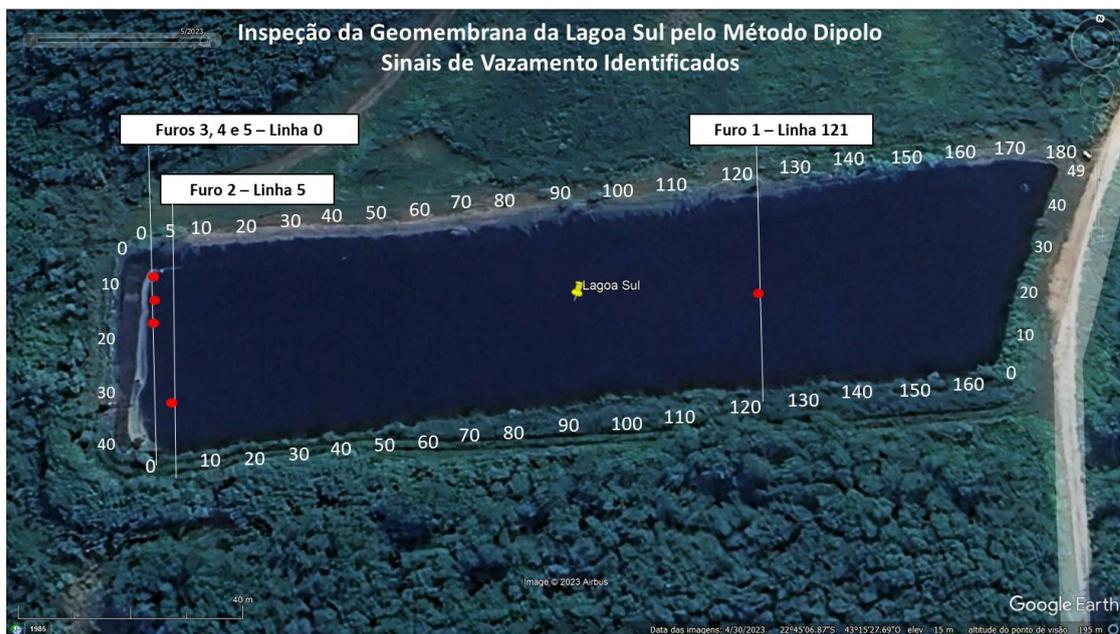
Estudos futuros poderão promover o mesmo levantamento do perfil das bolhas, porém, com o nível de lixiviado na condição operacional, ou seja, mais alto do que o que foi avaliado neste estudo. Para que se possa observar maior diferença entre os perfis das bolhas.

### 3.4 Inspeção das lagoas do AMG pelo método dipolo

#### 3.4.1 Lagoa sul

Durante a inspeção, realizada na GM coberta com lixiviado, foram encontrados 5 (cinco) pontos de vazamentos na base da lagoa, cuja localização está apresentada na Figura 70.

Figura 70 - Imagem aérea da LS com a identificação aproximada dos pontos com sinais de vazamento na GM coberta com lixiviado. Localização dos pontos por associação às marcações nas bordas da LS.



Fonte: adaptado do Google Earth, 2023.

Nos locais onde foram identificados os sinais de vazamentos instalaram-se boias presas em sacos plásticos com areia em seu interior. A Figura 71 mostra imagens da lagoa vista das bordas onde foram registrados os sinais de vazamento. Além dos 5 pontos identificados pela inspeção da GM pelo método dipolo, foi visualizado um local com 4 furos, no talude da face da lagoa cuja numeração inicia em 1 e termina em 160. A foto com os referidos furos segue apresentada na Figura 71 (d).

Figura 71 - Imagens com indicação das linhas onde os pontos de vazamento foram localizados na LS: (a) 1 (linha 120); (b) 2 (linha 5); (c) 3, 4 e 5 (linha 0) e (d) 6 (identificado visualmente e posicionado acima do nível do líquido).



Fonte: a autora, 2023.

Como sugerido por NOSKO;TOUZE (2000), a maior parte dos vazamentos identificados na LS estão na base do reservatório e não nos taludes.

Considerando a área aproximada de GM da LS coberta com líquido,  $7.220 \text{ m}^2$ , e os vazamentos identificados pelo método dipolo, tem-se como resultado 6,9 vazamentos/ $10.000 \text{ m}^2$  neste reservatório. De acordo com o histograma apresentado no item 1.8.1, a LS se encontraria no grupo de projetos que apresentou entre 5-10 vazamentos/ $10.000 \text{ m}^2$ . Este resultado significa que cerca de 64% dos projetos avaliados por ZIDAN et al. (2024) apresentaram menor quantidade de vazamento/área do que a LS.

Os dados apresentados por este artigo representam a realidade de projetos norte americanos em sua maioria. Não estão ainda disponíveis dados estatísticos que representem a realidade dos reservatórios em operação no Brasil. De acordo com os dados de ZIDAN et al. (2024), a maior parte dos reservatórios norte americanos inspecionados apresentou entre 0-2 e >2-5 vazamentos/10.000 m<sup>2</sup>. Acredita-se que no Brasil, pela ausência da prática de inspecionar a GM após sua instalação e durante o período operacional das lagoas, os reservatórios podem apresentar maior número de vazamentos/10.000 m<sup>2</sup> do que nos EUA.

### 3.4.2 Lagoa de montante

Durante a inspeção, realizada na GM coberta com lixiviado, foram encontrados 8 (oito) vazamentos, sendo sete entre os pontos 20 e 100 e um no ponto 130 (todos no lado C), conforme apresentado na Figura 72.

Figura 72 - Imagem aérea da LM com a identificação dos pontos onde foram registrados sinais de vazamento na GM coberta com lixiviado.



Fonte: adaptado do Google Earth, 2023.

Nos locais onde foram identificados os vazamentos instalaram-se boias presas com fio de nylon em pedregulhos existentes na base da lagoa. A Figura 73 mostra imagens da lagoa vistas das bordas onde foram registrados os sinais de vazamento. Além dos 7 vazamentos identificados na base da lagoa (todos próximos a região inspecionada pelo

método de nível raso), foi localizado um oitavo furo, no talude do lado C, na altura da numeração 130 (lado C) do *grid* (vide Figura 72).

Figura 73 - Imagem da LM com a indicação dos vazamentos: (a) cinco pontos registrados na base da GM coberta com lixiviado (vazamentos 1-5); (b) dois pontos registrados também na base da GM coberta com lixiviado (vazamentos 6 e 7) e (c) um ponto de furo no talude da lagoa (vazamento 8) (imagem após redução do nível de lixiviado).



(a)



(b)



(c)

Fonte: a autora, 2023.

Como proposto por NOSKO;TOUZE (2000), verifica-se que a maior parte dos vazamentos identificados na LM está na base do reservatório e não nos taludes. Esta foi também a condição observada na lagoa sul.

Considerando a área aproximada da GM da LM, 16.000 m<sup>2</sup>, e os oito vazamentos identificados, tem-se, então, 5 vazamentos/10.000m<sup>2</sup>, resultado inferior ao encontrado na LS. Apesar disto, similarmente à esta última lagoa, cerca de 64% dos projetos avaliados por ZIDAN et al. (2024) apresentaram menos vazamento/área do que a LM.

Diferentemente da LS, a localização dos vazamentos da LM mostra uma concentração dos pontos, estando a maioria na base e na região onde surgiram as bolhas. Tal fato representa um forte indício de que a percolação de lixiviado por estes vazamentos provocou a formação das bolhas.

O fato do nível do lixiviado não aumentar muito na região das bolhas, em função da configuração da lagoa, foi um fator importante para minimizar as tensões sobre a GM ao longo do tempo de existência das bolhas. Entretanto, em variações pequenas no nível da lagoa foram percebidas diferenças na altura das bolhas, comportamento sugerido por GUO et al. (2016). Este fato evidencia a ocorrência de ciclos sucessivos de tensionamento da GM em decorrência do aumento e rebaixamento do nível de lixiviado na lagoa. Da mesma forma, o fato da GM ter ficado exposta à radiação UV por estes 11 anos, em um local com histórico de temperaturas altas, pode ter contribuído para acelerar o processo de envelhecimento do geossintético.

### **3.5 Caracterização dos furos identificados na LM**

O processo de rebaixamento do nível de lixiviado na LM aconteceu ao longo de alguns dias, o que foi coordenado pela equipe de gestão do AMG. O levantamento planialtimétrico foi feito após cerca de 4 dias do início do rebaixamento e a identificação detalhada dos pontos de vazamento (furos) e coleta de solo foram feitos 5 dias depois do levantamento. Neste sentido, o nível de lixiviado durante o levantamento topográfico era mais alto do que o da data da abertura dos pontos de vazamento, como pode ser observado na Figura 74.

Figura 74 - Imagens da LM, região das bolhas, que evidenciam a diferença de nível de lixiviado em dois momentos do trabalho de campo: (a) na realização do levantamento planialtimétrico, (nível de lixiviado reduzido em relação à condição operacional) e (b) na abertura dos pontos de vazamento e coleta de solo abaixo da GM.

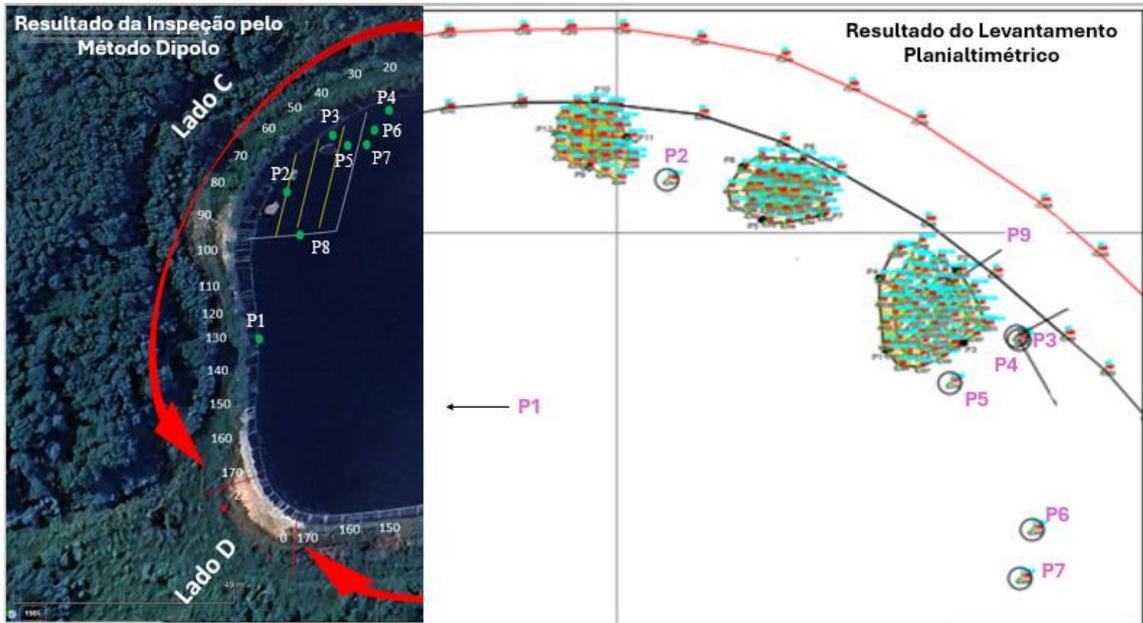


Fonte: a autora, 2024.

Em função desta diferença no nível da lagoa, apresentada nasFigura 74 (a) e (b), um dos pontos de vazamento identificados na inspeção pelo método dipolo, não foi cadastrado no levantamento planialtimétrico. Neste sentido os trabalhos de topografia cadastraram sete dos oito pontos de vazamento mapeados na inspeção pelo método dipolo (do P1 ao P7), como pode ser observado na Figura 75.

O ponto P8, que aparece na imagem da esquerda na Figura 75 (resultado da inspeção) não foi cadastrado no levantamento planiatimétrico (estava abaixo do lixiviado). Esta mesma Figura apresenta o cadastro de um furo na GM, posicionado em cima da bolha 2, o P9, o qual não havia sido identificado como ponto de vazamento na inspeção pelo método dipolo.

Figura 75 - Imagem esquemática que compara os resultados da inspeção pelo método dipolo (ago/23) com os do levantamento planialtimétrico da LM (jun/24) em relação aos pontos de vazamento. Imagem da esquerda com a indicação esquemática (não georreferenciada) dos pontos de vazamento.



Fonte: adaptação do Google Earth e de JP Topografia, 2024.

O cadastro dos pontos de vazamento para o levantamento topográfico foi feito por meio da identificação das boias que haviam sido utilizadas para o cadastro destes pontos durante a inspeção pelo método dipolo, como pode ser observado na Figura 76.

Desta forma, as boias referentes aos pontos P1 ao P7, foram encontradas e cadastradas. No momento do levantamento planialtimétrico ainda não havia sido feita a localização visual dos furos, pois, em alguns casos, isso dependia da remoção dos pedregulhos e do geotêxtil do local.

O furo encontrado durante os trabalhos de topografia e indicado como P9 (Figura 75) está posicionado na GM da bolha 2 e pode ser visualizado na Figura . O furo que possui dimensão longitudinal de 6 cm, tem aparência de um dano por máquina e estava exposto, ou seja, sem a proteção do geotêxtil.

Figura 76 - Imagem de um dos pontos de vazamento cadastrados pela topografia, indicando a presença da boia que foi utilizada durante a inspeção do método dipolo. A boia foi presa por uma pequena corda de nylon a um dos pedregulhos que cobriam o geotêxtil.



Fonte: a autora, 2024.

Ao verificar a abertura da geomembrana no ponto do furo, esperava-se encontrar o solo compactado. Entretanto, na região abaixo do furo havia outra geomembrana que impedia a visualização e coleta do solo abaixo da mesma. Como o furo estava posicionado muito perto de duas soldas na geomembrana é possível que o transpasse da uma GM com a outra tenha proporcionado uma dupla camada de geomembrana nesta região.

Em situações em que duas geomembranas estão soldadas juntas, caso exista um furo na geomembrana de cima e a debaixo esteja intacta, o método dipolo não é capaz de identificar este furo. Isto porque é preciso que haja contato do líquido de cima da geomembrana com o solo abaixo da mesma. Caso haja uma segunda GM, ela impede esta passagem e não se observa a anomalia do campo elétrico neste ponto. Caso a GM debaixo apresente também um vazamento que permita o contato do líquido de cima da GM com o solo, o vazamento poderá, então, ser identificado. Acredita-se que este tenha sido o motivo de a inspeção do método dipolo não ter identificado este furo na GM, ou seja, a presença da GM debaixo tenha impedido a passagem de lixiviado para o solo e a identificação do vazamento na inspeção. Entretanto, em sendo este o caso, este dano no geossintético não representa um ponto de vazamento de lixiviado para o solo, pois estaria isolado por uma camada de GM embaixo.

Figura 77 - Imagens que apresentam o furo (foto inferiores) identificado na GM da bolha 2 (foto superior) em local próximo a duas soldas (foto inferior direita) e posicionado abaixo do nível operacional de lixiviado na LM (condição evidenciada na foto superior).

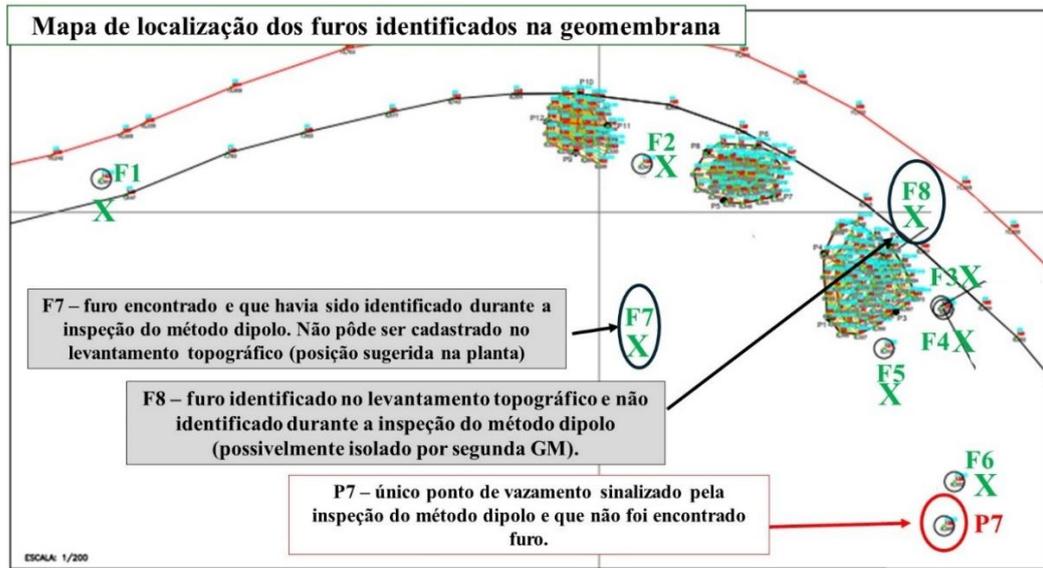


Fonte: a autora, 2024.

Findo o levantamento topográfico e após mais quatro dias de rebaixamento do nível de lixiviado da lagoa foi iniciado o trabalho de busca por todas as boias, retirada dos pedregulhos e geotêxtil para localização dos furos. A

Figura 78 apresenta o mapa com a localização dos pontos de vazamento onde furos foram encontrados na GM. A excessão do F7, cuja localização é indicativa, todos os demais foram georreferenciados.

Figura 78 - Mapa com a localização dos furos na geomembrana da LM.



Fonte: a autora, 2024.

A Tabela 11 apresenta os dados de cadastro dos furos localizados e referenciados na Figura 78. As imagens de cada um dos pontos de furo encontrados, bem como a informação relação à condição do geotêxtil, formato do furo, se houve ou não coleta do solo abaixo da GM e a causa sugerida para os danos estão apresentados nas Figura 79 a 83. Como poderá ser observado na Tabela 11 e na Figura 82 (a), o ponto F7 (Figura 78) possui dois furos no mesmo local. Na inspeção pelo método dipolo, quando dois furos estão muito próximos, o equipamento pode emitir apenas um sinal sonoro único, pois o sinal de um furo pode interferir no outro.

Tabela 11 – Dados cadastrais dos furos identificados na geomembrana da LM conforme referênciado na Figura 78.

ID Furo	Local	Coordenada	Cota	Tamanho (cm)
F1	talude	E=678062.946 / N=7483402.497	8,39	21 x 17
F2	base - entre bolhas 5 e 6	E = 678103.1980 / N=7483403.6080	8,35	4,5
F3	base - ao lado da bolha 2	E = 678125.4620 / N=7483392.9700	8,32	3
F4	base - ao lado da bolha 2	E = 678125.6260 / N = 7483392.7250	8,35	3,5
F5	base - ao lado da bolha 2	E = 678121.2160 / N=7483389.7930	8,31	4
F6	base - entorno distante bolha 2	E = 678126.4610 / N = 7483379.8190	8,33	6
F7 A	base - na direção das bolhas 5 e 6	Não cadastrado	8,31	5
F7 B	base - na direção das bolhas 5 e 6	Não cadastrado	8,31	1
F8*	base - na bolha 2	E = 678120.7650 / N = 7483396.1990	8,43	6

Fonte: a autora, 2024.

De acordo com os dados da Tabela 11, todos os furos identificados na base possuem dimensão de até 6 cm (medida de seu comprimento). O único furo identificado no talude apresentou dimensões bastante superiores (21 x 17 cm) às dos furos da base. Apesar deste furo do talude não estar em uma região de bolhas, era perceptível o descolamento da GM do talude de solo, como pode ser observado na Figura 79 (a). É provável que este descolamento seja decorrente de processo erosivo no solo compactado deste local, provocado pela passagem contínua do lixiviado pelo furo existente na GM. Outra informação que se depreende da Tabela 11 é a densidade de furos após a confirmação dos pontos de vazamento identificados pelo método dipolo: 9 furos totais em uma área de 15.000 m<sup>2</sup> de geomembrana, o que representa 6 furos/10.000 m<sup>2</sup>. Estes resultados indica maior quantidade de vazamentos por área do que 64% dos reservatórios avaliados por ZIDAN et al., 2024.

Figura 79 - Imagens e informações dos furos encontrados na geomembrana da LM: (a) furo 1 e (b) furo 2.



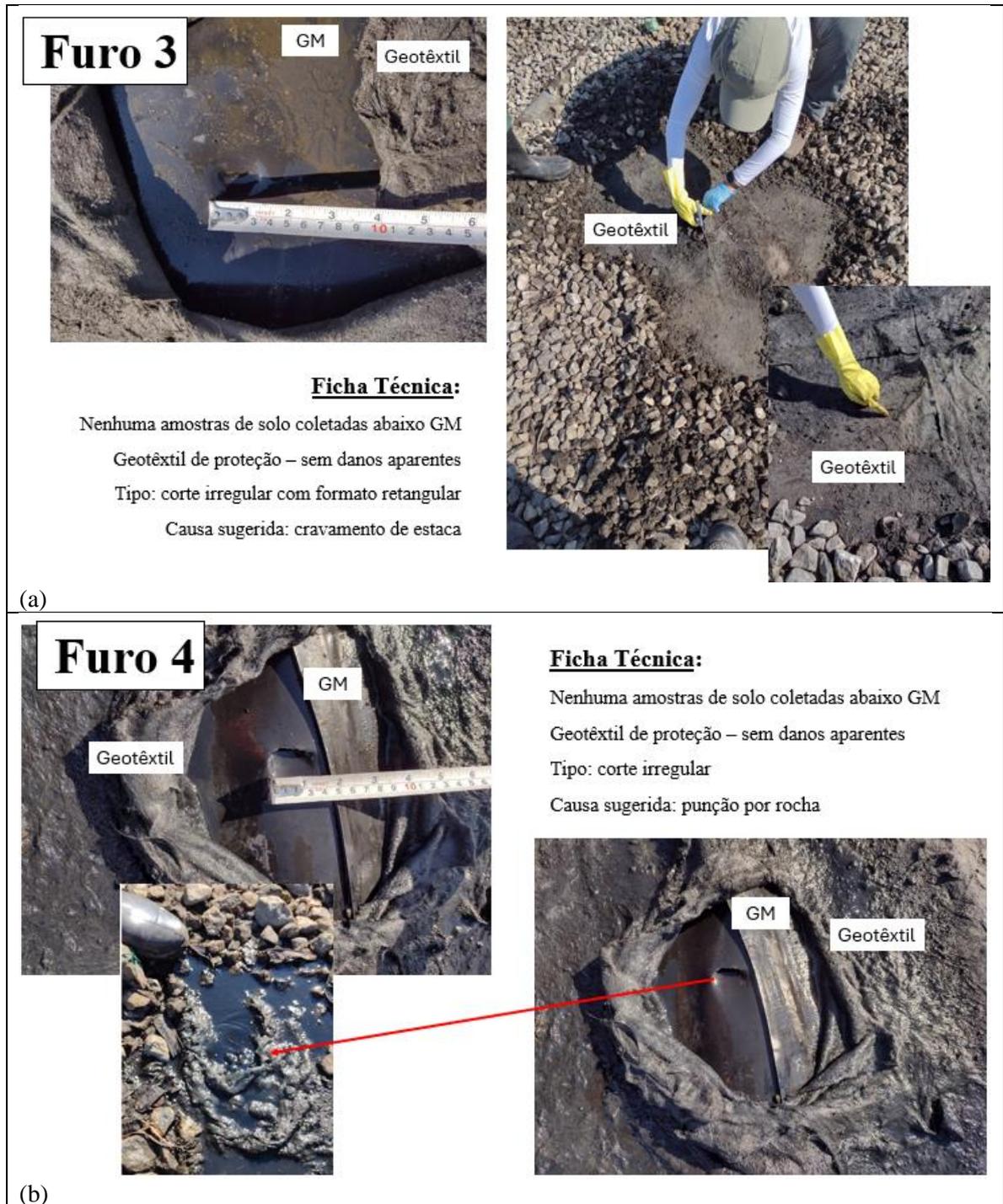
(a)



(b)

Fonte: a autora, 2024.

Figura 80 - Imagens e informações dos furos encontrados na geomembrana da LM: (a) furo 3 e (b) furo 4.



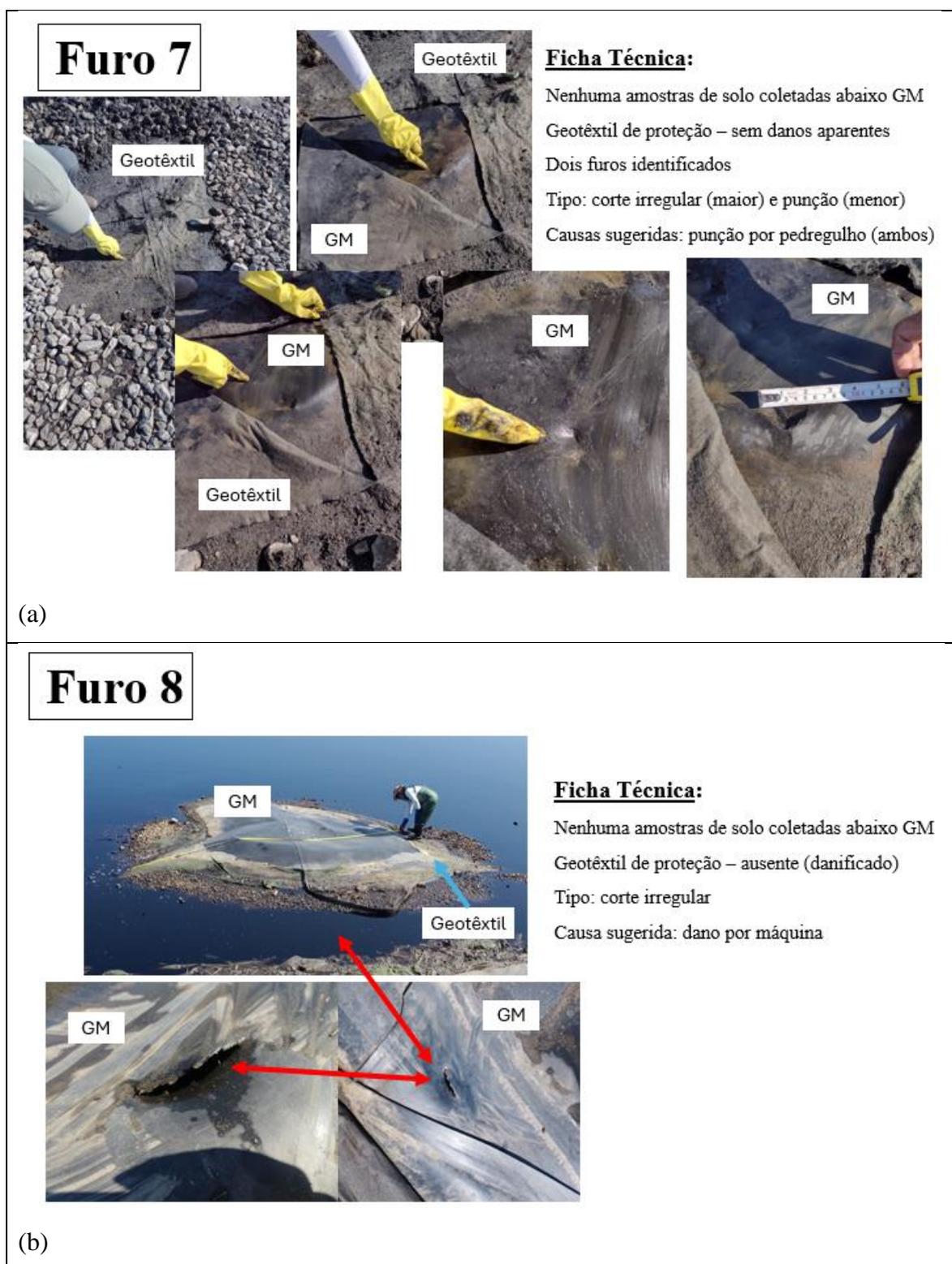
Fonte: a autora, 2024.

Figura 81 - Imagens e informações dos furos encontrados na geomembrana da LM: (a) furo 5 e (b) furo 6.



Fonte: a autora, 2024.

Figura 82 - Imagens e informações dos furos encontrados na geomembrana da LM: (a) furo 7 - com duas perfurações e (b) furo 8.



Fonte: a autora, 2024.

A Tabela 12 apresenta um resumo das seguintes informações dos furos localizados: identificação, condição do geotêxtil, formato do furo, causa provável e proposição do momento da ocorrência do dano.

Tabela 12 – Informações consolidadas sobre os furos localizados e causas prováveis na LM.

ID Furo	Condição do geotêxtil <sup>1</sup>	Formato do furo <sup>1</sup>	Causa provável <sup>2</sup>	Momento sugerido do surgimento <sup>3</sup>
F1	sem geotêxtil	corte irregular	máquina	operação LM
F2	SDA <sup>4</sup>	corte linear	corte com estilete	instalação da lagoa
F3	SDA <sup>4</sup>	corte irregular em formato retangular	estaca	instalação da lagoa
F4	SDA <sup>4</sup>	corte irregular	punção	instalação da lagoa
F5	SDA <sup>4</sup>	corte irregular	máquina	instalação da lagoa
F6	SDA <sup>4</sup>	corte irregular	máquina	instalação da lagoa
F7 A	SDA <sup>4</sup>	corte irregular	punção	instalação da lagoa
F7 B	SDA <sup>4</sup>	punção	punção	instalação da lagoa
F8	sem geotêxtil	corte irregular	máquina	instalação da lagoa

<sup>1</sup>Informação baseada na observação visual do geotêxtil ou do furo.

<sup>2</sup>Causa sugerida com base na comparação das imagens dos furos encontrados com imagens catalogadas de furos identificados em trabalhos de campo anteriores (no anexo B).

<sup>3</sup>Proposição baseada na avaliação das informações da causa provável.

<sup>4</sup>Sem dano aparente.

Relativamente às informações consolidadas da Tabela 12, discorre-se a seguir sobre a avaliação das informações que levaram à proposição do momento sugerido do surgimento de cada um dos furos.

O F1 é o único furo de talude e o que apresentou dimensões significativamente superiores aos demais. A posição do furo estava ligeiramente abaixo do nível operacional de lixiviado na lagoa e em um local onde a altura da crista do talude era bem acima do nível do líquido. Um tipo de incidente do qual se ouvem muitos relatos em lixões e em alguns aterros é a queda de animais (como cachorros) em lagoas de lixiviado. Em situações onde o resgate é dificultado pela altura do talude em relação ao nível do líquido, a utilização de máquinas pode viabilizar a retirada do animal com vida. Considerando o tamanho deste furo, sua localização muito próxima ao nível do líquido e seu formato, é provável que esta tenha sido a causa deste dano à GM, o qual provavelmente ocorreu durante o período operacional da lagoa.

Os demais furos identificados, todos na base da lagoa, possuem causas associadas ao processo de instalação da geomembrana ou aplicação do material de cobertura, como se apresenta a seguir.

O F2 (corte com estilete) é um tipo de furo muito encontrado em inspeções de GM coberta com solo. Este tipo de corte é feito com estilete, pelos próprios instaladores, para possibilitar que a GM seja puxada em algum ponto. Estes pontos podem ser reparados durante a própria instalação, o que não foi o caso do F2.

Os F5 e F6 têm formatos muito parecidos com os danos por máquina pesada e o geotêxtil de proteção da GM acima destes furos estava intacto. Por isso, acredita-se que eles sejam decorrentes do processo de instalação da GM.

Os F4, F7A e B possivelmente foram causados pela aplicação dos pedregulhos acima do geotêxtil, principalmente pelo formato dos furos e pela presença de outros pontos de puncionamento no seu entorno (caso do F7A e B). Estes furos evidenciam a inadequação do projeto empregado no reservatório, o qual contemplou o uso de pedregulhos sobre a GM. O emprego do geotêxtil de proteção, não foi suficiente para impedir que os furos ocorressem na GM.

O F3 tem formato que assemelha-se com uma perfuração com estaca. Como o geotêxtil estava intacto, é provável que o dano tenha ocorrido logo após o processo de instalação da GM e antes da aplicação dos pedregulhos.

O F8 tem formato similar a de um dano por máquina. Pela ausência do geotêxtil no local não é possível afirmar que se formou durante a instalação da GM ou na aplicação do geotêxtil e pedregulhos.

Face ao acima exposto, sugere-se que oito dos nove furos identificados surgiram durante o processo de instalação da LM e possivelmente foram os precursores do vazamento do lixiviado no solo. Sugere-se que este fato evidencia que os furos na GM foram as causas da formação das bolhas na lagoa de montante.

### **3.6 Caracterização do lixiviado das LS e LM**

A Tabela 13 apresenta o resultado dos ensaios de caracterização do lixiviado, nas campanhas de agosto/23 (amostras de LM e LS) e de junho/24 (amostras de LM). Nesta Tabela também estão apresentadas as faixas de variação dos mesmos parâmetros analisados no lixiviado em estudos anteriores. Importante mencionar que o lixiviado analisado nos estudos anteriores foi coletado na lagoa posicionada ao lado da Estação de Tratamento de Lixiviado e que não está impermeabilizada com geomembrana. Todos os resultados encontrados para LM e LS estão dentro da faixa mais provável definida no estudo de SOUTO; POVINELLI (2007), cujos resultados figuram na Tabela 1.

Entre a coleta de ago/2023 e jun/2024 foram registrados 1.510 mm de chuvas na estação meteorológica do AMG<sup>5</sup>, um volume expressivo e que possivelmente influenciou na redução da concentração de alguns parâmetros analisados na LM na segunda campanha em relação à primeira (DQO, sódio, cloreto e potássio). Na mesma Tabela 13, os resultados das concentrações dos parâmetros avaliados em ago/23 e jun/24 que ficaram dentro da faixa de variação nos estudos anteriores desenvolvidos no AMG aparecem com a coloração vermelha e os demais, com preta.

Tabela 13 - Resultados da caracterização do lixiviado das lagoas sul (LS) e de montante (LM) juntamente com faixa de variação dos mesmos parâmetros obtidos em estudos anteriores desenvolvidos com o lixiviado do AMG.

Parâmetro	Un.	Resultados da caracterização			Estudos anteriores
		Lagoa Sul <sup>1</sup>	Lagoa de Montante <sup>1</sup>	Lagoa de Montante <sup>2</sup>	
pH	NA	9,06	8,51	8,45	6,4 - 8,8 <sup>4</sup>
Condutividade	mS/cm	5,5	13,73	13,93	12,7 - 25,7 <sup>4</sup>
Nitrogênio amoniacal	mg/L	1,54	950,4	1.249	1.116 - 3.050 <sup>4,6</sup>
DQO	mg/L de O <sub>2</sub>	669,4	1.843	1.302	2.665 - 3.085 <sup>4</sup>
Cloreto	mg/L	2.157	3.968	1.754	704,5 - 5.735 <sup>4</sup>
Sódio	mg/L	1.060	1.960	1.750	2.925 - 4.766 <sup>5</sup>
Potássio	mg/L	430	800	600	1.513 - 3.610 <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Resultado da análise de amostras coletadas em ago/2023 (1 amostra composta de cada lagoa)

<sup>2</sup> Resultado da análise de amostras coletadas em jun/2024 (2 amostras compostas da LM)

<sup>3</sup> Realizada apenas uma medição desta amostra para o referido parâmetro

<sup>4</sup> EDUARDO (2007)

<sup>5</sup> RITTER (1998); RITTER; CAMPOS (2006)

<sup>6</sup> LIMA (2016)

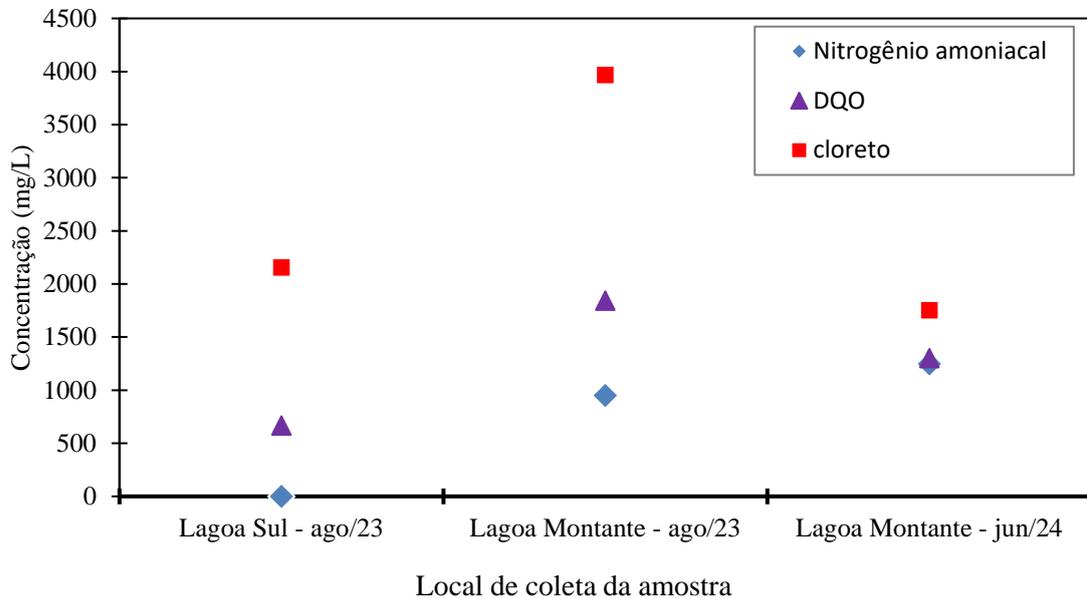
A análise dos resultados da primeira campanha, na qual as amostras da LS e LM tinham sido submetidas à mesma pluviometria, nota-se uma diferença na faixa de variação das concentrações dos parâmetros avaliados, nas duas lagoas, com os valores da LM mais altos do que os da LS para todos os parâmetros, exceto o pH. Também foi observada uma significativa diferença na coloração e odor das amostras: o lixiviado da lagoa sul apresentou odor menos intenso e coloração marrom, enquanto todas as amostras da lagoa de montante possuíam odor forte de amônia e coloração negra.

<sup>5</sup> Pluviometria registrada na estação meteorológica do AMG: 125 mm (ago/23), 38 mm (set/23), 243 mm (out/23), 88 mm (nov/23), 87 mm (dez/23), 468 mm (jan/24), 263 mm (fev/24), 160 mm (mar/24), 6 mm (abr/24) e 32 mm (mai/24) (STATLED BRASIL, 2024).

O gráfico da Figura 83 apresenta as diferenças das faixas de concentração dos parâmetros DQO, cloreto e nitrogênio amoniacal nas duas lagoas.

Notam-se valores inferiores de nitrogênio amoniacal e DQO na LS em relação a LM (nas duas campanhas). Com relação ao cloreto, na primeira campanha da LM os resultados foram superiores aos da LS e na segunda campanha foram inferiores. A mesma redução identificada para o cloreto, na segunda campanha da LM em relação à primeira, também foi observada com relação às concentrações de sódio e potássio.

Figura 83 – Gráfico das concentrações de cloreto, DQO e nitrogênio amoniacal para as lagoas sul e de montante nas duas campanhas realizadas.



Fonte: a autora, 2024.

Um dos principais motivos que poderia explicar as diferenças de concentrações obtidas nas duas lagoas é a forma de alimentação. A LM é alimentada por gravidade, recebendo um dreno antigo de lixiviado e que já existia desde antes da construção da lagoa. Além desta alimentação, a LM recebe o bombeamento contínuo de lixiviado da vala que circunda o AMG. A lagoa sul, por sua vez, não possui alimentação direta (por gravidade) de lixiviado e não possui bombeamento contínuo do efluente. Assim, enquanto a LM tem uma função de equalização de vazão e das concentrações dos elementos, para alimentar a Estação de Tratamento de Lixiviado do AMG, a LS tem uma função de lagoa de armazenamento e contingência para períodos de chuva e por isso as concentrações vão sendo diluídas com a pluviometria ao longo de um tempo após seu enchimento. Neste

sentido, pode-se afirmar que a caracterização da LM representa o lixiviado atualmente gerado no AMG e o que é tratado na Estação de Tratamento local.

Os resultados da Tabela 13 mostram também que, mesmo após 12 anos do fim do recebimento de resíduos no AMG, os resultados de condutividade, pH, cloreto e nitrogênio amoniacal no lixiviado da LM apresentaram-se dentro da faixa de variação destes índices encontrados na época da operação do aterro (EDUARDO, 2007); RITTER (1998); RITTER; CAMPOS (2006).

Com relação ao nitrogênio amoniacal da LM, os resultados encontram-se um pouco abaixo da faixa de variação observada nos estudos anteriores. Os resultados de DQO, porém, foram menores do que aqueles registrados nos estudos anteriores, apesar de ainda terem magnitude representativa de lixiviados. Esta similaridade não foi percebida com relação à LS, em função da diluição que o lixiviado deste reservatório sofreu.

A redução das concentrações de DQO no lixiviado é esperada após algum tempo do fim das atividades, o que é resultado da degradação da matéria orgânica presente no efluente em questão. Segundo KJELDSEN et al.(2002) é esperado que com o passar do tempo do encerramento do aterro, as características do lixiviado se modifiquem e seja observada redução da concentração de matéria orgânica. O mesmo autor menciona que este comportamento não é observado para o nitrogênio amoniacal. Com relação ao cloreto e a condutividade, também não se esperam reduções significativas com o tempo.

O fato das concentrações de cloreto, condutividade e nitrogênio amoniacal ainda se apresentarem elevadas reforça a importância da permanência do monitoramento e manutenção do tratamento deste efluente após algum tempo do encerramento dos aterros sanitários e lixões. Entretanto, no Brasil ainda não existe legislação ou requisito normativo que estabeleça a obrigatoriedade, os critérios e prazos para o monitoramento e manutenção de aterros e lixões encerrados. Nos Estados Unidos, este prazo está estabelecido na legislação e é de 30 anos, podendo ser diminuído ou aumentado para garantir a proteção da saúde humana e do meio ambiente.

Além disso, como consequência do longo tempo necessário para a redução da concentração dos poluentes, e conseqüentemente da toxicidade, é fundamental que se garanta e se monitore a estanqueidade dos reservatórios de lixiviado durante a operação e após o encerramento destes empreendimentos. Esta medida minimizará o risco de contaminação do solo e das águas subterrâneas.

### 3.7 Avaliação qualitativa do vazamento de lixiviado na região das bolhas

Na região das bolhas onde a GM aparece acima do lixiviado, houve a perda do contato do geossintético com o solo, como mencionado por GASSNER (2017) nos casos estudados. Desta forma, o lixiviado que vazou pelos furos na GM poderá infiltrar diretamente no solo compactado, em toda a área abaixo das bolhas (cerca de 39 m<sup>2</sup>), podendo ainda migrar pelas rugas conectadas com esta área, atingindo uma extensão ainda maior (ROWE et al., 2004). Como mencionado por ROWE et al. (2003), nesta região onde o lixiviado se acumula abaixo da geomembra, a contenção do efluente será feita apenas pela camada inferior a ela, ou seja, a GM não está desempenhando seu papel de barreira.

No Brasil não existe uma legislação que estabeleça limites máximos de vazamentos pela GM de reservatórios de lixiviados, como acontece em países como Estados Unidos (EPA, 1991) e Canadá (ALBERTA, 1996). Nestas localidades, a obtenção da autorização de funcionamento da lagoa está condicionada ao atingimento dos valores máximos da taxa de vazamento do lixiviado pela primeira camada de GM. Ou seja, a lagoa somente pode entrar em operação se a taxa de vazamento atingida for inferior ao valor da taxa máxima permitida. Logicamente, esta avaliação somente pode ser feita em projetos de reservatórios com dupla camada de GM e sistema de controle e detecção de vazamentos entre estas. Desta forma, durante o processo de licenciamento fica estabelecida a taxa permitida de vazamento pela GM e esta condição é verificada para a obtenção da autorização de funcionamento do reservatório e para sua permanência em operação.

Na província de Alberta, no Canadá, a recomendação técnica (ALBERTA, 1996) que estabelece a taxa máxima permitida de vazamento (ARL) em reservatórios de lixiviados impermeabilizados com GM considera equação desenvolvida por GIROUD; BONAPARTE (1989) para cálculo do ARL (equação 1). A taxa permitida considera no máximo uma área de 2 furos cada um com 2 mm de diâmetro na GM para cada 10.000 m<sup>2</sup> de área de base da lagoa.

$$Q = C_b \cdot a \cdot (2 \cdot g \cdot h_w)^{1/2} \quad \text{Equação (1)}$$

onde:

Q - taxa máxima permitida de vazamento (m<sup>3</sup>/s)

C<sub>b</sub> – coeficiente adimensional, adotam 0.6

a – área dos furos na GM

g – gravidade (m/s)

hw – altura do líquido na lagoa (m)

Na equação (1), o que influencia a taxa de vazamento é a altura do líquido e a área dos furos, já que os demais parâmetros são constantes.

Para se ter uma ideia de qual seria a taxa máxima de vazamento permitida para a LM (com 15.000 m<sup>2</sup> de área de base), adotando os critérios aceitos por Alberta (2 furos de 2 mm cada para cada 10.000 m<sup>2</sup> de GM na base), apresenta-se o cálculo a seguir, utilizando a equação (1):

Considera-se:

Q - taxa máxima permitida (m<sup>3</sup>/s)

C<sub>b</sub> – coeficiente adimensional, adotam 0,6

a – área do furos, ( $\pi \times 0,001^2$ ), considerou-se o diâmetro de cada furo = 2 mm

g – 9,8 m/s

hw – considerou-se 1,5 m de altura de lixiviado na LM

$$Q = 0,6 (\pi \times 0,001^2) (2 \times 9,8 \times 1,5)^{1/2}$$

$$Q = 1,02 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \text{ ou } 0,88 \text{ m}^3/\text{dia} \text{ para cada furo}$$

Tendo a LM uma área de GM de 15.000 m<sup>2</sup>, seriam permitidos até 2 furos por cada 10.000 m<sup>2</sup>, então a taxa máxima de vazamento permitida para a LM seria 1,77 m<sup>3</sup>/dia de acordo com legislação vigente na localidade de Alberta.

Entretanto, utilizando a mesma equação e mesmos parâmetros para calcular a taxa de vazamento da LM considerando os 9 furos existentes, obter-se-ia um valor 4,5 vezes maior do que o permitido pela legislação de Alberta. Nestas condições, considerando que 8 dos 9 furos na GM da LM são possivelmente decorrentes de seu processo de instalação, esta lagoa não teria recebido autorização para operar se tivesse sido instalada na localidade de Alberta.

Importante mencionar ainda que os furos encontrados na LM possuem diâmetro superior aos 2 mm previstos na equação (1). Tal fato implicaria em uma taxa de vazamento superior ao valor obtido por esta equação. Além disso, a equação não contempla o incremento do vazamento em decorrência da perda de contato do solo com a geomembrana na área das bolhas e toda a área de rugas presentes na GM. Segundo GIROUD et al. (1992),

a qualidade do contato entre a GM e o CCL é um dos fatores chaves que governam a taxa de vazamento pelo sistema de barreiras composto.

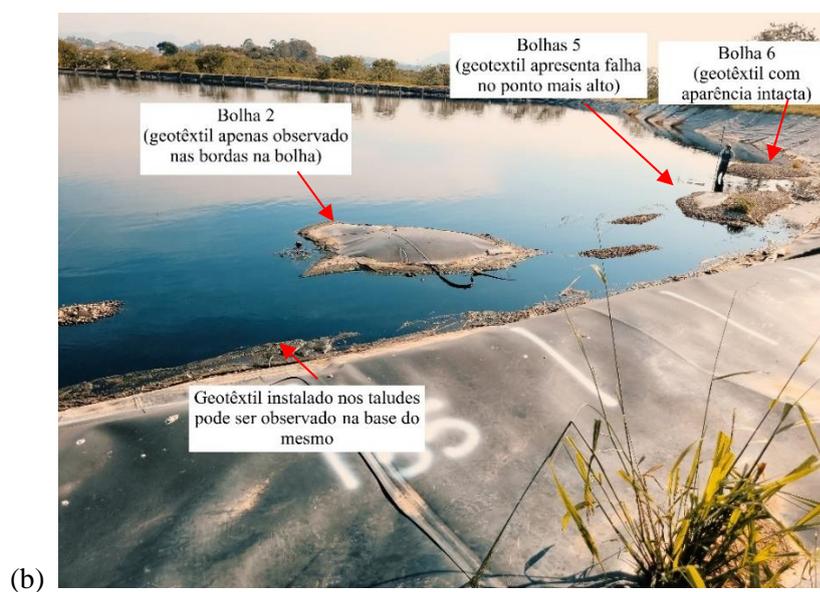
Face ao acima exposto, há que mencionar que a ausência de legislação no Brasil estabelecendo limites máximos para o vazamento em reservatórios com GM, como já estabelecido em Alberta e nos Estados Unidos, torna o armazenamento de lixiviado de aterros sanitários com grande potencial de risco de contaminação do solo e do lençol freático a médio e longo prazo. Somado a isto, ainda não há a exigência, e qualquer menção na legislação, com relação à recomendação ou obrigação da implantação da dupla camada de geomembrana e sistema de controle e detecção de vazamentos nos reservatórios de lixiviado. Esta condição permitiria minimizar a contaminação do solo em caso de vazamento da GM e gerenciar situações de furos no geossintético. Além disso, ainda não é praticada no país a avaliação da estanqueidade após a instalação da GM e não são feitos monitoramentos periódicos visando reparos necessários após vazamentos. E para reservatórios com uma única camada de geomembrana, padrão adotado no Brasil, não há sistema de monitoramento e controle de vazamentos e por isso não é possível identificar que o vazamento está ocorrendo.

### **3.8 Caracterização do geotêxtil de proteção da GM da LM**

Durante a realização dos trabalhos de inspeção da LM, em ago/2023, notaram-se pontos de dano no geotêxtil de proteção da geomembrana, especialmente na região exposta da mesma, ou seja, nos taludes e área das bolhas. As imagens apresentadas na Figura 84 ilustram estas observações.

A exposição a agentes de intemperismo natural, como a radiação UV, é uma das principais causas de falha prematura de materiais poliméricos, como geotêxteis (ALLEN, 2016; KOEERNER et al., 2017), sendo o tipo de geotêxtil não tecido agulhado mais suscetível (KOEERNER et al., 2017). Segundo VALENTIN et al. (2021) e CARNEIRO; LOPES (2017), quando os geotêxteis são expostos à radiação UV durante curtos períodos na instalação, a degradação observada pode não ser significativa, particularmente se a formulação polimérica incluir aditivos adequados. Em condições de exposição prolongada, como foi o caso dos geotêxteis expostos na LM, os efeitos da degradação por UV podem ser analisados comparando-se as propriedades físicas e mecânicas dos geotêxteis com uma amostra de referência (amostra não exposta vs. amostra exposta) (APARICIO-ARDILA et al., 2021).

Figura 84 – Imagens que evidenciam as falhas no geotêxtil aplicado nos taludes (a) e na área das bolhas da lagoa de montante (b) e (c).

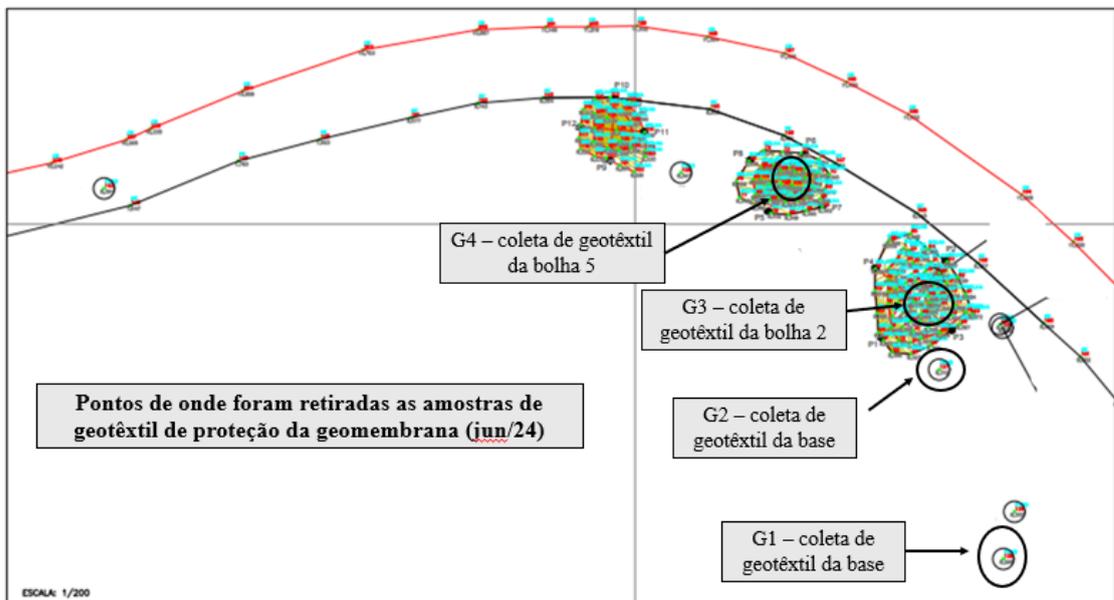


Fonte: a autora, 2024.

A avaliação da condição de exposição do geotêxtil (GT) à radiação UV nos permite definir algumas categorias: a exposição mais prolongada do GT foi nos taludes da LM (desde a construção da lagoa – cerca de 13 anos) e a segunda maior exposição foi do GT da área das bolhas (desde o surgimento das mesmas – 11 anos). E com relação à exposição do GT na área das bolhas, pode-se afirmar que na bolha 6, o GT ficou protegido pelos pedregulhos. O que não ocorreu com as bolhas 2 e 5 que eram maiores e possivelmente o maior alongamento da GM expulsou os pedregulhos, deixando o GT mais exposto à radiação UV. Por este motivo é que foi possível notar visualmente que o GT da bolha 6 estava íntegro e os das bolhas 2 e 5 não. A comparação visual das amostras de GT das bolhas e da base da lagoa também mostrou diferenças significativas na integridade do material.

Considerando a relevância do GT na LM em relação à proteção da GM às tensões e danos potenciais que poderiam ser causados pelos pedregulhos, foram coletadas 4 amostras do geotêxtil de proteção em diferentes locais da LM: região da bolha 2, da bolha 5, em cima do furo 5 (base) e em um local da base onde não foram encontrados furos, conforme indicado na Figura 85.

Figura 85 - Mapa com a localização dos pontos em que foram retiradas as amostras de geotêxtil de proteção da geomembrana da LM.



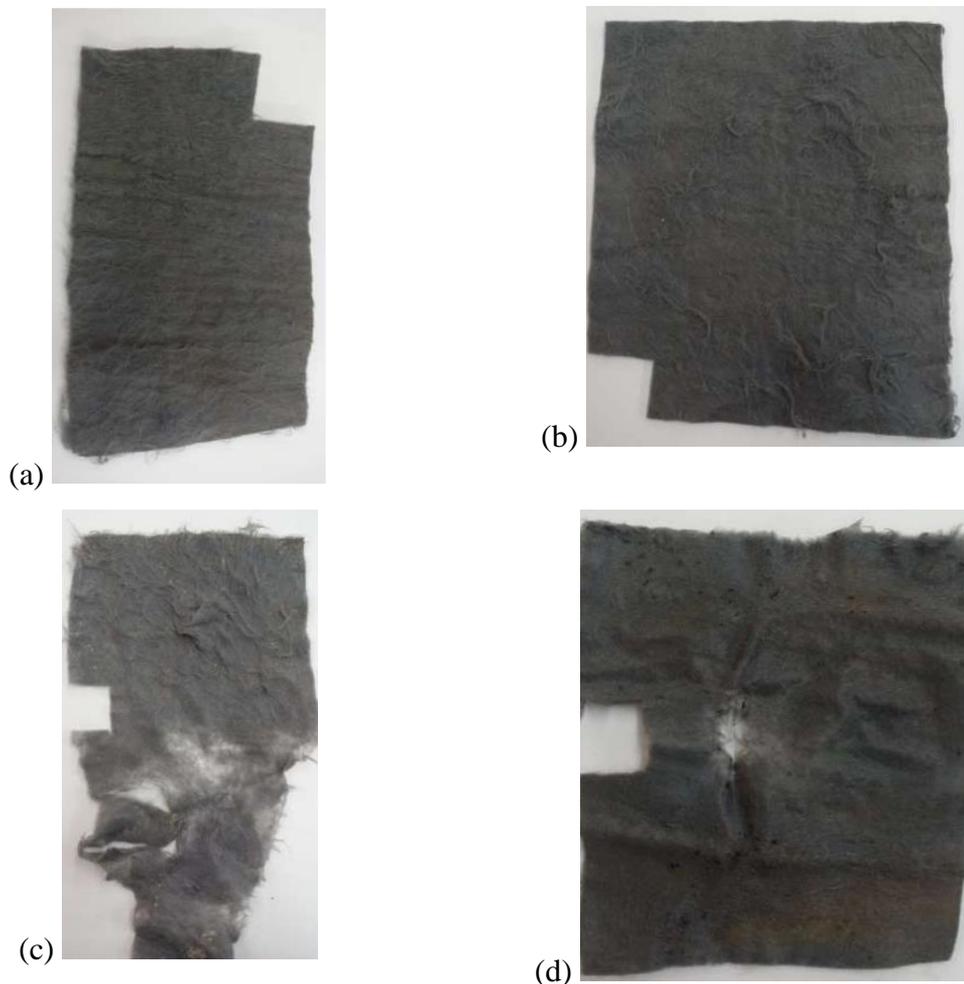
Fonte: a autora, 2024.

A escolha dos pontos de amostragem do geotêxtil tiveram por objetivo avaliar a alteração da integridade do material na região das bolhas e na base da LM, em diferentes condições de exposição do material à radiação UV. Considerando o geotêxtil como

elemento de proteção da GM, que atuaria para prevenir o puncionamento decorrente da aplicação dos pedregulhos, entendeu-se que seria importante conhecer a massa por unidade de área do material na base e região das bolhas. Esta avaliação permitiria, inclusive, avaliar a degradação do material pela ação da radiação UV na região das bolhas em relação à base da lagoa. Segundo a equipe responsável pela gestão do AMG, as especificações e documentos de qualidade referentes ao GT aplicado na LM não estavam disponíveis.

As imagens das amostras coletadas seguem apresentadas na Figura 86.

Figura 86 - Imagem das amostras de geotêxtil que foram coletadas: (a) amostra 1 – base sem furo; (b) amostra 2 – base com furo; (c) amostra 3 – bolha 2 e (d) amostra 4 – bolha 5.



Fonte: a autora, 2024.

O resultado da análise da massa por unidade de área para cada uma das amostras de geotêxtil, segue apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de massa por unidade de área nas amostras de geotêxtil de proteção da GM

Amostras	Origem	Massa por unidade de área (g/m <sup>2</sup> )	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
G1	Base sem furo	569,59	37,03	6,50
G2	Base com furo	530,25	32,26	6,08
G3	Bolha 2	257,17	60,80	23,64
G4	Bolha 5	379,14	130,00	34,30

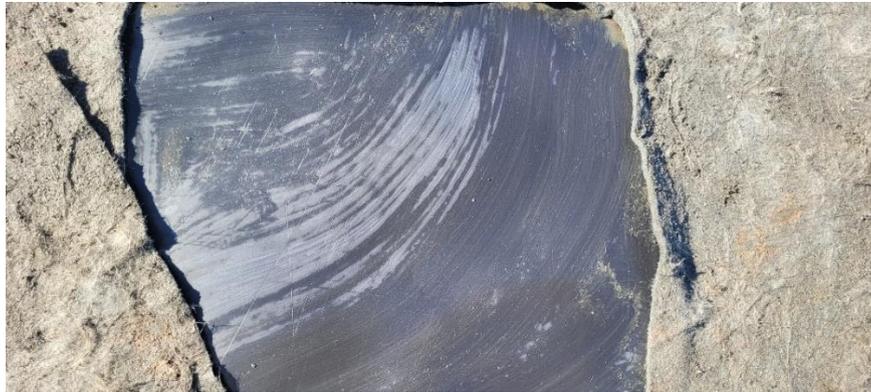
Fonte: Instituto Mauá, 2024.

Os resultados apresentados na Tabela 14 evidenciam valores de massa por unidade de área inadequados para a aplicação na LM para todas as amostras de geotêxtil. Além disso, estes resultados parecem estar condizentes com as imagens da Figura 86 e com as observações de campo em relação aos danos no geotêxtil, observados na região superior das bolhas 2 e 5. Considerando como referência os valores de massa por unidade de área do geossintéticos nas duas amostras retiradas da base da lagoa, nota-se uma redução importante na mesma propriedade na região da bolha 5 e uma redução ainda maior na bolha 2. Esta diferença nos valores de massa por unidade de área parece estar associada à exposição prolongada do GT na região das bolhas. Considerando que a área da bolha 2 era maior do que a da bolha 5 (23 m<sup>2</sup> contra 9 m<sup>2</sup> na condição do levantamento topográfico) é esperada uma maior exposição ao UV no GT da bolha 2 para um mesmo nível de lixiviado da LM. Estes resultados corroboram com as imagens do geotêxtil na região das bolhas que foi apresentado na Figura 86.

Os estudos desenvolvidos por APARICIO-ARDILA et al. (2021) avaliaram a degradação de geotêxtil não tecido de polipropileno exposto ao ambiente natural em painéis localizados na Universidade de São Paulo. O geossintético ficou exposto de 1 a 3 anos e amostras foram coletadas para medir alterações estruturais nas propriedades físicas e de tensão do material. Os resultados obtidos com esta pesquisa evidenciaram que a exposição ao intemperismo causou uma diminuição considerável na massa por unidade de área e na espessura do geotêxtil após 1 ano (9% de redução) e 3 anos (32% de redução) de exposição. O mesmo estudo concluiu que a diminuição da espessura do geotêxtil durante o tempo de exposição tendeu a estar de acordo com a perda de massa por unidade de área, já que ambos experimentaram uma redução similar. Além disso, APARICIO-ARDILA et al. (2021) sugeriu que essa variação de massa por unidade de área e espessura durante a exposição ao intemperismo estaria relacionada à degradação das fibras danificadas, causando a perda de massa do polímero, conforme também relatado por CARNEIRO et al. (2018).

A similaridade dos resultados de massa por unidade de área nas duas amostras da base da lagoa e a sua comparação com os resultados na região da bolha estão condizentes com o aspecto visual das amostras coletadas na base da lagoa. Imagens apresentadas na Figura 87, tiradas na área da GM que ficou protegida por uma destas amostras de geotêxtil (G1) mostram que este material de fato atuou minimizando maiores danos por punção da GM. Entretanto, notam-se na superfície da GM riscos que devem estar associados aos pedregulhos aplicados sobre a superfície do geotêxtil.

Figura 87 – Imagem da GM que ficou protegida pela amostra um do geotêxtil, a que apresentou maior valor de massa por unidade de área entre as amostras avaliadas.



Fonte: a autora, 2024.

Em contrapartida, houve regiões da base da lagoa, e não necessariamente na região das bolhas, em que o punção chegou a danificar e até perfurar a GM. Este foi o caso da região da GM dos furos 2 (F2 – observadas marcas de punção sem furar), 4 e 7 (onde houve furo por punção) conforme apresentado no item 3.5 desta tese.

De acordo com PALMEIRA (2018), a escolha do geotêxtil a ser utilizado como camada de proteção deve partir da determinação da maior tensão vertical a que estará submetida a GM e da dimensão dos grãos do solo que serão aplicados sobre a mesma. Posteriormente deve-se calcular a força média de perfuração do grão em contato com o geossintético (pelo emprego de gráfico proposto por HOLTZ et al., 1997). Posteriormente, aplicam-se os fatores de segurança ao valor de força média obtida previamente para a determinação da força perfurante de projeto. A partir disto, devem-se utilizar o gráfico (proposto por WERNER et al., 1990) obtido a partir de ensaios de perfuração com diferentes solos e produtos geossintéticos em contato para a escolha da massa por unidade de área do geotêxtil de proteção da GM.

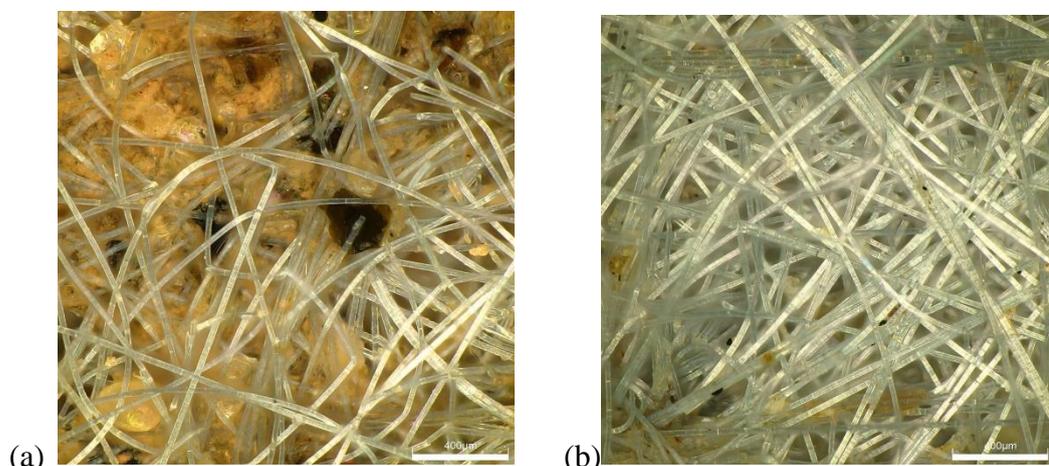
Segundo GEROTO (2008), havia duas filosofias difundidas no meio técnico para avaliar o desempenho da camada de proteção da GM. A filosofia americana, baseada na prevenção de danos em curto prazo e a alemã, baseada na prevenção de danos de longo prazo, procurando restringir deformações na superfície da geomembrana que pudessem acelerar processos de ruptura frágil, como o fenômeno de fissuramento sob tensão.

Ainda de acordo com GEROTO (2008), a filosofia americana teria sido proposta por pesquisadores da Universidade de Drexel (EUA), por meio de extenso programa experimental com base em ensaios de puncionamento hidrostático. Tais pesquisadores teriam sugerido o emprego de geotêxteis com menores médias de massa por unidade de área (de 250 a 600 g/m<sup>2</sup>) para evitar a ocorrência de rasgos ou perfurações na GM. Já a filosofia alemã sugeriria o emprego de geotêxtil não tecido com elevados valores de massa por unidade de área (maiores que 2.000 g/m<sup>2</sup>) ou camadas de geotêxtil preenchidas com produtos sintéticos que atuassem como amortecimento.

A avaliação dos resultados da massa por unidade de área das amostras de geotêxtil da base da LM, a partir das duas filosofias descritas por GEROTO (2008), sugere que o dimensionamento do geossintético da lagoa estaria alinhado com a filosofia norte americana que visava evitar rasgos e perfurações na GM, no curto prazo. Entretanto, não é possível afirmar que este entendimento tenha sido levado em conta quando da concepção do projeto da LM.

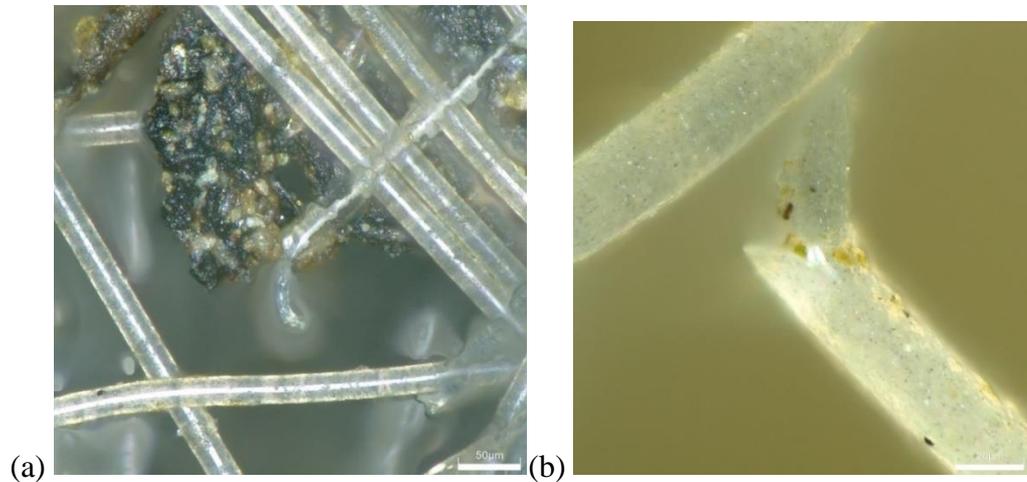
As imagens obtidas no microscópio DSX das quatro amostras de geotêxtil avaliadas em diferentes aumentos estão apresentadas nas Figuras 89 a 91.

Figura 88 – Imagem de microscópio DSX-1000 de amostra: (a) G1 do geotêxtil (base da lagoa em local sem furo) e (b) G3 (região da bolha 2), ambas com aumento de 142 vezes.



Fonte: Instituto Mauá, 2024.

Figura 89 - Imagem de microscópio DSX-1000 de amostra G4 do geotêxtil (região da bolha 5) com aumento de: (a) 712 e (b) 2.030 vezes.



Fonte: Instituto Mauá, 2024.

Figura 90 - Imagem de microscópio DSX-1000 de amostra G2 do geotêxtil (base da lagoa com furo) com aumento de 142 vezes.



Fonte: Instituto Mauá, 2024.

Em todas as imagens obtidas, foi notada a presença de resíduos junto às fibras do geotêxtil. Nas imagens de amostras da base da lagoa, a quantidade de resíduos foi mais significativa do que nas amostras retiradas da região das bolhas, como seria esperado e pode ser observado na

Figura 88. Esta diferença na condição das amostras dificultou uma avaliação comparativa da integridade das fibras do geossintético nas duas situações (área das bolhas e base), já que na maioria das amostras da base, as fibras estavam rodeadas pelos resíduos, como pode ser observado na Figura 90. Danos nas fibras da amostra G4 (região da bolha

5), visualizados na Figura 89, ilustram a degradação do material quantificada pelos resultados de massa por unidade de área das quatro amostras de GT.

### **3.9 Caracterização da geomembrana da ancoragem da LM**

Durante a realização dos estudos, tentou-se levantar junto com a equipe de gestão do AMG o laudo de caracterização ou de qualidade da geomembrana adquirida para instalação na LM. Entretanto, foi informado que estes registros não estavam disponíveis. Não havia ainda a informação de qual teria sido o fabricante da GM utilizada, também não existiam amostras do material que não houvesse sido instalado. Complementarmente, foi feito contato com uma das principais empresas fabricantes de GM no país, para tentar identificar se esta teria sido a fabricante da GM. Representantes deste fabricante, porém, afirmaram que o referido geossintético não foi de fabricação desta empresa. Tal fato impossibilitou que fosse feita avaliação as propriedades originais da geomembrana instalada.

Também não foram disponibilizados documentos do controle de qualidade da instalação da GM da LM. A equipe gestora do AMG informou que não teria em seus arquivos estes documentos.

Em função destes fatos, optou-se por avaliar amostras da GM na região da ancoragem da lagoa, por entender que esta seria a região do geossintético que teria sofrido menos influência dos fatores responsáveis pelo envelhecimento do material. Nestes pontos, em função do material estar menos exposto à elevação de temperatura e à exposição aos raios UV, o material apresentaria propriedades possivelmente mais próximas daquelas apresentadas em sua avaliação inicial (na fabricação).

Os resultados da avaliação das propriedades de resistência à tração e ao puncionamento para três amostras coletadas na ancoragem da LM estão apresentados na Tabela 15. Os valores obtidos foram comparados com o padrão mínimo recomendado pela GM-13 para as mesmas propriedades deste material e com os resultados obtidos por ROWE et al. (2003). Neste estudo foram avaliadas as propriedades de tração de amostras de GM lisa de PEAD com 1,5 mm de espessura e que foi utilizada para impermeabilizar uma lagoa de lixiviado pelo período de 14 anos, tempo similar ao período de operação da LM (13 anos). Os resultados de ROWE et al. (2003), que também estão apresentados na Tabela 15, são referentes a amostra retirada da área da ancoragem da lagoa, mesma posição de onde as amostras de GM da LM foram coletadas.

Tabela 15 - Resultados da caracterização das amostras da GM e comparação com valores da norma GM-13 e com ROWE et al.(2003).

Propriedade	Un.	Amostra 1 (ponto 85) Resultado	Amostra 2 (ponto 128) Resultado	Amostra 3 (ponto 97) Resultado	ROWE et al., 2003	Padrão GM- 13 <sup>1</sup>
<b>1.Resistência ao puncionamento</b>	N	646,0	597,0	611,0	ND <sup>2</sup>	> 400
<b>2.Propriedades de tração:</b>						
2.1 Resistência no escoamento	kN/m	29,9	28,4	30,7	37	> 22
2.2 Alongamento no escoamento	%	13,4	13,3	13,6	11	> 12
2.3 Resistência na ruptura	kN/m	26,2	16,2	ND <sup>2</sup>	33	> 40
2.4 Alongamento na ruptura	%	602,0	520,5	ND <sup>2</sup>	646	> 700

<sup>1</sup>Valores referentes à GM lisa de PEAD de 1,5mm de espessura.

<sup>2</sup> dados não disponíveis

Fonte: adaptado de Laboratório de Geossintéticos da USP-São Carlos, 2024.

Os resultados da avaliação da resistência ao puncionamento das amostras da LM atendem aos critérios definidos pela GM-13. Os resultados de resistência no escoamento e alongamento no escoamento, para as três amostras da LM, também se apresentaram dentro do padrão recomendado pela GM-13 para GM de PEAD lisa com 1,5 mm de espessura. Os resultados de resistência no escoamento apresentaram-se com margem maior em relação aos valores referencias. Entretanto, os valores de resistência e alongamento na ruptura para as amostras 1 e 2 ficaram abaixo do padrão recomendado pela GM-13. Os resultados destas propriedades para a amostra 3 não foram disponibilizados pelo laboratório. As amostras de GM avaliada por ROWE et al. (2003) também apresentaram resultados de resistência e alongamento na ruptura e alongamento no escoamento abaixo do recomendado pela GM-13. Segundo ROWE et al. (2003), um aumento da resistência no escoamento e uma diminuição tanto da resistência quanto da deformação na ruptura das geomembranas de HDPE sugere que o material se tornou frágil o que pode ser resultado do processo de envelhecimento do material. Sugere-se que o processo de envelhecimento proposto por ROWE et al. (2003) esteja ocorrendo com as amostras da GM extraídas da LM.

Os resultados dos ensaios de resistência à tração são úteis para verificar a variação nestas propriedades após o envelhecimento do geossintético (BUENO et al., 2004). Ainda segundo estes autores, além da solicitações de natureza químicas e físicas, também atuam sobre as geomembranas esforços mecânicos decorrentes de várias ações, como o próprio peso (no caso de taludes principalmente), o peso do resíduo a estocar, a dilatação térmica,

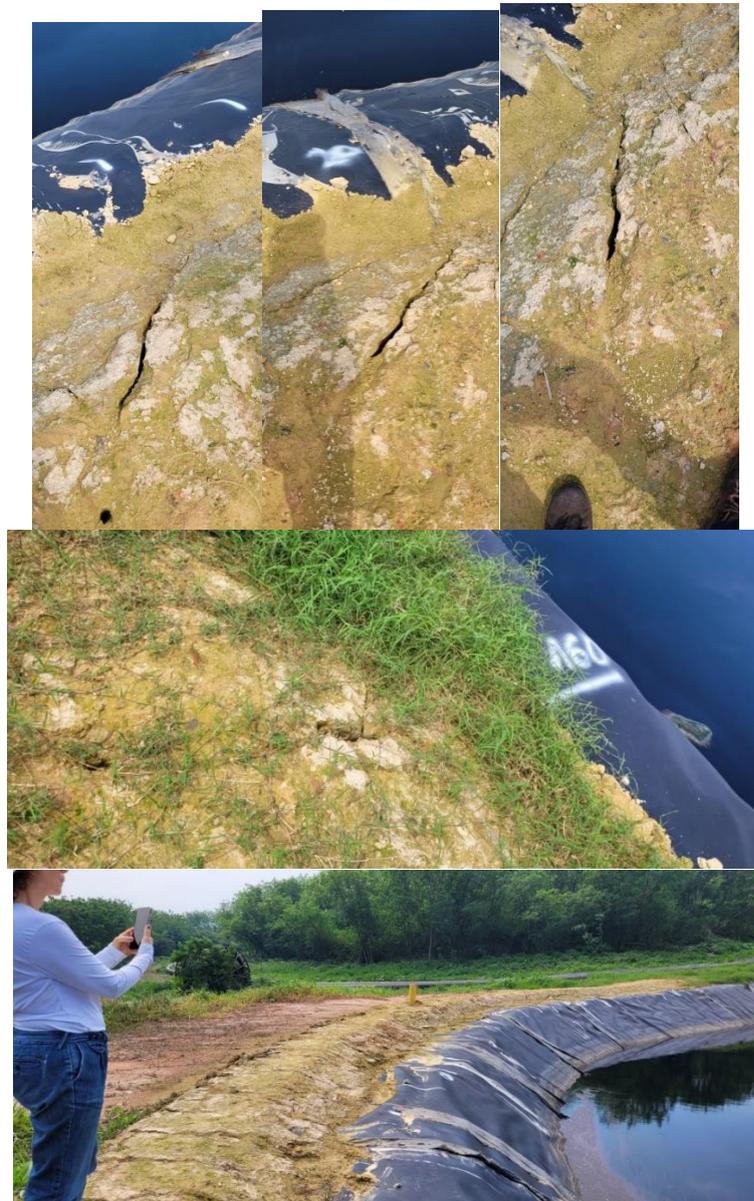
recalques, dentre outras. Segundo HORROCKS; D'SOUZA (1992) a aplicação de uma grande tensão externa ou carga no polímero resultará em uma diminuição da sua vida útil.

Considerando a inexistência de laudos de caracterização da GM originalmente instalada da LM, não é possível afirmar que as propriedades de resistência e alongamento na ruptura estivessem abaixo do padrão estabelecido pela GM-13 à época de sua instalação. Entretanto é esperado que nas demais regiões da GM, onde houve exposição a outros fatores como temperatura e radiação UV que atuam na aceleração do processo de degradação da GM (LAVOIE et al., 2020), os resultados da resistência na ruptura sejam ainda menores, como foi observado por ROWE et al. (2003). Estudos futuros poderão avaliar estas mesmas propriedades da GM no talude, base e área das bolhas para confirmar este entendimento. Avaliações das propriedades de OIT e resistência ao *stress cracking* também serão interessantes e complementares para avaliar o estágio do processo de envelhecimento da GM.

Outro aspecto importante a registrar durante as atividades de campo é que foram observadas algumas trincas no solo próximo à ancoragem da geomembrana, como pode ser observado na Figura 91. As imagens apresentadas foram tiradas no entorno do ponto 160, o qual está localizado entre o local da coleta das amostras 1 (ponto 85) e 2 (ponto 128), estando mais próximo deste último. Durante a visita foram identificados outros pontos com trincas no entorno da lagoa, o quais não estão representados na Figura 91 e cujos locais não foram registrados.

Considerando as informações fornecidas pelos representantes da empresa que opera o AMG de que abaixo da LM existem resíduos, a possibilidade de ocorrência de recalques na área da lagoa é alta.

Figura 91 – Imagens que apresentam trincas identificadas no entorno da LM e próximas ao ponto de ancoragem da GM.



Fonte: a autora, 2024.

Quando a degradação da GM é tal que ela não consegue resistir a uma condição de tensão, podem surgir trincas que possibilitarão a passagem do lixiviado para as camadas inferiores (ABDELAAL et al., 2014). Duas situações relevantes em que a GM fica exposta à tensão na base da LM são: indentação da GM causada pelos pedregulhos instalados acima do geotêxtil e o recalque da lagoa (BRACHAMAN; SABIR, 2010) possivelmente ocasionado pela existência de resíduos na base da lagoa somada ao seu peso. Além disso, na área das bolhas a GM ficou submetida a condições de alongamento e retração, estando

em contato com o lixiviado e exposta à temperaturas elevadas e à radiação UV. Todos estes fatores contribuem para acelerar o processo de envelhecimento da GM.

Todos estes aspectos sugerem que estudos complementares para avaliar as propriedades de resistência mecânica, *stress cracking* e OIT<sup>6</sup> (propriedades cujos resultados indicam condição de envelhecimento da GM) de amostras do geossintético na base da LM e região das bolhas.

### **3.10 Caracterização do solo abaixo da LM**

Neste item serão apresentados os resultados da caracterização das amostras de solo coletadas abaixo da GM, e na região da ancoragem que, segundo informações de representantes da gestão do AMG teriam a mesma origem do solo aplicado na base da LM. Estes resultados apresentam as características do material que atenuaria a passagem do lixiviado para as camadas inferiores à LM. Além disso, serão apresentados os resultados da caracterização das amostras de solo que foram coletadas abaixo dos furos identificados na GM da LM.

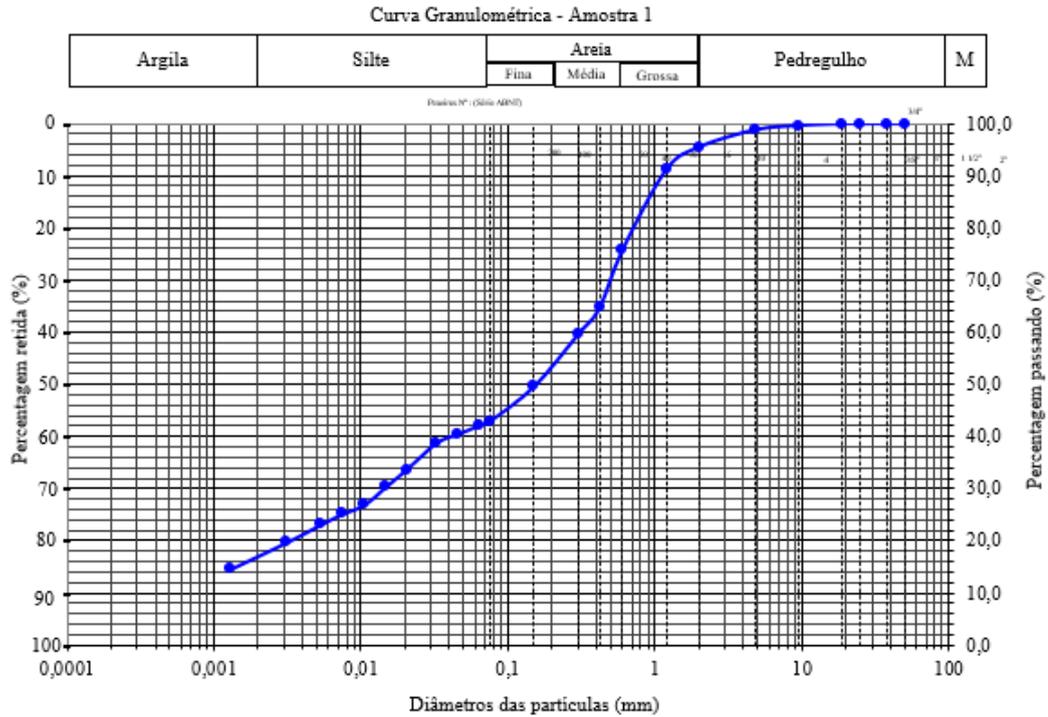
#### **3.10.1 Avaliação do solo original empregado abaixo da GM da LM**

A Figura 92 apresenta as curvas granulométricas referentes às quatro amostras do solo abaixo da LM, ou seja, o solo compactado que está abaixo da GM de PEAD.

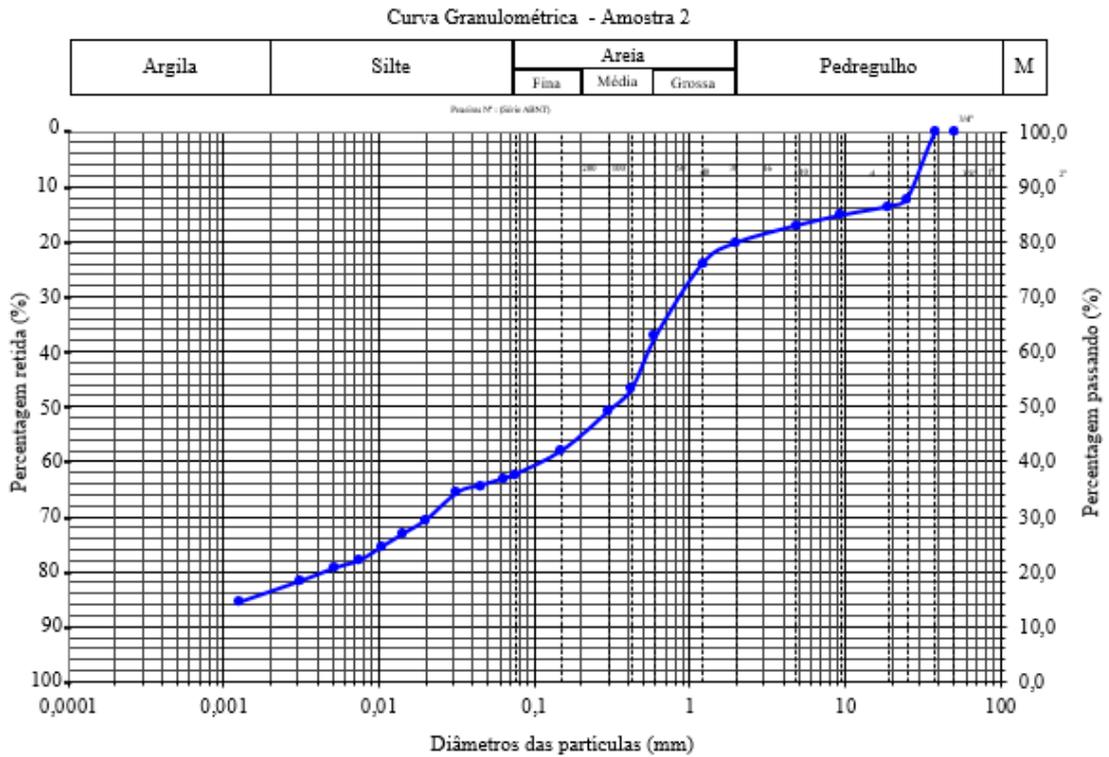
---

<sup>6</sup> Tempo de indução oxidativo.

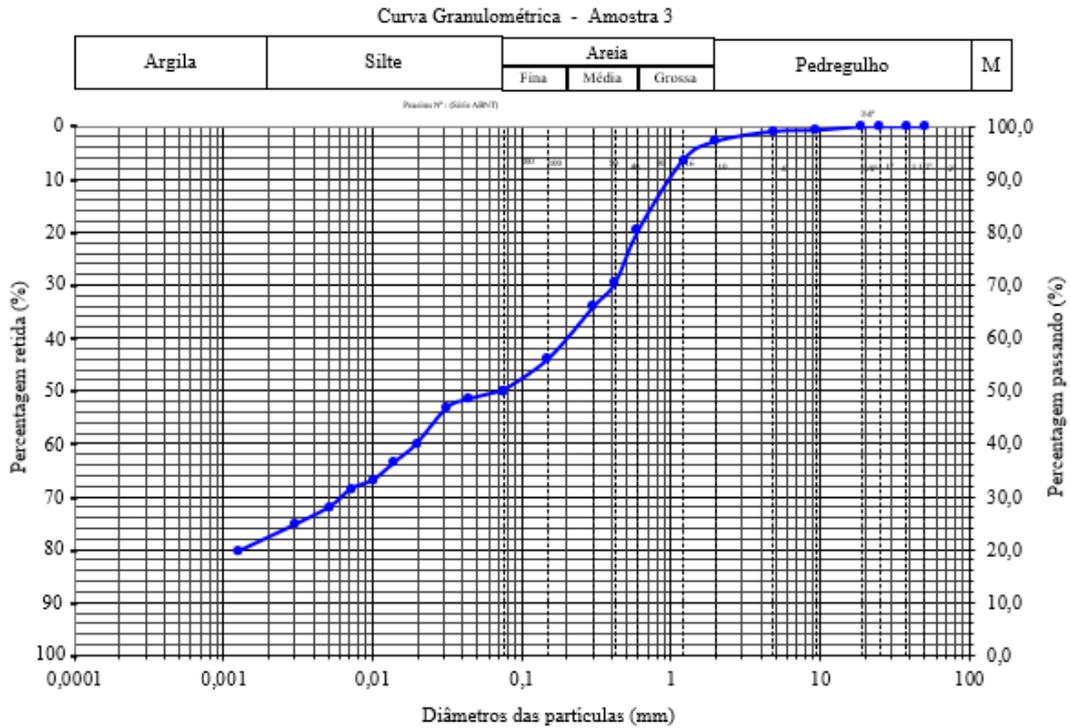
Figura 92 - Curvas granulométricas das amostras de solo compactado, posicionado abaixo da GM de PEAD da LM: (a) amostra 1 - ponto 97; (b) amostra 2 - ponto 128; (c) amostra 3 - ponto 85 e (d) amostra 4 - ponto 120.



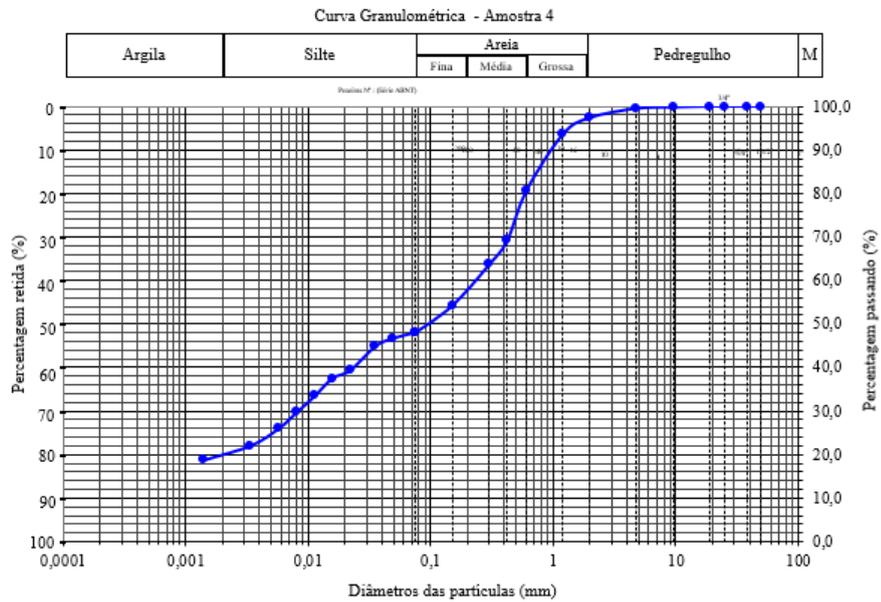
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2024.

As Tabelas 16 e 17 apresentam a composição granulométrica e a classificação destas mesmas amostras de 1 a 4, coletadas nos pontos 97, 128, 85 e 120 da LM, conforme marcações nas bordas da lagoa.

Tabela 16 - Composição do solo compactado abaixo da GM da LM.

Composição granulométrica	Amostra - 01	Amostra - 02	Amostra - 03	Amostra - 04
Pedregulho	4%	20%	2%	2%
Areia grossa	20%	17%	17%	17%
Areia média	23%	18%	21%	23%
Areia fina	10%	7%	10%	10%
Silte	26%	22%	28%	28%
Argila	17%	16%	22%	20%

Fonte: adaptado de Laboratório de Mecânica dos Solos da UERJ, 2024.

Tabela 17 – Classificação do solo compactado abaixo da GM da LM.

Descrição do ensaio	Resultados			
	Amostra - 01	Amostra - 02	Amostra - 03	Amostra - 04
Localização na LM	Ponto 97	Ponto 128	Ponto 85	Ponto 120
Fração passa peneira n. 200	43%	38%	50%	48%
Limite de liquidez	41%	43,4%	44,7%	45%
Índice de Plasticidade	14%	14,2%	13,8%	13%
Classificação do solo <sup>1</sup>	Areia silto-argilosa	Areia silto-argilosa	Areia silto-argilosa	Areia silto-argilosa
Sigla classificação solo	SM e SC	SM e SC	SM e SC	SM e SC

<sup>1</sup> Classificação Unificado do Solo (PINTO, 2006).

Fonte: a autora, 2024.

A composição granulométrica das amostras de solo possibilitou sua classificação segundo o Sistema Unificado (PINTO, 2006). Em todas as amostras, a fração passante na peneira 200 não foi superior a 50% e por isso foram classificadas como solos granulares. Considerando a relação entre a fração de pedregulho e areia em todas as amostras, todas se enquadraram como areia. E como a fração de finos nos quatro pontos avaliados é maior do que 12%, utilizou-se a carta de plasticidade para determinação da identificação secundária, a qual enquadrou todas as amostras como areia silto-argilosa. O resultado indicou uniformidade na classificação do material coletado em todos os pontos.

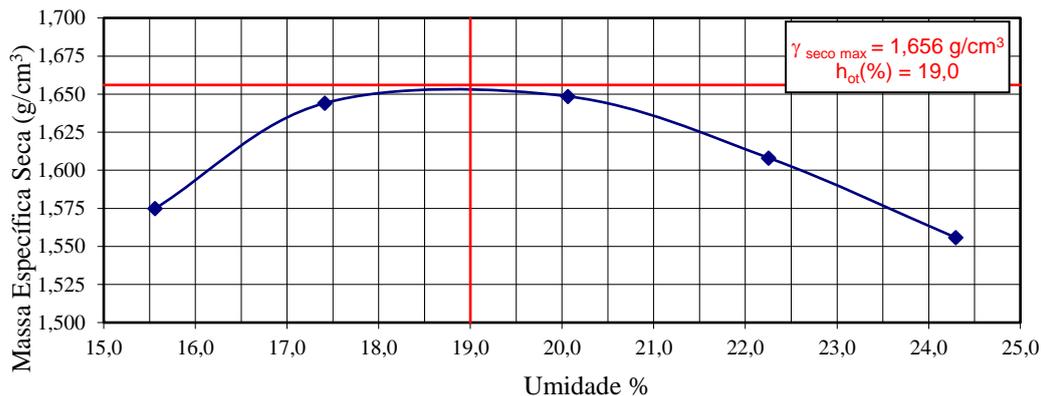
O resultado da classificação das amostras indica que o material utilizado não é o recomendado para ser utilizado como barreira. Segundo LEME (2013), os tipos de materiais mais utilizados como barreiras em aterros sanitários e citados na literatura são as barreiras de argilas naturais, as barreiras de solos argilosos compactados e as barreiras compostas por materiais sintéticos.

Segundo BOSCOV (2008), a seleção de materiais para serem utilizados como CCL geralmente se baseia na percentagem de argilas ou de finos, no limite de liquidez e índice

de plasticidade e na condutividade hidráulica, além de características da jazida como distância, homogeneidade e teor de umidade *in situ*. Entretanto, segundo a mesma autora, os requisitos de distribuição granulométrica e limite de consistência objetivam unicamente garantir um coeficiente de permeabilidade menor que  $10^{-9}$  m/s para a camada de solo compactado.

Neste sentido, para a amostra coletada no ponto 120, além dos ensaios de caracterização acima apresentados, foram realizados os testes de compactação para determinação da umidade ótima, necessária para a determinação do coeficiente de permeabilidade do solo. A Figura 93 apresenta a curva de compactação obtida para esta amostra, indicando que a umidade ótima ficou em 19%.

Figura 93 – Curva de compactação da amostra de solo coletada no ponto 120 da ancoragem da GM da lagoa de montante.



Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2024.

Os resultados do ensaio de permeabilidade de carga variável seguem apresentados na Figura 94 e o cálculo do coeficiente de permeabilidade da amostra, segue apresentado a seguir.

Para o cálculo da permeabilidade foi utilizada a equação (2):

$$k = 2,3 \times \frac{(a \times L \times RT)}{A \times t} \times \log_{10} \frac{h_i}{h_f} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

k = coeficiente de permeabilidade (cm/s)

a = área da bureta (cm<sup>2</sup>)

L = altura do molde (cm)

A = área do molde (cm<sup>2</sup>)

RT = fator de correção

t = tempo (s)

hi = carga inicial (cm)

hf = carga final (cm)

Figura 94 – Relatório do ensaio de permeabilidade, desenvolvido com a amostra de solo coletada no ponto 120.

Umidade Ótima		19,00%		Peso Específico Seco Máximo (g/cm <sup>3</sup> )		1,656		
<b>CARACTERÍSTICAS DO CORPO DE PROVA</b>							Molde N <sup>o</sup>	1
Umidade		Inicial		Final		Diâmetro do Molde (cm)	D	10,2
						Altura do Molde (cm)	L	10,00
Cápsula N <sup>o</sup>	325	525	522	536	Peso do Molde (g)	P	1370,00	
					Área do Molde (cm <sup>2</sup> )	A	81,7128	
Peso Úmido + Tara (g)	79,04	82,44	66,64	72,04	Volume do Molde (cm <sup>3</sup> )	A x L	817,128	
Peso Seco + Tara (g)	69,3	71,77	57,04	60,39	Área da Bureta (cm <sup>2</sup> )	a	0,25	
Água (g)	9,74	10,67	9,6	11,65	Peso Úmido + Molde (g)	PM	2984,00	
Tara(g)	16,35	13,44	12,31	13,78	Peso Úmido (g)	PU	1614,00	
Peso Seco (g)	52,95	58,33	44,73	46,61	Peso Seco (g)	PS	1363,83	
Umidade (%)	18,39	18,29	21,462106	24,99	Peso Esp. Úmido	γ h	1,975	
					Peso Esp. Seco	γ s	1,669	
Umidade Média (%)	18,34	23,23			Peso Esp. dos Grãos	Gs	2,379	
					Volume de Sólidos (cm <sup>3</sup> )	Vs	573,28	
Grau de Saturação (%)	102,59	129,91			Índice de Vazios	e	0,43	
					Porosidade (%)	n	29,84%	
						Grau de Compactação (%)	Gc	-
BURETA N <sup>o</sup> : A					ÁREA (a) (cm <sup>2</sup> ) : 0,25			
Carga Inicial hi (cm)	Carga Final hf (cm)	Δ h	Tempo t (seg.)	Temp.águ a T (oC)	Fator Cor. RT	Permeabilidade K (cm/seg)	Permeabilidade Média K20 (cm/seg.)	
112,0	102,0	10,0	945,5	25	0,811	2,45E-06	2,28E-06	
112,0	102,0	10,0	960	25	0,811	2,41E-06		
112,0	102,0	10,0	966	25	0,811	2,40E-06		
102,0	92,0	10,0	1116,5	25	0,811	2,29E-06		
102,0	92,0	10,0	1106,5	25	0,811	2,31E-06		
102,0	92,0	10,0	1116	25	0,811	2,29E-06		
92,0	82,0	10,0	1355,5	25	0,811	2,10E-06		
92,0	82,0	10,0	1336	25	0,811	2,13E-06		
92,0	82,0	10,0	1342	25	0,811	2,13E-06		

Fonte: Laboratório de Mecânica dos Solos, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2024.

A partir da equação e dados do ensaio realizado, chegou-se a permeabilidade média do solo de  $2,28 \times 10^{-6}$  cm/s (ou  $2,28 \times 10^{-8}$  m/s). Alguns órgãos ambientais (CETESB,1993; USEPA,1993) e autores da área, (BOSCOV, 2008; MACABIRA, 2002; PIEDADE JÚNIOR, 2003) recomendam solos com coeficiente de permeabilidade igual ou inferior a  $10^{-9}$  m/s em sistemas de barreiras de aterros sanitários. A comparação do resultado obtido com as recomendações de autores e órgãos ambientais indica que o material utilizado como CCL na LM não seria o recomendado para atuar no sistema de barreiras. Segundo BOSCOV (2008), a camada de solo é fundamental para o desempenho do sistema composto.

A autora menciona que recalques diferenciais podem acarretar danos na geomembrana e comprometer a eficiência do conjunto. Por este motivo o rigor da construção da camada de solo compactado deve ser o mesmo daquele empregado na instalação da GM, para que a qualidade do sistema de barreiras seja adequada.

Considerando que na região onde estavam presentes as bolhas da LM o lixiviado percolou pelos furos da GM e permaneceu em contato direto com o solo compactado, assume-se que o papel de contenção do efluente será feito exclusivamente pelo solo compactado (ROWE et al., 2003). Além disso, considerando a presença de rugas na GM, conectadas com esta região das bolhas, o espalhamento do lixiviado na interface entre GM e solo em outras áreas da LM, fora da região das bolhas, é bastante provável. E nestes locais, a GM também não estará atuando na contenção do lixiviado que estiver debaixo dela. Por este motivo, o tipo de solo a ser empregado abaixo da GM e a sua espessura são extremamente relevantes para atenuar o transporte de contaminantes para as camadas inferiores. No caso específico da LM, considerando que abaixo do solo compactado há uma camada de resíduos e que no AMG não há jazida disponível de solo natural para uso na impermeabilização, entende-se que o material empregado se justifica, pois minimizou o impacto ambiental dentro das possibilidades do projeto e orçamentárias. Entretanto, em aterros sanitários licenciados, em que apenas uma GM for empregada em reservatório de lixiviado, a seleção do solo a ser empregado e sua espessura devem ser criteriosamente avaliados.

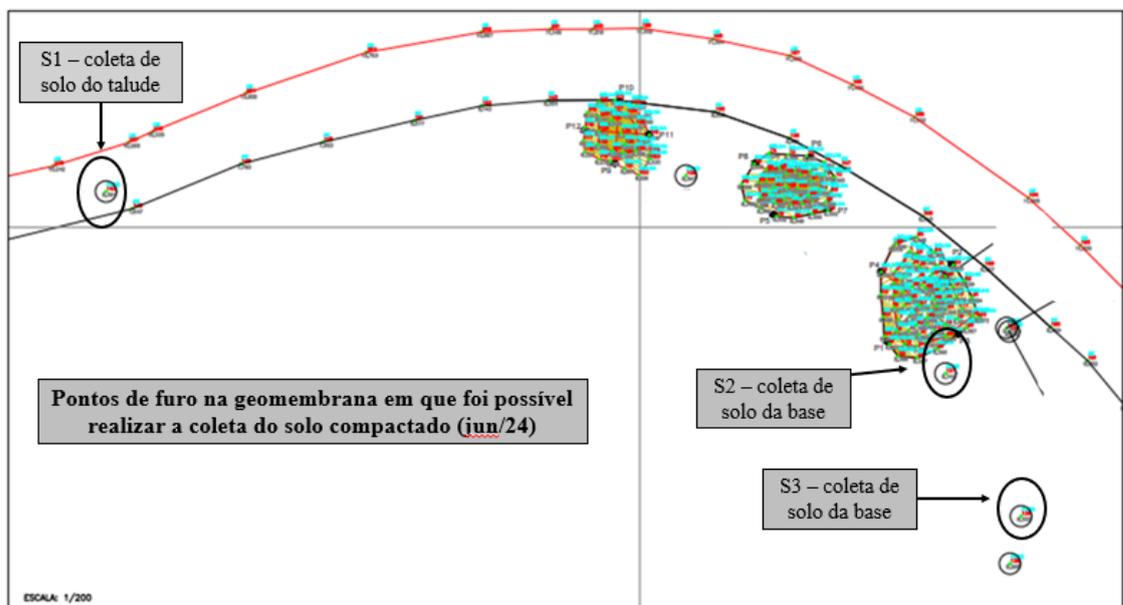
Considerando o resultado do coeficiente de permeabilidade obtido para a amostra 4 é possível inferir que, após 1 ano do início do vazamento do lixiviado no solo, este teria permeado toda esta camada, ou seja, um pouco mais de 70 cm. Neste sentido, considerando o surgimento das bolhas, acima do nível do lixiviado, há cerca de 11 anos é esperado que toda a camada de solo compactado abaixo desta região esteja contaminada com lixiviado.

Estudos futuros, desenvolvidos durante a exumação da LM poderão contemplar a coleta de amostra indeformada do solo compactado abaixo da GM para a realização do ensaio de permeabilidade. Os resultados neste caso, indicarão valores reais de permeabilidade no solo, considerando a condição de compactação adotada na implantação da lagoa.

### 3.10.2 Avaliação do solo coletado abaixo dos furos identificados na GM da LM

A coleta das amostras de solo abaixo da geomembrana foram viáveis em três dos furos identificados, pois somente nestes havia abertura suficiente para acesso do amostrador. Em todos estes pontos, o lixiviado cobria a geomembrana danificada quando o nível da lagoa era o operacional. Foram coletadas amostras em dois furos da base da LM (S2 e S3) e no único furo identificado no talude (S1), como está apresentado na Figura 95. No ponto S1 foram retiradas duas amostras de solo, no ponto S2 apenas uma amostra e no S3 retiraram-se duas amostras, totalizando 5 amostras. Além destas amostras, foram também analisadas duas amostras de solo do talude externo da área de jusante da LM. O objetivo da avaliação deste material foi de servir como *background* do solo local. Estas amostras foram coletadas com auxílio de pá e acondicionadas diretamente em saco plástico que foram armazenados em refrigerador até o dia da análise.

Figura 95 - Mapa com a localização dos pontos em que foram coletadas amostras do solo abaixo da geomembrana da LM.



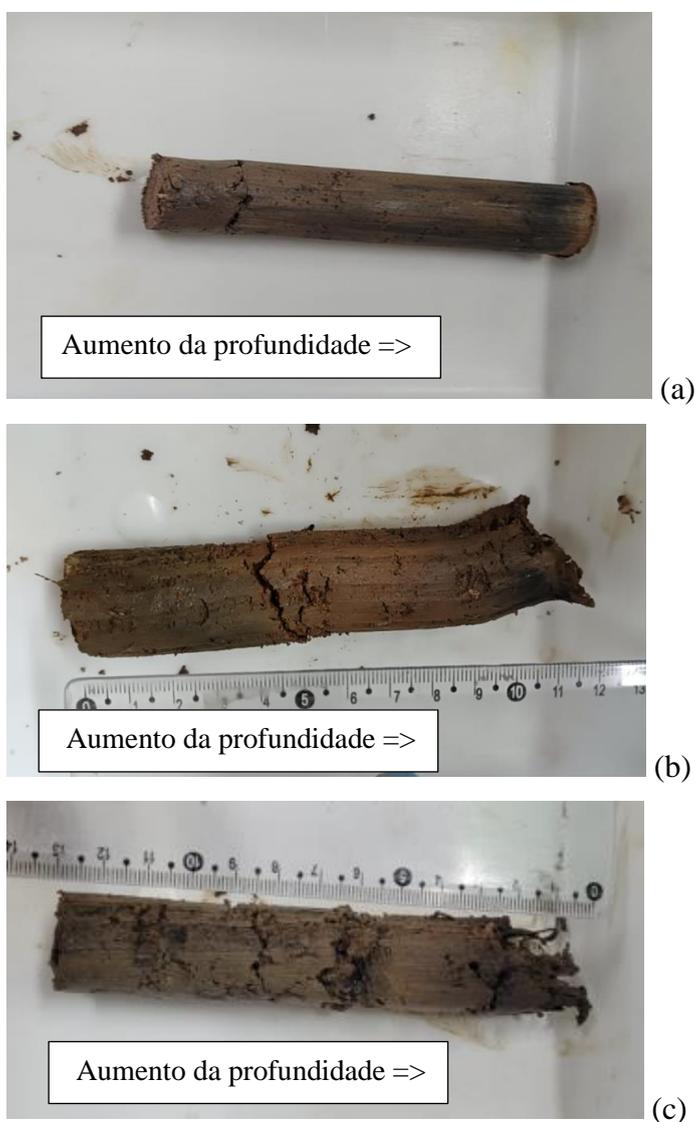
Fonte: a autora, 2024.

As amostras S1, S2 e S3 foram levadas ao laboratório ainda dentro do amostrador. Em algumas foi possível retirar a amostra com auxílio de um êmbolo. Em outros casos, porém, somente puderam ser retiradas do amostrador após o tubo de PVC ter sido serrado. As amostras, após retiradas foram colocadas em uma bandeja para medição do tamanho e

preparação para armazenamento até a data da realização dos ensaios. O acondicionamento do material foi feito em sacos plásticos, conservadas em refrigerador até a data da análise.

As amostras dos três pontos coletados apresentavam odor característico de lixiviado com grande intensidade de odor de amônia. A coloração escura observada nas amostras ilustra o processo de migração dos contaminantes do lixiviado no solo, o que pode ser evidenciado na Figura 96.

Figura 96 – Imagens das amostras de solo compactado coletadas com amostrador introduzido nos furos da GM da LM: (a) e (b) amostras da base e (c) amostra coletada no talude.



Fonte: a autora, 2024.

É interessante notar que a amostra coletada no talude, em torno de 9-10 cm de profundidade apresentou presença de resíduos de plástico, o que não foi notado nas demais amostras.

A Figura 97 apresenta o momento da retirada da amostra de solo compactado com auxílio de um êmbolo no laboratório.

Figura 97 – Imagem do momento da retirada de uma das amostras de solo do amostrador.



Fonte: a autora, 2024.

O resultado das análises químicas das amostras de solo retiradas dos pontos indicados na Figura 95 e o das amostras de *background* estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados dos ensaios com amostras do solo compactado que foi implantado abaixo da geomembrana da lagoa de montante e das amostras de *background*.

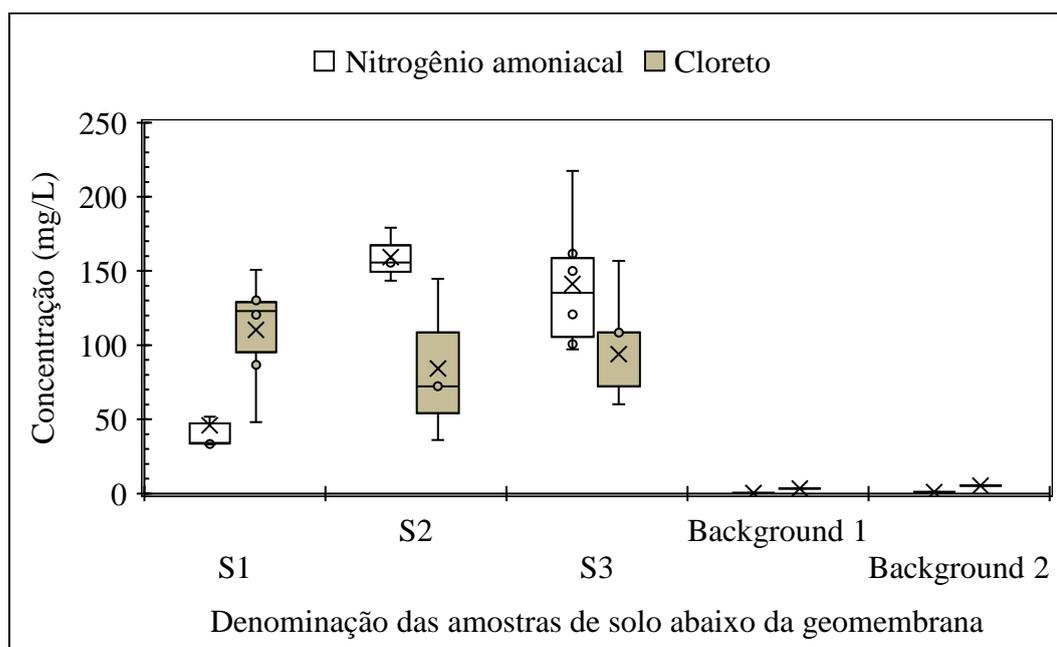
ID amostra	Profundidade (cm)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Nitrogênio amoniacal (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
S1	0-4	17,0	9,0	34,2	120,53	1887
S1	4-8	113,0	74,0	33,1	86,78	1436
S1	8-14	84,0	39,0	51,7	48,21	1276
S1	0-4	10,0	5,0	34,2	130,17	1952
S1	4-8	15,0	9,0	33,4	125,35	n.d.
S1	8-12	18,0	9,0	88,7	150,66	1844
S2	0-4	15,0	6,0	179,1	144,64	1805
S2	4-8	53,0	23,0	143,4	36,16	1320
S2	8-12	73,0	33,0	155,7	72,32	1641
S3	0-6	63,0	26,0	120,7	72,32	1896
S3	6-12	46,0	21,0	161,5	72,32	1577
S3	12-18	16,0	8,0	217,5	108,48	1734
S3	0-5	58,0	23,0	150,1	156,69	1335
S3	5-10	46,0	20,0	100,7	n.d.	1203
S3	10-15	48,0	20,0	97,2	60,27	1103
<i>Background 1</i>	n.a.	2,0	1,0	0,3	3,48	313
<i>Background 2</i>	n.a.	1,0	1,0	1,0	5,40	236

n.a. – não aplicável

n.d. – não disponível

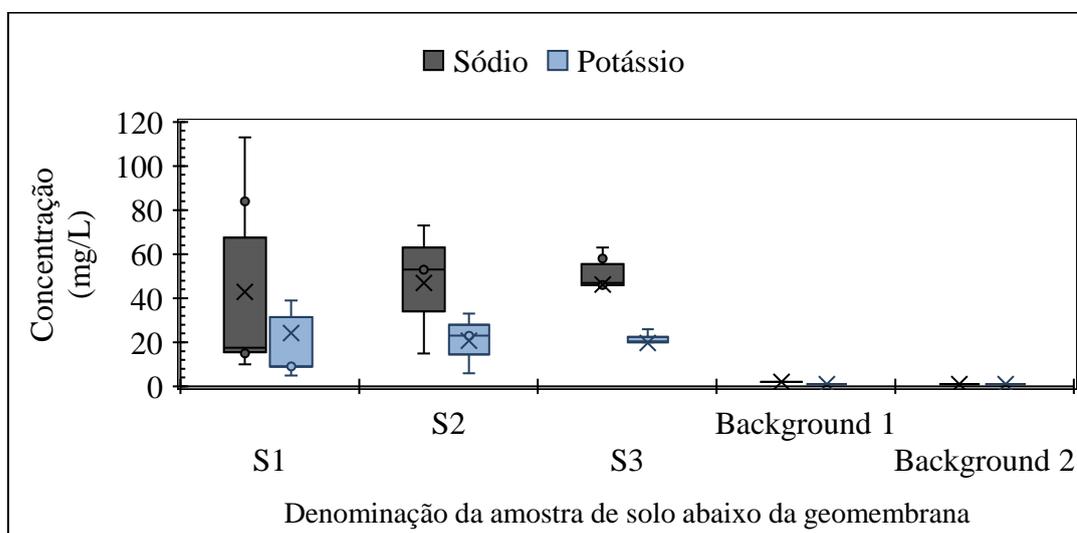
Os resultados apresentados na Tabela 18 estão plotados nos gráficos das Figura 98 a Figura 100 e permitem uma melhor visualização dos dados.

Figura 98 – Resultados das análises de nitrogênio amoniacal e cloreto para as três amostras de solo coletadas em diferentes profundidades (entre 0-18cm) abaixo da GM da LM e para as amostras de *background*.



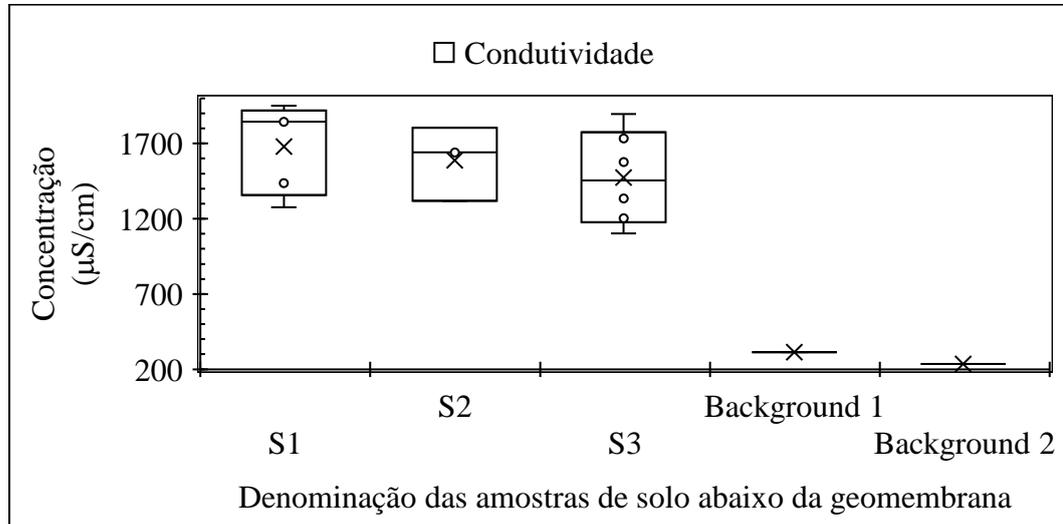
Fonte: a autora, 2024.

Figura 99 - Resultados das análises de sódio e potássio para as três amostras de solo coletadas em diferentes profundidades (entre 0-18cm) abaixo da GM da LM e para as amostras de *background*.



Fonte: a autora, 2024.

Figura 100 - Resultados das análises de condutividade para as três amostras de solo coletadas em diferentes profundidades (entre 0-18cm) abaixo da GM da LM e para as amostras de *background*.



Fonte: a autora, 2024.

A avaliação comparativa dos resultados de sódio, potássio, cloreto e condutividade nas três amostras não permite concluir sobre diferenças representativas entre suas concentrações. Nota-se, porém, que as concentrações destes parâmetros no solo apresentaram-se muito abaixo dos valores encontrados no lixiviado da LM para os mesmos parâmetros. Tal fato pode estar associado ao tipo de solo que foi empregado abaixo da GM, uma areia silto-argilosa, a qual possui coeficiente de permeabilidade superior ao recomendado por diversos autores (BOSCOV, 2008) e, em consequência, não tem capacidade de sorção para atenuar o transporte de contaminantes.

Os resultados das amostras de *background*, apresentaram concentrações muito inferiores para os mesmos parâmetros. Para o nitrogênio amoniacal, por exemplo, notam-se maiores concentrações nas amostras S2 e S3, pontos onde existiam furos na base da lagoa e na região das bolhas, em relação à amostra S1, no talude. Uma possível causa para esta diferença pode ser uma maior volatilização do nitrogênio amoniacal na região do furo do talude justamente por este ter dimensões muito maiores do que os furos da base.

Entretanto, em relação a todos os parâmetros avaliados é notória a diferença de concentração existente entre as amostras S1, S2 e S3 e as duas amostras de *background* avaliadas. Tal fato evidencia a presença de contaminantes do lixiviado nas amostras de solo abaixo da GM. Em situações como esta, torna-se importante a comparação das concentrações das amostras de solo com valores referenciais da legislação para

caracterização da contaminação para níveis aceitáveis ou passíveis de remediação. No caso do solo da LM esta avaliação não se faz necessária já que abaixo do solo existe uma camada de resíduos. Mas em aterros sanitários com lagoas de lixiviado, a avaliação da qualidade do solo com base na legislação é fundamental.

A Resolução Conama 420 dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. De acordo com esta resolução: “Na ocorrência comprovada de concentrações naturais de substâncias químicas que possam causar risco à saúde humana, os órgãos competentes deverão desenvolver ações específicas para a proteção da população exposta”. Entretanto, a lista de valores orientadores para solo e água subterrânea que apresenta concentrações de referência dos contaminantes não inclui os parâmetros que caracterizam contaminação por lixiviado de aterros sanitários como é o caso de cloreto nitrogênio amoniacal sódio potássio condutividade DQO e DBO, por exemplo. Logo, identifica-se uma lacuna na legislação ambiental brasileira pela ausência de valores orientadores para enquadramento de áreas contaminadas por lixiviado.

Relativamente às concentrações de cloreto encontrada no solo abaixo das LM, os resultados obtidos por ROWE et al. (2003) podem ser utilizados para uma comparação. Neste estudo foram realizadas análise de amostras de solo silto-argiloso instalado abaixo de uma geomembrana lisa de 1,5 mm, após exumação de uma lagoa de lixiviado de um aterro sanitário, a qual havia iniciado suas operações há 14 anos. A geomembrana apresentou cerca de 45 furos/10.000 m<sup>2</sup> além de outros tipos de defeitos identificados. Os resultados das análises de cloreto variaram entre 437 e 510 mg/L entre os primeiros 0,5 m do solo compactado abaixo da geomembrana. As concentrações de cloreto identificadas por ROWE et al. (2003) são superiores aos resultados obtidos para o solo abaixo da LM do AMG, as quais variaram entre 36 e 157 mg/L. Apesar da similaridade em relação ao tempo de operação das lagoas dos dois estudos, no AMG foi identificada uma quantidade inferior de vazamentos e o tipo de solo usado, areia silto-argilosa, não apresenta as mesmas propriedades capazes de atenuar o transporte de contaminantes como o solo silto-argiloso empregado na lagoa estudada por ROWE et al. (2003). Apesar da diferença entre os resultados dos dois estudos, ambos corroboram na demonstração da contaminação do solo compactado em decorrência de vazamentos de lixiviado pela geomembrana após longo período (13-14 anos).

Recomenda-se que estudos complementares, envolvendo coleta e análise de solo em diferentes profundidades da base da LM, sejam realizados durante as intervenções para recuperação desta lagoa que estão previstas pela equipe de gestão do AMG.

### **3.11 Discussão sobre as causas da formação das bolhas na LM**

Dentre as causas já descritas na literatura para formação de bolhas em reservatórios impermeabilizados com GM (GUO et al., 2016; KOERNER; KOERNER, 2016; GASSNER, 2017), estão incluídas:

- Degradação da matéria orgânica existente embaixo da GM;
- Volatilização de hidrocarbonetos em áreas contaminadas;
- Aumento do nível de água do lençol freático;
- Mudanças na pressão barométrica;
- Furos na GM.

Alguns fatores identificados neste estudo levam a proposição dos furos na GM como a principal causa da formação das bolhas na LM:

- a) A identificação de 8 furos na região do entorno das bolhas;
- b) A ausência de bolhas em outras regiões da lagoa onde não foram detectados vazamentos na GM. Esta informação vai ao encontro do descarte da hipótese de que a formação das bolhas seria decorrente do biogás formado pelos resíduos depositados nas camadas inferiores da lagoa ou adjacentes à mesma;
- c) O resultado da avaliação das possíveis causas de formação dos furos na GM indicou que os mesmos seriam decorrentes do processo de instalação da LM;
- d) O fato de o surgimento das bolhas ter ocorrido cerca de 2 anos após o início das operações da lagoa;
- e) A observação de campo feita durante a inspeção pelo método dipolo, na região das bolhas onde foi percebida a presença de líquido abaixo da GM neste local. Esta percepção foi confirmada após o rebaixamento do nível de lixiviado da LM, quando se notou o efluente vertendo pelos furos identificados.

Os furos identificados na GM teriam, então, possibilitado o vazamento do lixiviado para a camada de solo compactado, instalado abaixo da geomembrana e a consequente formação de biogás. De modo a aliviar a pressão abaixo da geomembrana, esta em algum momento perdeu seu contato com o solo, possivelmente em um ponto com presença de rugas, propiciando o aumento do vazamento do lixiviado e o aumento da área de contato deste líquido com o solo. Em virtude do baixo nível de lixiviado na região das bolhas, cerca de 0,5 a 1 m, estas se tornaram visíveis, acima do nível do lixiviado.

O aprofundamento em relação ao tema leva à consideração de que a falta de requisitos normativos no Brasil, que exijam a implantação de reservatórios com dupla camada de geomembrana e sistema de controle e detecção de vazamentos, como sugerido por THIEL; GIROUD (2011), poderia ser também uma das causas do problema. A ausência destes requisitos normativos ocasiona projetos de reservatórios de lixiviado incapazes de evitar o vazamento do lixiviado. E esta realidade estará presente como causa em outros reservatórios de lixiviado, impermeabilizados com GM e que apresentarem bolhas.

Outro aspecto que poderia ser apontado como uma das causas raiz seria a não adoção dos métodos geométricos para a inspeção das geomembranas das lagoas recém instaladas possibilitando o reparo de furos identificados. Estes métodos, que foram recomendados na revisão de 2020 da NBR 16.199, ainda não estão sendo adotados como procedimento de garantia da qualidade da instalação de reservatórios, apesar de serem empregados comercialmente fora do Brasil desde 1985. A ausência da obrigatoriedade legal de sua realização retarda o início de sua aplicação no país.

A ausência de critérios técnicos definindo as taxas máximas permitidas de vazamento nos reservatórios de lixiviado no Brasil faz com que o monitoramento da estanqueidade do sistema de barreiras não ocorra após a instalação e durante a operação. Em consequência, os vazamentos nos reservatórios não são identificados e corrigidos e a probabilidade de formação das bolhas aumenta. Isto sem mencionar que esta realidade aumenta significativamente o risco de contaminação do solo e do lençol freático.

Adicionalmente, para os reservatórios atualmente existentes no Brasil, que contemplam apenas uma camada de geomembrana, a adoção do monitoramento da sua integridade possibilitará o conhecimento sobre a existência de vazamentos e a realização de seu reparo. Sem esta ferramenta, os vazamentos na geomembrana dificilmente poderão ser localizados e, por consequência, reparados e o risco de ocorrência de bolhas na lagoa será maior.

Por fim, a comparação dos resultados da inspeção da lagoa sul e de montante com os dados publicados por ZIDAN et al. (2024) reafirmam o que foi mencionado por GIROUD (2016) que os *liners* vazam e que a realidade brasileira não será diferente do que os dados estatísticos disponíveis para projetos norte americanos. A média de 14 furos/10.000 m<sup>2</sup> não é a realidade de todos os projetos do país, mas certamente estará presente em alguns reservatórios brasileiros, possivelmente em aterros pequenos e com pouca estrutura para implantar procedimentos de controle de qualidade na instalação da GM. Tal fato deixa clara uma realidade que apresenta um grande potencial para a ocorrência de novas lagoas com bolhas em casos não notificados e que passam despercebidos pelos órgãos de controle e fiscalização ambiental do país.

### **3.12 Avaliação global dos impactos decorrentes da formação das bolhas na LM**

Os impactos diretos decorrentes deste processo de formação das bolhas envolvem o aumento da taxa de vazamento do lixiviado no solo presente abaixo da GM e seu possível espalhamento por meio de rugas para outras regiões da base da lagoa. Nesta região onde o lixiviado atingiu o solo abaixo da GM, o papel de barreira que deveria ser desempenhado pelo geossintético foi nulo.

Evidenciou-se a contaminação do solo compactado abaixo da GM quando comparado com amostras de solo local. Os resultados dos ensaios de permeabilidade em amostra do solo, indicam que as camadas inferiores aos 70 cm de solo compactado também tenham sido atingidas pela presença do lixiviado, dado o tempo decorrido desde o surgimento das bolhas. É importante ressaltar que se as bolhas não tivessem sido formadas, seria esperado algum grau de contaminação do solo abaixo da geomembrana, porém, as bolhas ampliaram significativamente a área de percolação e com isso a extensão da disseminação da contaminação. No caso da lagoa de montante estudada, não foram avaliadas informações sobre o nível do lençol freático, principalmente porque se tratava de uma área já impactada ambientalmente. Entretanto, a presença de bolhas em lagoas de lixiviados de aterros sanitários com níveis de lençol freático não profundos, poderia ocasionar a contaminação das águas subterrâneas também e com isso a disseminação em maiores proporções da contaminação. Considerando que as bolhas nem sempre emergem para fora do líquido em um primeiro momento, há a possibilidade de elas estarem presentes e não serem notadas pela equipe operacional. E nesta situação, quando mais rápida for a intervenção, menores serão os danos causados.

Outro impacto direto decorrente da presença das bolhas foi a submissão da GM, na região das bolhas, a variações de tensão relacionadas a mudanças de nível na LM ao longo destes últimos 11 anos. Neste mesmo local parte da GM ficou exposta diretamente à radiação UV e elevações de temperatura. Todos estes fatores, somados à exposição da GM ao lixiviado contribuem para o envelhecimento precoce da mesma e, por consequência, a redução da sua vida útil.

A presença das bolhas também expôs o geotêxtil empregado para proteger a GM da camada de pedregulhos à radiação UV, o que ocasionou sua degradação na região das bolhas. Tal fato tornou a GM suscetível a danos e perfurações quando em contato direto com os pedregulhos presentes na área.

## **CAPÍTULO 4: RECOMENDAÇÕES PARA PROJETOS DE LAGOAS COM GEOMEMBRANA**

O presente capítulo apresenta proposições objetivas para aplicação em novos projetos em que esteja prevista a implantação de reservatórios de efluentes com geomembrana. Considera-se, como premissa, que estas recomendações são destinadas à efluentes para os quais não sejam aceitáveis quaisquer níveis de vazamentos pelo sistema de barreiras em função de sua toxicidade e potenciais impactos ao ambiente em que ele estará inserido.

Nas partes finais do Capítulo estão propostas orientações para monitoramento e controle de reservatórios em operação que possuam apenas uma geomembrana. Estas orientações se destinam à maior parte das lagoas de efluentes em funcionamento no Brasil.

### **4.1 Avaliação dos riscos envolvidos**

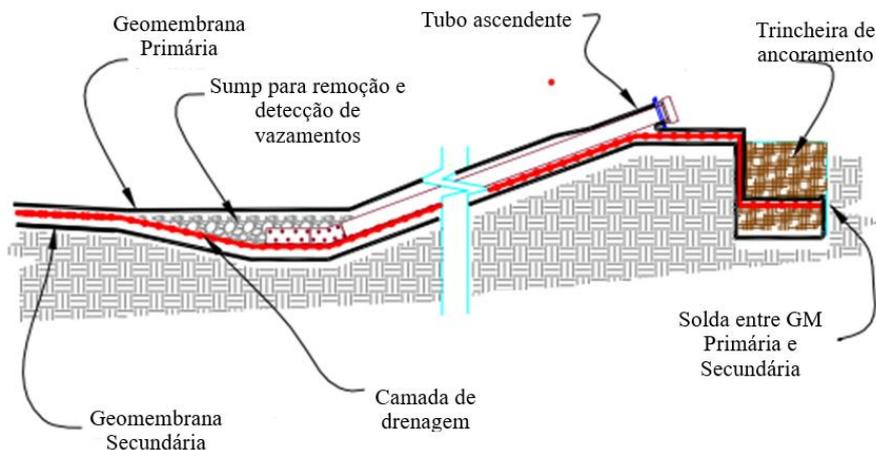
A aplicação da geomembrana como elemento de barreira atende a uma infinidade de tipos de projetos: aterros sanitários, lagoas de efluentes, canais de irrigação, reservatórios para acúmulo de água, lagoas para criação de diferentes tipos de espécies, barragens de rejeitos, piscina de ondas, dentre outros. Ocorre que os riscos associados a cada um destes projetos são distintos. Considerando que os reservatórios de efluentes são enquadrados como obras do tipo I conforme a NBR 16.199 (ABNT, 2020a), pequenos vazamentos no sistema de barreiras não devem ser tolerados em decorrência do potencial de contaminação do solo e águas subterrâneas. Neste sentido é fundamental que os requisitos de projeto, controle e garantia da qualidade da obra considerem uma análise preliminar dos riscos decorrentes de vazamentos na geomembrana e assumam como premissa que eles poderão estar presentes. A partir desta consideração, as medidas para minimizar e mitigar tais riscos deverão ser incluídas no projeto e no PCGQ (Plano de Controle e Garantia da Qualidade) do empreendimento.

Neste sentido, estes projetos de reservatórios devem contemplar medidas para evitar e mitigar a ocorrência de vazamentos pelas geomembranas. Nos itens seguintes serão discutidas recomendações de medidas possíveis de serem realizadas a partir do conhecimento prévio dos riscos associados aos vazamentos.

## 4.2 Projeto de engenharia

Um aspecto fundamental para minimizar a ocorrência de vazamentos do efluente para o solo é aceitar que a geomembrana vaza e que este fato decorre do seu processo de instalação e condições operacionais. A aceitação desta premissa deve levar à introdução de mais uma barreira e a possibilidade de monitoramento e controle dos vazamentos antes que eles atinjam o solo. Segundo THIEL; GIROUD (2011), para líquido em que pequenos volumes de vazamento não podem ser tolerados, a implantação de camada dupla de geomembrana com sistema de detecção e controle de vazamentos no reservatório é uma recomendação (vide Figura 101).

Figura 101 - Recomendação para projeto de reservatório de efluentes em que o vazamento mínimo não pode ser tolerado.



Fonte: adaptado de THIEL; GIROUD, 2011.

Em projetos com seção similar ao desta Figura, o vazamento de lixiviado decorrente de furos na geomembrana primária serão removidos pela camada de detecção por meio de bombeamento, o que também permitirá o monitoramento contínuo da taxa de lixiviação. Além disso, o bombeamento constante do lixiviado minimizará os riscos do lixiviado atingir o solo abaixo da geomembrana secundária.

Neste sentido, considerando os riscos associados a um reservatório a ser implantado é fundamental que os profissionais responsáveis pela elaboração do projeto de engenharia estabeleçam concepções adequadas para a minimização dos impactos ao meio ambiente. Além disso, torna-se fundamental que seja estabelecida normatização

atualizada no país para os sistemas de barreiras a serem adotados em projetos de futuros reservatórios de lixiviado.

Há consenso em países como Canadá e Estados Unidos com relação à necessidade de implantação de lagoas com dupla camada de geomembrana para armazenamento de lixiviados de aterros. Estabeleceu-se, inclusive, o conceito da taxa de vazamento aceitável (*Action Leakage rates* – ALR), como requisito para autorização de funcionamento e monitoramento da qualidade operacional dos reservatórios. Esta taxa (volume por área) é definida pela quantidade de lixiviado que atravessa a camada de GM primária e chega até o sistema de detecção de vazamentos.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos baseou-se no documento “EPA/530-SW-87-05 – *Background Document on Proposed Liner and Leak Detection Rules*” (EPA,1987) para definir os critérios para aceitação dos sistemas de barreiras, considerando taxas de vazamento aceitáveis para que uma lagoa possa operar. O documento citado apresenta o embasamento técnico para as exigências e considerou cálculo de vazamentos pela GM a partir de estimativas da quantidade de furos encontrados em projetos que adotaram bons procedimentos de garantia da qualidade. A Divisão de Proteção Ambiental de Alberta (ALBERTA, 1996), no Canadá, por exemplo, definiu que o ALR (*Action Leakage rates*) é a quantidade de lixiviado que vai ser identificada no topo da geomembrana secundária considerando 2 furos por 10.000 m<sup>2</sup>, cada um com diâmetro de 2 mm. Adicionalmente, o ALR não pode ser maior do que a capacidade de escoamento e remoção do lixiviado no sistema de coleta e detecção de vazamentos. Desta maneira, estabeleceram-se os critérios de qualidade necessários para início da operação do reservatório e para sua manutenção ao longo de sua fase operacional. Assim, durante a fase de operação do reservatório, caso o volume de lixiviado identificado no sistema de detecção de vazamento exceda o ARL, a operação deve ser interrompida. E para sua retomada será necessária a localização e reparo dos vazamentos na primeira camada de GM de modo que a taxa de lixiviação seja reduzida às condições iniciais, ou seja, abaixo do ARL.

Face ao acima exposto, recomenda-se que no Brasil o padrão atual de projetos de sistema de barreiras migre, progressivamente, para o de dupla camada com sistema de detecção de vazamentos. Complementarmente sugere-se que, a partir disso, seja adotada a taxa máxima de vazamento como requisito de licenciamento e controle da integridade do sistema de barreiras. Propõem-se que os critérios sugeridos pela província de Alberta (ALBERTA, 1996) sejam adaptados para a realidade brasileira,

mantendo-se o mesmo rigor de controle e monitoramento como condição de obtenção da licença de operação dos reservatórios.

### **4.3 Plano de controle e garantia da qualidade da obra**

Segundo Toepfer (2023), as atividades de controle e garantia da qualidade (CGQ) das obras com geomembranas não se resumem aos serviços desenvolvidos durante os trabalhos de instalação em campo, eles envolvem uma série de ações que se iniciam no planejamento e desenvolvimento do PCGQ (plano de controle e garantia da qualidade). Segundo o mesmo autor, os registros gerados ao longo das atividades de instalação representam garantias para os proprietários do projeto e agências ambientais de que os serviços foram executados conforme planejado, minimizando a ocorrência de vazamentos.

Neste sentido a experiência da equipe de projeto e o entendimento sobre a criticidade do sistema de barreiras para a obra geotécnica é extremamente relevante.

Da mesma forma, o entendimento por parte dos proprietários do empreendimento, sobre o que pode representar um dano no sistema de barreiras, poderá influenciar fortemente nos requisitos de projeto e no investimento em ações de CGQ (garantia e controle da qualidade). A percepção da equipe de projetos sobre a preocupação dos proprietários com relação às consequências de vazamentos em reservatórios certamente resultará na definição de especificações mais rigorosas dos materiais e dos procedimentos a serem aplicados.

Por outro lado, a percepção dos proprietários de que os custos com CGQ possibilitam o retorno do investimento por atuar na minimização dos vazamentos que podem gerar custos futuros adicionais possibilitará a priorização destas práticas na implantação do projeto.

Neste sentido, o Quadro 2 apresenta uma proposta de itemização para o PCGQ (plano de controle e garantia da qualidade), além de sugestões de documentos que funcionarão como evidências do atendimento de cada um dos itens contemplados no Plano.

Quadro 2 - Proposição de requisitos a serem contemplados no PCGQ de obras de reservatórios de efluentes impermeabilizados com com geomembrana de PEAD e sugestão de evidências para demonstração do atendimento.

ID	Requisito a ser contemplado	Evidência para demonstração do atendimento
1	Requisitos definidos em projeto	1. Especificações definidas no projeto e/ou memorial descritivo da obra
2	Projeto de paginação da geomembrana	2. Projeto elaborado pelo instalador e aprovado pelo projetista
3	Quantidade e tipo da geomembrana recebida	3.a. Notas fiscais e romaneio e confronto destes com o especificado em projeto 3.b. Certificado de qualidade de cada lote
4	Qualidade e condições da geomembrana recebida	4.a. Declaração de desempenho de cada lote da geomembrana 4.b. Relatório fotográfico do material recebido
5	Qualidade e condições do cordão de solda para extrusão	5.a. Declaração de desempenho do cordão 5.b. Relatório fotográfico do material recebido
6	Condições de armazenamento e transporte da geomembrana na obra	6. Relatório fotográfico
7	Condições de armazenamento do cordão de solda	7. Relatório fotográfico
8	Condições da superfície de apoio	8. Relatório fotográfico
9	Instalação e paginação dos painéis conforme proposto. Orientações sobre reparos e interferências	9.a. As built da paginação final incluindo reparos e interferências 9.b. Relatórios diários de obra
10	Ancoragem temporária e definitiva	10. Relatório fotográfico
11	Lista de equipamentos utilizados (solda e controle de qualidade) e respectivos certificados de aferição	11.a. Lista de equipamentos 11.b. Certificados de aferição válidos
12	Definições de soldas aplicadas e cruzamentos	12. Planilhas de registros de soldas
13	Ensaio de verificação da qualidade da solda, incluindo testes prévios de calibração	13. Planilha com todos os ensaios destrutivos e não destrutivos realizados
14	Orientações sobre aplicação do material de proteção e drenagem	14. Relatório fotográfico
15	Verificação da estanqueidade global	15.a. Relatório da aplicação dos métodos geoeletricos usando métodos aplicáveis à geomembrana exposta ou coberta 15.b. Relatório de reparo dos furos encontrados.

Fonte: Adaptado de NBR 16.199 (ABNT, 2020a)

Como pode ser observado no Quadro 2, existe um número grande de requisitos a serem planejados antes do início das obras e durante sua realização, os quais estarão referenciados no PCGQ. Entretanto, a elaboração deste documento não é garantia do atendimento aos requisitos planejados. É importante que a equipe responsável pela implantação da obra esteja ciente do que foi previsto no plano e que as evidências do atendimento a cada um dos itens integrem os documentos de entrega da obra. Tais evidências serão as garantias do proprietário de que a implantação do projeto ocorreu conforme suas especificações. Considerando a relevância do tema, a NBR-16.199

(ABNT, 2020a) sugere a participação de uma terceira parte para fiscalização de todos estes requisitos previstos.

Considerando a importância de garantir que os requisitos de projeto, controle e garantia da qualidade sejam plenamente atendidos é fundamental a presença de um agente de fiscalização que acompanhe todas as etapas da concepção, implantação e partida do reservatório. Idealmente este papel deve ser feito por uma terceira parte. Entretanto, caso isto não seja possível é fundamental que seja designado a um membro da equipe do empreendimento com esta função.

#### **4.4 Requisitos associados ao material**

Uma das grandes vantagens do uso dos geossintéticos em substituição aos insumos naturais como solo, areia e pedregulho é a possibilidade de uso de um material com propriedades conhecidas e homogêneas, aliado à maior agilidade na sua aplicação.

Entretanto, para garantir a qualidade do geossintético é necessário que suas propriedades sejam testadas após sua fabricação e antes de seu uso, pois somente desta maneira poderá ser garantida sua funcionalidade. Neste sentido o Instituto de Pesquisas em Geossintéticos (GRI) publicou em 2023 a 17ª revisão da especificação GM-13: “Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes”, que estabelece requisitos mínimos para as propriedades físicas, de durabilidade e mecânicas das geomembranas. A NBR 16.757-2/2020 (ABNT, 2020b) estabelece, no Brasil, os ensaios recomendados para avaliação das propriedades da geomembrana pelos fabricantes. Entretanto, alguns critérios de aceitação para os ensaios elencados não foram estabelecidos, o que acaba por limitar a adoção desta norma. Por este motivo, o Quadro 3 apresenta a relação dos critérios propostos pela GM-13, evidenciando que todos possuem critérios de aceitação definidos.

Quadro 3 - Ensaio propostos para avaliação da qualidade da geomembrana de PEAD.

Propriedades	Requisitos	GM-13	C.A.
Físicas	espessura	X	X
	densidade	X	X
Mecânicas	resistência à tração	X	X
	alongamento na carga máxima	X	X
	resistência punccionamento estático	X	X
	resistência ao rasgo	X	X
Durabilidade	conteúdo de negro de fumo	X	X
	dispersão de negro de fumo	X	X
	resistência à oxidação	X	X
	resistência ao stress cracking	X	X
	tempo de indução oxidativa	X	X
	exposição à radiação UV	X	X

C.A. – critério de aceitação definido.

Fonte: adaptado de GRI, 2023

No Brasil, a verificação do atendimento aos critérios de aceitação da geomembrana que foram definidos no PCGQ (plano de controle e garantia da qualidade) da obra pode ser feito pela avaliação das informações do certificado de qualidade que acompanha cada lote do produto. Esta medida representa o controle de qualidade da fabricação do material. Entretanto, as ações de garantia da qualidade da fabricação podem ser empregadas, complementarmente, envolvem auditorias nas fábricas e a realização de ensaios, em amostras de lotes da geomembrana fabricada, por laboratórios independentes e demandados pelos proprietários das obras.

#### 4.5 Requisitos associados à instalação

A norma NBR 16.199 (ABNT, 2020a) estabelece os procedimentos de transporte, manuseio, estocagem, armazenamento e instalação da geomembrana. As especificações deste instrumento, porém, não substituem a necessária experiência dos instaladores deste tipo de serviço. A qualificação do pessoal responsável é extremamente relevante para a qualidade da instalação. Além disso, a falta de supervisão adequada, pode ocasionar falhas que poderão se tornar pontos de vazamento no futuro.

Da mesma forma que para a fabricação da geomembrana existem os conceitos de CQ (controle da qualidade) e GC (garantia da qualidade), para a obra como um todo, estes conceitos também são aplicáveis.

Segundo a NBR 16.199 (ABNT, 2020a) “garantia da qualidade de fabricação e de instalação” é o conjunto de atividades programadas para verificar se o produto fabricado, o material recebido e os serviços de instalação estão sendo realizados conforme as normas técnicas pertinentes e as especificações de projeto. A norma também define ensaios de CQ para “obras do tipo I”, propondo ensaios destrutivos e não destrutivos para verificação da qualidade das soldas. Além disso, foram estabelecidos requisitos para verificação da estanqueidade global da obra, os quais incluem a aplicação dos métodos geoeletricos de forma complementar ao CQ. Tais métodos representam ações de GQ (garantia da qualidade), pois permitem avaliar a integridade da geomembrana ao final da instalação e após aplicação do material de cobertura ou comissionamento de um reservatório.

Considerando a relevância das atividades de instalação da geomembrana e o risco de danos neste material em decorrência de procedimentos inadequados é fundamental que o pessoal envolvido nesta atividade tenha experiência compatível e receba um treinamento prévio relacionado às especificidades do projeto. Outra prática recomendada e muito disseminada nos Estados Unidos é o acompanhamento das atividades de instalação por uma terceira parte, ou seja, um profissional experiente e que não pertença à empresa instaladora ou à proprietária. Esta medida lhe possibilitará independência nas ações de fiscalização da obra.

#### **4.6 Métodos geoeletricos e a garantia da estanqueidade global**

Apesar da variação da quantidade de vazamentos na geomembrana apresentada nas diferentes publicações, todos os autores mencionam que adequados níveis de controle de qualidade da instalação minimizam a ocorrência de danos. Além disso, alguns dos autores mencionam que a maior parte dos vazamentos aconteceu durante a instalação da geomembrana e aplicação do solo de proteção (Nosko & CROWTHER, 2015; FORGET et al., 2005). Por este motivo a verificação da estanqueidade global da instalação torna-se fundamental.

A norma NBR 16.199 (ABNT, 2020a) recomenda a realização dos métodos geoeletricos para a verificação da estanqueidade global da geomembrana em obras do tipo I, das quais os reservatórios de efluentes são parte integrante.

Estes métodos estão estabelecidos comercialmente desde 1985 e tem possibilitado a identificação e reparo precoce de vazamentos em geomembranas empregadas como barreiras.

Dentre os métodos geoeletricos, conforme já mencionado no item 1.7, há a possibilidade de realizar a inspeção com a geomembrana exposta, no caso de reservatórios ainda vazios, após o início do enchimento (no comissionamento) para avaliação da integridade da geomembrana da base e com o reservatório completamente cheio de líquido.

#### **4.7 Monitoramento e controle no comissionamento e durante a operação**

Durante a fase de comissionamento e de operação do reservatório será possível acompanhar a ocorrência de vazamentos pelo monitoramento da camada de detecção nos projetos com geomembrana dupla. Caso os limites permitidos de vazamento pela geomembrana primária sejam atingidos será necessária a localização do ponto de vazamento e o seu reparo. Utilizando-se o método dipolo é possível realizar a inspeção com lagoa cheia e localizar os locais do vazamento. A partir disto, pode-se programar a paralisação das atividades da lagoa para a realização dos reparos na geomembrana.

#### **4.8 Ações de monitoramento e controle da operação nos reservatórios brasileiros**

Atualmente o padrão adotado nos projetos brasileiros de reservatórios de efluentes é a aplicação de uma única geomembrana sobre solo ou geocomposto bentonítico (GCL), sem o emprego da camada de detecção de vazamentos. Desta forma, a identificação de eventuais vazamentos durante o comissionamento ou fase de operação não serão possíveis sem a realização de uma inspeção na lagoa pelo método dipolo. A partir desta inspeção poderá ser programada paralisação do reservatório para realização do reparo.

Neste sentido é fundamental que a realização das inspeções nos reservatórios em comissionamento e em operação, adotando o método dipolo, sejam previstas pelos órgãos ambientais do país no processo de licenciamento. Esta medida se torna essencial para todos os reservatórios com geomembrana simples e sem sistema de detecção de vazamentos, permitindo que reparos sejam feitos nos furos identificados.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A partir dos estudos desenvolvidos, conclui-se que a causa principal da formação das bolhas na lagoa de montante do AMG foi a presença de oito furos decorrentes do processo de instalação da GM e do material de cobertura da mesma. A frequência de vazamentos/área encontrada na lagoa de montante foi de 6 por 10.000 m<sup>2</sup> e na lagoa sul foi 6,9. Estes valores estão compatíveis com 13% dos projetos inspecionados nos Estados Unidos, Canadá e México, cujos resultados foram publicados na literatura recente. Adicionalmente, os resultados da LM e LS se enquadram no grupo dos 36 % dos projetos avaliados (n=195) no mesmo estudo que tiveram maiores quantidades de vazamentos/área (mais de 5/10.000 m<sup>2</sup>).

Conclui-se ainda que a ausência de requisitos normativos, que estabeleçam condições para minimizar os vazamentos de lixiviado pela GM, deve ser considerada uma causa raiz para o surgimento das bolhas nos projetos brasileiros. Podem ser citados como elementos não contemplados em requisitos normativos brasileiros: proposição clara de sistema de barreiras para reservatórios que seja condizente com os riscos associados ao lixiviado, definição de uma taxa máxima permitida de vazamento para reservatórios em comissionamento e em operação, obrigatoriedade de monitoramento e controle periódico da integridade do sistema de barreiras ao longo da vida útil do reservatório.

Adicionalmente, a não adoção dos processos de controle e garantia da qualidade da construção em obras de reservatórios de lixiviado que possibilitem a identificação de furos do processo de instalação e seu reparo previamente ao início das operações também pode ser entendida como uma das causas raiz do problema no Brasil.

A análise do caso da lagoa de montante possibilitou a identificação dos impactos ambientais decorrentes da formação de bolhas em lagoas de lixiviado com geomembrana. Foram identificados: o aumento do vazamento de lixiviado pela perda de contato da geomembrana com o solo, o que pode ter sido potencializado pela presença de rugas que representam um caminho preferencial para o líquido. A contaminação do solo abaixo da GM foi identificada também como impacto e a migração dos poluentes para as camadas inferiores e potencialmente para o lençól freático. No caso da LM, considerando que abaixo da camada de solo compactada existe uma camada de resíduos, a contaminação das camadas inferiores não pode ser avaliada ou atribuída ao vazamento da lagoa de montante. Entretanto, em aterros sanitários, o impacto ambiental decorrente da contaminação das camadas inferiores à GM e CCL é relevante e significativo.

Como impactos operacionais podem ser citados a submissão da GM, na região das bolhas, a variações de tensão relacionadas a mudanças de nível na LM e a exposição do geossintético diretamente à radiação UV e elevações de temperatura. Todos estes fatores, somados à exposição da GM ao lixiviado contribuem para o envelhecimento precoce da mesma e, por consequência, a redução da sua vida útil. A degradação do geotêxtil de proteção da GM, na região das bolhas, deixa este último geossintético suscetível a rasgos e perfurações futuras.

Por fim, dada a subnotificação de casos de bolhas em reservatórios de lixiviado no país e o desconhecimento sobre suas causas e as consequências de sua ocorrência para o meio ambiente, torna-se fundamental a disseminação das informações do presente estudo. Corroborando com estes fatos, a ausência de dados de monitoramento da estanqueidade da GM destes reservatórios no país, o que poderia ser obtido pela aplicação do método dipolo, e a concepção atual dos projetos que empregam apenas uma camada de GM e não contemplam um sistema de detecção de vazamentos.

Recomendações para futuras pesquisas:

1. Avaliar as propriedades da GM na região das bolhas e em outros pontos da base da LM (resistência à tração, ao puncionamento e ao rasgo, *stress cracking* e OIT);
2. Avaliar amostras de solo em várias profundidades na região das bolhas e dos furos para compreender os níveis máximos atingidos pela lixiviação e a área do solo que ficou contaminada pelo lixiviado;
3. Acompanhar o perfil das bolhas em níveis mais altos do lixiviado na LM para confirmar comportamentos previstos em literatura;
4. Acompanhar o processo de exumação da LM para melhor entendimento sobre a percolação do lixiviado nesta região e propor procedimento de remediação baseado na investigação dos níveis atingidos pelo lixiviado;
5. Promover inspeções em outras lagoas de efluentes brasileiros para desenvolver levantamento estatístico de registros de furos.

## REFERÊNCIAS

ABDELAAL, F.B.; ROWE, R.K.; BRACHMAN, R.W.I. *Brittle rupture of an aged HDPE geomembrane at local gravel indentation under simulated field conditions*. **Geosynthetic International**, 21 (1), pp 1-23, 2014.

ACRE. Resolução Cemact nº 2, Institui normas para o licenciamento ambiental de parcelamento do solo urbano e assentamentos urbanos nos municípios do estado do acre e cria a licença de regularização de operação – LRO para empreendimentos já existentes, 2010.

ALBERTA GOVERNMENT. *Action Leakage Rate Guideline* (1996). Disponível em: <https://open.alberta.ca/publications/1772632>. Acessado em 10 nov. 2023.

ALLEN, SR. *Geotextile durability*. In: *Geotextiles*. Woodhead Publishing, 177–215PP., 2016.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 6747**. *Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Leak Location of Leaks in Geomembranes*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2015.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 7007**. *Standard Practice for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 4833**. *Standard Test Method for Index Puncture Resistance of Geomembrane and Related Products*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2020a.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 6693**. *Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Nonreinforced Polyethylene and Nonreinforced Flexible Polypropylene Geomembrane*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2020b.

APARICIO-ARDILA, M. A.; PEDROSO, G. O. M.; KOBELNIK, M.; VALENTIN, C.A.; LUZ, M. P.; SILVA, J. L. *Evaluating the degradation of a nonwoven polypropylene geotextile exposed to natural weathering for 3 years*. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, 7: 69, 2021.

APHA (2012). **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 22<sup>th</sup> ed., Washington.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOSSINTÉTICOS (IGS-BRASIL). Recomendação 002/20: Características requeridas para o emprego de geossintéticos – parte 2 – barreiras geossintéticas, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE), **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**, São Paulo: ABRELPE, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE), **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**, São Paulo: ABRELPE, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA), **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024**, São Paulo: ABREMA, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8.419** – Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13.896** – Aterros de Resíduos Não Perigosos – Critérios para Projeto, Implantação e Operação. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9.864** – Geossintéticos – Métodos de Ensaio para Determinação da Massa por Unidade de Área de Geotêxtis e produtos correlatos. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7.180** – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7.182** – Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7.181** – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6.459** – Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16.199** – Barreiras Geossintéticas – Instalação de geomembranas poliméricas. Rio de Janeiro, 2020a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16.757** – Geossintéticos – Requisitos para aplicação. Parte 1 – Geotêxtis e Produtos Correlatos. Rio de Janeiro, 2020b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.318** – Geossintéticos – Parte 1: Termos e Definições. Rio de Janeiro, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14.545** – Solo – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade em Solos Argilosos a Carga Variável. Rio de Janeiro, 2021b.

BAHIA. Resolução Cepam nº 4.260, dispõem, no âmbito do licenciamento ambiental, sobre os procedimentos e as atividades ou empreendimentos a serem licenciados por meio de licença ambiental por adesão ou compromisso, 2012.

BARBOSA, M. C. Investigação Geoambiental do Depósito de Argila sob o Aterro de Gramacho, tese (doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 342 p., 1994.

BHATT, A. H.; KARANJEKAR, R. V.; ALTOUQI, S.; SATTTLER, M. L.; HOSSAIN, M. D. S.; CHEN, V.P. *Estimating landfill leachate BOD and COD based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: exploration of MARS statistical approach*. Environmental. Technology Innovation 8, 1–16, 2017.

BHOWMIK, R.; SHAHU, J.; DATTA, M. *Failure Analysis of a geomembrane lined reservoir embankment*. **Geotextile and Geomembrane**, 46 pp. 52-65, 2015.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, ISBN: 9788586238734 (broch.), 248 p., 2008.

BRACHMAN, R.W.I.; SABIR, A. *Geomembrane puncture and strains from stones in an underlying clay layer*. **Geomembrane and Geotextile**, 28, pp 335-343, 2010.

BRASIL. Resolução Conama no 420, de 28 de dezembro de 2009. *Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas*. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 30 dez. 2009. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-ac-s.pdf>. Acesso em: 08 set. 2024.

BRASIL. Resolução Conama no 430, de 13 de maio de 2011. *Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes*. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 16 mai. 2011. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em: 08 dez. 2023.

BRASIL. Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a lei 9.605*. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 08 jan. 2024.

BRAZ, C.J.F., WELLER, R.M.R., RABELLO, M.S. *Stress Cracking do Policarbonato na presença de etanol*. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, 12(2):115 - 123, 2017.

BUENO, B. S. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Edgard Blucher, São Paulo, SP, capítulo 2, 13-25, 2004.

BUENO, B. S; VILAR, O.M. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Edgard Blucher, São Paulo, SP, capítulo 3, 27-62, 2004.

BUENO, S. B; BENVENUTO, C.; VILAR, O.M. Manual Brasileiro de Geossintéticos. Edgard Blucher, São Paulo, SP, capítulo 13, 335-379, 2004.

CARNEIRO, J.R.; MORAIS, M.; LOPES, M.L. *Degradation of poly propylene geotextiles with different chemical stabilisations in marine environments*. **Constr Build Mater**, 165:877 - 886, 2018.

CARNEIRO, JR, LOPES, M.L. *Natural weathering of polypropyl ene geotextiles treated with different chemical stabilisers*. **Geosynthetic International**, 24(6):544 - 553, 2017.

CHRISENSEN, T. H.; KJELDTSEN, P.; BJERG, P.; JENSEN, D. L.; CHRISTENSEN, J. B.; BAUN, A.; ALBRECHTSEN, H.J.; HERON, G. *Biogeochemistry of landfill leachate plumes*. *Appl. Geochem.* 16, 659–718, 2001.

COLMANETTI, J. P. Estudos sobre a Aplicação de GMs na Impermeabilização da Face de Montante de Barragens de Enrocamento, tese (doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 272 p., 2006.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Resíduos sólidos industriais. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993.

COSTA, A.M.; ALFAIA, R.G.S.M.; CAMPOS, J.C. *Landfill leachate treatment in Brazil – an overview*. *Journal of Environmental Management* 232, 110-116, 2019.

CTR VILHA VELHA. Imagem de Lagoa de lixiviado. Disponível em: <https://ctrvilavelha.com.br/estrutura/>. Acessado em: 20 dez. 2024.

EDUARDO, J. Avaliação das características microbiológicas e físico-químicas do lixiviado (chorume) no processo de tratamento do aterro metropolitano de Gramacho – Dissertação, 2007 (UERJ)

EL-FADEL, M.; BOU-ZED, E.; CHAHINE, W.; ALAYLI, B. *Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content*. *Waste Management* 22, 269–282, 2002.

ELDESOUKY, H. M. G.; THIEL, R.; BRACHMAN, R. W. I. *Assessment of geomembrane strain from pond liner bubble*. *Geotextile and Geomembranes* 51 (6), 28-40, 2023.

EL-ZEIN, A.; ROWE, R. K. *Impact on groundwater of concurrent leakage and diffusion of DCM through geomembranes in landfill liners*. *Geosynthetic International*, 15(1), 55–71, 2008.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Technical Guidance Document: Construction Quality Assurance for Hazardous Waste Land Disposal Facilities** (EPA/530-S (SW)-86-031, 1986.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Background Document on Proposed Liner and Leak Detection Rule** (EPA 530/SW87-015-Part 1), 1987.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Environmental Fact Sheet: Release Final Rules on Liners and Leak Detection Systems**, 1991.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Technical Guideline: Quality Assurance and Quality Control for Waste Containment Facilities** (EPA/600/R-93/182), 1993.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Closure and Post Closure Care (40CFR Part 258, Subpart F. Disponível em: <https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/pdf/subpartf.pdf>. Acessado em: 03 det. 2024.**

EUROSTAT. Gráfico apresentando tecnologias de tratamento e destinação final empregadas pelos países europeus em 2020. Disponível em: <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2023/01/MWTreatment2020.pdf>. Acessado em: 25 de jun., 2024.

EXACTITUDE CONSULTANCY. Pesquisa de Mercado sobre geossintéticos. Disponível em: <https://exactitudeconsultancy.com/pt/reports/996/GM-mercado/>. Acessado em: 10 dez. 2023.

FABRICATES GEOMEMBRANE INSTITUTE (FGI). *Factory Fabrication, Installation, and Testing of Geomembranes*. Webinar apresentado por Dr. Timothy D. Stark em 10 dez. 2019, disponível em: <https://www.fabricatedgeomembrane.com/resources/webinar-archives>.

FERREIRA, J.A. Aulas do Professor João Alberto. Duas imagens de Jardim Gramacho. Disponibilizadas nos slides da disciplina de Tratamento de Disposição Final de Resíduos, cursada no DEAMB em 2021.

FORGET, B.; ROLLIN, L.; JACQUELIN, T. *Lessons Learned from 10 Years of Leak Detection Surveys on Geomembranes*, **Proceeding**. Sardine, Sardine, 2005.

GASSNER, F. *Development and Management of geomembrane liner hippos* – Professional Practice Paper, **Geotextile and Geomembrane** 45, 702-706, 2017.

GEOSYNTHETIC RESEARCH INSTITUTE. GM 13 *Standard Specification for Test Method, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembrane* (Rev. 17/2023). Disponível em: <https://geosynthetic-institute.org/grispecs/gm13.pdf>.

GEROTO, R.E., Desempenho de camada de proteção para geomembranas. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2008.

GHOST, P.; THAKUR, I. S.; KAUSHIK, A. *Bioassays for toxicology risk assessment of landfill leachate: a review*. *Ecotoxicology Environmental Safety* 141, 259–270, 2017.

GILSON-BECK A.; SMITH, M.; COLANETTI, J. Métodos Geoelétricos Empregados na Minimização de Perdas de Solução em Pilhas de Lixiviação de Minério. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/238100562>. Acessado em: 10 mar. 2018.

GIORDANO, G. Análise e formulação de processos para tratamento dos chorumes gerados em aterros de resíduos sólidos, tese (doutorado) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 257 p., 2003.

GIROUD, J.P. *Geotextile and Geomembrane*. **Geotextile and Geomembranes**, 1, 5-40, 1984.

GIROUD, J.P. *Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners due to geomembrane defects*. **Geosynthetic Institute**. (3-4), 335-348, 1997.

GIROUD, J.P. *Leakage Control Using Geomembrane Liner*. **Soils and Rocks**, São Paulo, Brasil, v. 39, n. 3, p.213-235, 2016.

GIROUD, J.P. *Lessons Learned from Case Histories of reservoirs lined with geomembranes*. **Revue Française de Géotechnique**, 159(2), 1-13, 2019.

GIROUD, J.P.; BADU-TWENEBOAH, K.; BONAPARTE, R. Rate of leakage through a composite liner due to geomembrane defects. **Geotextile and Geomembranes**, 11, 1-28, 1992.

GIROUD, J. P.; BONAPARTE, R. *Leakage through liners constructed with geomembranes, Part I: geomembrane liners*. **Geotextile and Geomembranes**, 8(1), 27-67. 1989a.

GIROUD, J. P.; BONAPARTE, R. *Leakage through liners constructed with geomembranes, Part 2: Composite Liners*. **Geotextile and Geomembranes**, 8, 71-111, 1989b.

GIROUD, J.P.; KHATAMI, A.; BADU-TWENEBOAH, K. *Evaluation of the rate of leakage through composite liners*. **Geotextile and Geomembranes**, 8, 337-340, 1989.

GIROUD, J.P.; TOUZE-FOLTZ, N. *Geomembrane for Landfills*. **Geosynthetic Institute**. 10 (4), 124–133, 2003.

GUO, W.; CHU, J.; ZHOU, B.; SUN, L. *Analysis of geomembrane whale due to liquid flow through composite liner*. **Geotextile and Geomembrane**. International Geosynthetic Society, v. 44, n.3, p.247-253, 2016.

HOLTZ, R. D., CHRISTOPHER, B. R.; BERG, R. R. *Geosynthetics engineering*. Richamond, Canadá: BiTech Publishers, 452 p., 1997.

HORROCKS, A. R.; D´SILVA, J. A. *Degradation of polymers in geomembranes and geotextiles*. In: Hamid, A.H., Amin, M.B., Maadhah, A.G., (Eds.), **Handbook of Polymer Degradation**, pp. 434–505, 1992.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). *Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado*. São Paulo: IPT/CEMPRE. 278p., 1995.

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA. *Relatório dos ensaios desenvolvidos com amostras de geotêxtil da lagoa de montante do Aterro Metropolitano de Gramacho*, 2024.

LIMA, J.P. *Estudo do lixiviado do Aterro Metropolitano de Jardim Gramacho como substituto da adubação nitrogenada no plantio de (Heleanthus annuus L.) girassol – Dissertação*, 2016 (UERJ)

JF TOPOGRAFIA. *Plantas do levantamento planialtimétrico desenvolvido na lagoa de montante do Aterro Metropolitano de Gramacho*, 2024.

KJELDSSEN, P.; BARLAZ, M. A.; ROOKER, A. P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHISTENSEN, T. H. *Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review*. **Crit. Rev. Environmental Science Technology** 3, 297–33, 2002.

KOERNER, R. M. *Designing with geosynthetics*. 4ª edição. New Jersey: Prentice-Hall, 761 p., 1998.

KOERNER, B.; KOERNER, G. Avoiding geomembrane whales and hippos in surface impoundments. **Geosynthetics**. Disponível em: <https://geosyntheticsmagazine.com/2016/04/25/avoiding-geomembrane-whales-and-hippos-in-surface-impoundments/>, publicado em 25 abril 2016.

KOERNER, R.M.; HSUAN, Y.G.; KOERNER, G.R. *Lifetime predictions of exposed geotextiles and geomembranes*. **Geosynthetic International**, 24(2):198–212, 2017.

KOERNER, R.M.; KOERNER, J.M.; KOERNER, G.R. *Underdrain design for geomembrane lined surface impoundment to avoid whale/hippos from occurring* - White Paper #33. **Geosynthetic Institute**, Folsom, Pensilvânia, EUA, p.1-9, 2015.

KOERNER, R.M.; KOERNER, J.M.; KOERNER, G.R. *In-situ repairs of geomembrane bubbles, whales and hippos* - White Paper #30, **Geosynthetic Institute**, Folsom, Pensilvânia, EUA, p. 1-7, 2014.

KOERNER, R.M.; KOERNER, J.M.; KOERNER, G.R. *Status of the Electrical Leak Location Survey (ELLS) Method Among State Environmental Protection Agencies in the USA*, **Geosynthetic Institute**, GSI White Paper #34, Folsom, Pennsylvania, USA, 2016.

KULIKOWSKA, D.; KLIMIUK, E. *The effect of landfill age on municipal leachate composition*. **Bioresource Technology** 99, 5981–5985, 2008.

KURNIAWAN, T. A.; LO, W.; CHAN, G. Y. S. *Physical-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate*. **Journal Hazardous Materials** 129, 80–100, 2006.

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL DA UERJ. Relatórios das análises de caracterização de amostras do lixiviado (lagoa sul e de montante) e do solo (lagoa de montante) retiradas do Aterro Metropolitano de Gramacho, 2024.

LABORATÓRIO DE GEOSINTÉTICOS DA USP-SÃO CARLOS. Relatórios de análise das propriedades das amostras de geomembrana retiradas da lagoa de montante do Aterro Metropolitano de Gramacho, 2024.

LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS SOLOS DA UERJ. Relatórios das análises de caracterização e de permeabilidade de amostras de solo retiradas da lagoa de montante do Aterro Metropolitano de Gramacho, 2024.

LACERDA, C. V.; RITTER, E.; PIRES, J. A. C.; CASTRO, J. A., *Migration of inorganic ions from the leachate of the Rio das Ostras landfill: A comparison of three different configurations of protective barriers*. *Waste Management*, vol. 34, 2285-2291 pp., 2014.

LAINE, D.; MIKLAS, M. *Detection and location of leaks in geomembrane liners using an electrical method: cases histories*. In: **Proceedings** of the 10th national Conference, pp. 35-40, 1989.

LAVOIE, F.L.; KOBELNIK, M.; VALENTIN, C.A.; SILVA, J.L. *Durability of HDPE geomembrane: an overview*. *Química Nova*, vol. 43, No.5, pp.656-667, 2020.

LEAK LOCATION SERVICE (LLSI), comunicação pessoal contendo apresentação sobre princípio dos métodos geoeletricos – 4 figuras, janeiro, 2016.

LEME, M. A. G. Caracterização de solo utilizado no sistema de barreira impermeabilizante de base de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 172 p., 2013.

LENGE, A.; SIEBKEN, J. *Geomembrane in United States: a brief discussion*. *Geosynthetics: Application, Design and Construction*. De Groot. Den Hoedt & Termaat (eds), 697-704 p., 1996.

MACAMBIRA, I. Q. Comportamento hidráulico de alguns solos lateríticos para uso como barreira impermeável. 2002. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, São Carlos, SP, 2002

MARKET RESEARCH FUTURE, 2024. Pesquisa de Mercado sobre geossintéticos. Disponível em: [https://www.marketresearchfuture.com/reports/geosynthetics-market-8809?utm\\_term=&utm\\_campaign=&utm\\_source=adwords&utm\\_medium=ppc&hsa\\_acc=2893753364&hsa\\_cam=20269362920&hsa\\_grp=148912616334&hsa\\_ad=661977011274&hsa\\_src=g&hsa\\_tgt=dsa2086491747787&hsa\\_kw=&hsa\\_mt=&hsa\\_net=adwords&hsa\\_ver=3&gad\\_source=1](https://www.marketresearchfuture.com/reports/geosynthetics-market-8809?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2893753364&hsa_cam=20269362920&hsa_grp=148912616334&hsa_ad=661977011274&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa2086491747787&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1). Acessado em: 21 dez. 2024.

MARTA, A., *Geomembrane Whales and a Case study*. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/geomembrane-gmb-whales-case-study-attila-marta/>. Acesso em: 22 nov. 2022.

Mc. DANIEL, H.D.; BELTS, R.; SAUNIER, P. *Improved QA and QC of Double-lined ponds for processed-water containment*. In: *Tailing and Mine Waste, Proceedings*. Novembro, 17-20, Vancouver, Canada. pp. 473-483, 2019.

MORDON INTELLIGENCE. Pesquisa de Mercado sobre geossintéticos. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/geosynthetics-market>. Acessado em: 10 dez. 2023.

NOSKO, V.; TOUZE-FOLTZ, N. *Geomembrane Liner Failure: modelling of its Influence on Contaminant Transfer*, In: Eurogeo 2. Proceeding. – Bologna, Italy, 2000.

PALMEIRA, E.M. Geossintéticos em Geotecnia e Meio Ambiente. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2018

PEGGS, I. A “Whales” of a problem – Concrete Construction. Disponível em: [https://www.concreteconstruction.net/projects/infrastructure/a-whale-of-a-problem\\_o](https://www.concreteconstruction.net/projects/infrastructure/a-whale-of-a-problem_o). Acessado em 22 nov. 2022a.

PEGGS, I. *Preventing HDPE – Geomembrane Whales – A Primer*. Disponível em: <https://www.geosynthetica.com/preventing-hdpe-geomembrane-whales-a-primer/>. Acessado em 22 nov. 2022b.

PEGGS, I. *Geomembrane liner Action Leakage Rates: What is Practical and What is not?* **Land and Water Magazine**, pp. 48-50, 2009.

PEGGS, I.D.; CARLSON, D.S., Stress cracking of polyethylene geomembrane: field experience. In: Koerner, R.M. (Ed.), *Durability and Aging of Geosynthetics*, Amsterdam, Netherlands, pp.195–211, 1989.

PIEADADE JÚNIOR, C. R. C. Análise da potencialidade de alguns solos não lateríticos para utilização em barreiras impermeáveis. 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas/ 3ª edição. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2006.

PREFEITURA SAQUAREMA. Aterro controlado de Saquarema recebe obras de melhoria. Disponível em: <https://www.saquarema.rj.gov.br/aterro-controlado-de-saquarema-passa-por-melhorias/>. Acessado em: 11 nov. 2023.

RENOU, S.; GIVAUDAN, J. G.; POULAIN, S.; DIRASSOUYAN, F.; MOULIN, P. *Landfill leachate treatment: review and opportunity*. J. Hazard. Mater. 150, 468–493, 2008.

RIO DE JANEIRO. Decreto estadual nº 44.820/2014 que dispõem sobre o sistema de licenciamento ambiental do estado do Rio de Janeiro, 2014.

RITTER, E. Efeito da salinidade na difusão e sorção de alguns íons inorgânicos em um 9 solo argiloso saturado. Tese Doutorado – Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 216, 1998.

RITTER, E.; CAMPOS, J. C. Avaliação da Sorção e Difusão Molecular de Íons Inorgânicos do Chorume e da Argila Orgânica do Aterro Metropolitano de Gramacho (RJ). **Revista Solos e Rochas**, vol. 29, ed. 1, 77-88, 2006.

ROWE, R. K. *Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste*. In: 6<sup>th</sup> International Conference Geosynthetics, 27-103, 1998.

ROWE, R. K. *Long-term performance of contaminant barrier systems*. **Geotechnique**, 55(9), 631–678, 2005.

ROWE, R. K. *Systems engineering: the design and operation of municipal solid waste landfills to minimize contamination of groundwater*. **Geosynthetic Institute**. 18 (6), 391–404, 2011.

ROWE, R. K. *Short-and long-term leakage through composite liners. The 7th Arthur Casagrande Lecture*. **Canadian Geotechnical Journal**, 49, (2), 141–169, 2012.

ROWE, R.K.; ISLAM, M. Z.; HSUAN, Y. G. *Leachate chemical composition effects on OIT depletion in HDPE geomembranes*. **Geosynthetic International**, 15(2), 136–151, 2008.

ROWE, R. K.; QUIGLEY, R. M.; BRACHAMAN, R. W. I.; BOOKER, J. R. *Barrier systems for waste disposal facilities*, Taylor & Francis/Spon, London, 2004.

ROWE, R.K.; SANGAM, H.P. *Durability of HDPE geomembranes*. **Geotextiles and Geomembranes**, 20, pp. 77-95, 2002.

ROWE, R. K.; SANGAM, H.P.; LAKE, C.B. *Evaluation of an HDPE geomembrane after 14 years as a leachate lagoon liner*. **Canadian Geotechnical Journal**. 40, 536-550, 2003.

SAIDI, F.; TOUZE-FOLTZ, N.; GOBLET, P. *Numerical modelling of advective flow through composite liners in case of two interacting adjacent square defects in the geomembrane*. **Geotextile and Geomembrane**, 26(2), 196–204, 2008.

SALEM, Z.; HAMOURI, K.; DIEEMA, R.; ALLIA, K. *Evaluation of landfill leachate pollution and treatment*. *Desalination* 220, 108–114, 2008.

SCHEIRS, J; MARTA, A. *Stress cracking failure of HDPE geomembranes installed on slopes without compensation slack and without adequate geotextile cushioning*. EXCELPLAS AND RED EARTH ENGINEERING. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/379992770>. Acessado em: 20 set. 2024.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SINISA). Manejo de resíduos sólidos. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis>. Acessado em 21 mar. 2024.

SOUTO, G. D. B.; POVINELLI, J. Características do lixiviado de aterros sanitários no Brasil. Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte, 2007.

STAFF, C. E. *The Foundation and Growth of the Geomembrane Industry in the United States, In International Conference on Geomembranes*, St. Paul, pp 5-8, 1984.

STATLED BRASIL. Duas imagens aéreas do AMG, disponibilizadas por email em julho 2023.

STATLED BRASIL. Registros de pluviometria da estação meteorológica do AMG, disponibilizadas por email em novembro 2024.

TAKE, W. A.; CHAPPEL, M. J.; BRACHAMAN, R. W. I.; ROWE, R. K. Quantifying geomembrane wrinkles using aerial photography and digital image processing. **Geosynthetics International**, 14, 219-227, 2007.

THIEL, R. *Analysis of Stresses and Strains in geomembrane gas bubble that occur in surface impoundment*, **Geotechnical Special Publication** – January, 244-255, 2016.

THIEL, R.; ELDESOUKY, H.; BRACHAMAN, R. *Method to estimate pressures and strains in pond geomembrane bubbles*, Disponível em: <https://geosyntheticsmagazine.com/2020/08/01/methods-to-estimate-pressures-and-strains-in-pond-geomembrane-bubbles/>. Acessado em 20 mar. 2024.

THIEL, R.; GIROUD, J. P. *Important Considerations for Leakage Control of Exposed Geomembrane-Lined Ponds*. In: Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium. **Proceeding**. Sardinia, 2011.

TOEPFER, G. *Lessons Learned from 30 Years of Construction Quality Assurance in Geosynthetic Lined Containment Systems*. Disponível em: <https://uknowledge.uky.edu/woca/woca2022/day2/23>. Acessado em: 20 dez. 2023.

TOUZE-FOLTZ, N.; ROWE, R. K.; DUQUENNOI, C. *Liquid flow through composite liners due to geomembrane defects: analytical solutions for axi-symmetric and two-dimensional problems*. **Geosynthetic Institute**. 6 (6), 455-479, 1999.

UNIÃO EUROPÉIA. Diretiva número 2018/850 do parlamento europeu e do conselho, que altera a Diretiva 1999/31/CE relativa à deposição de resíduos em aterros, 2018.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Criteria for municipal solid waste landfills (MSWLF Criteria): Design criteria. Chapter 4. Subpart D*. Ohio: USEPA, 1993. Disponível em: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-I/part-258>. Acesso em: 04 Ago. 2024.

VALENTIN, C.A.; KOBELNIK M., FRANCO Y.B., LAVOIE, F.L., SILVA J.L., LUZ, M.P. *Study of the ultraviolet effect and thermal analysis on polypropylene nonwoven geotextile*. **Materials**, 14(5):1080 8, 2021.

WERNER, G.; PUHRINGER, G.; FROBEL, R. K. *Multiaxial stress rupture and puncture testing of geotextile*. In: International Conference on Geosynthetics, 4., Hague, Netherlands, v. 2, 765-770, 1990.

ZIDAN, P.M.; FRIGO, L.P.A. Soil Survey: metodologia inovadora, no Brasil, adotada pela CTR-Rio para controle da qualidade da instalação da GM. **Revista Ares Ambiente & Resíduos**, Grappa Editora e Abrelpe, v.6, p.56-63, 2016.

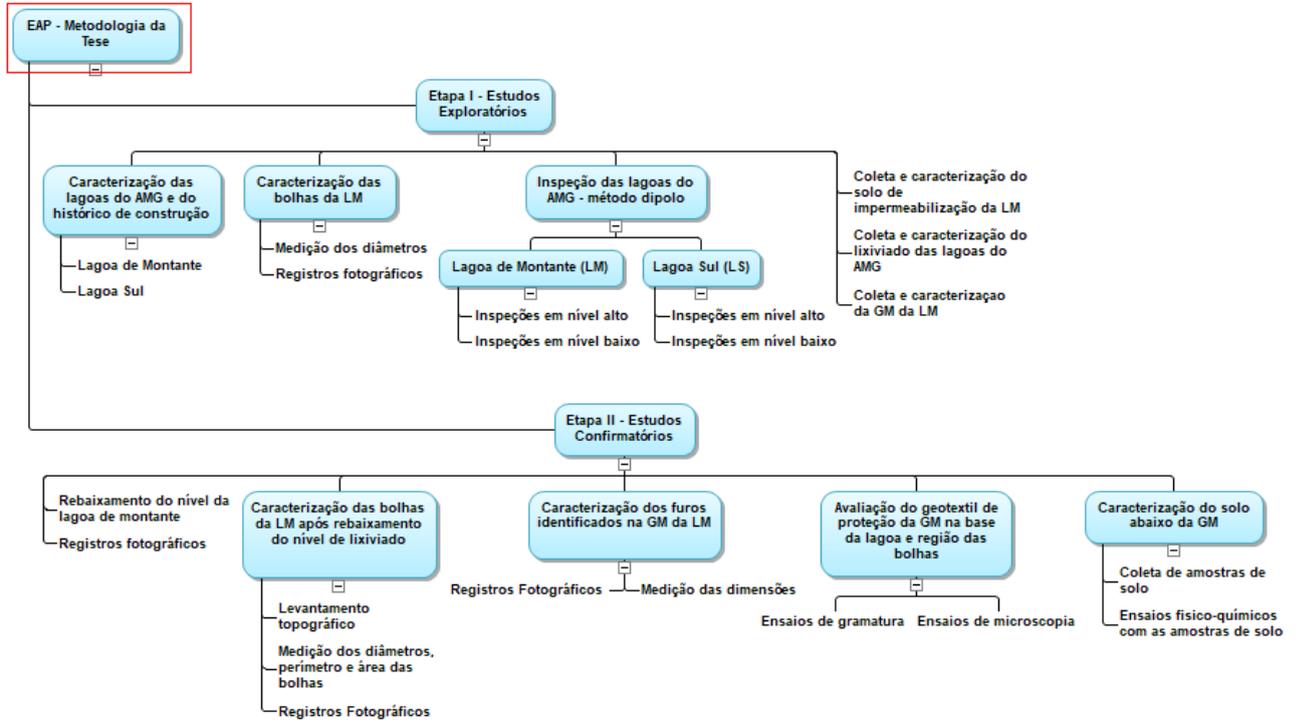
ZIDAN, P.M.; FRIGO, L.P.A.; KEMNITZ, M. *Soil Survey: Methodology Improvement in Brazil Adopted by CTR-RIO for the Quality Control of Geomembrane Installations*. Anais do Geotechnical Frontier, Orlando, Flórida, 2017.

ZIDAN, P.M.; FRIGO, L.P.A.; KEMNITZ, M.; LEAL, L.S. Detecção de Vazamentos em Geomembranas - Aplicação dos Métodos Geométricos na Indústria de Mineração. Anais IX Congresso Brasileiro de Geossintéticos, São Carlos, SP, 2019.

ZIDAN, P.M.; RITTER, E. Formação de Bolhas em Geomembranas de Impermeabilização, Empregadas em Lagoas de Lixiviados de Aterros Sanitários: Revisão Bibliográfica. Anais de X Congresso Brasileiro de Geossintéticos, Salvador, BA, vol. I, p.30, 2023.

ZIDAN, P.M.; KEMNITZ, M.; RITTER, E. *Locating leaks in geomembrane-lined ponds using the electrical leak location method: case histories*. **Geotextile and Geomembrane**. International Geosynthetic Society, v. 52, p.773-777, 2024.

## ANEXO A: ESTRUTURA ANALÍTICA DO PROJETO



**ANEXO B: Imagens de furos identificados em geomembrana coberta com solo**  
**(aplicação do método dipolo)**

Figura 1 - Imagens de furos por corte de estilete



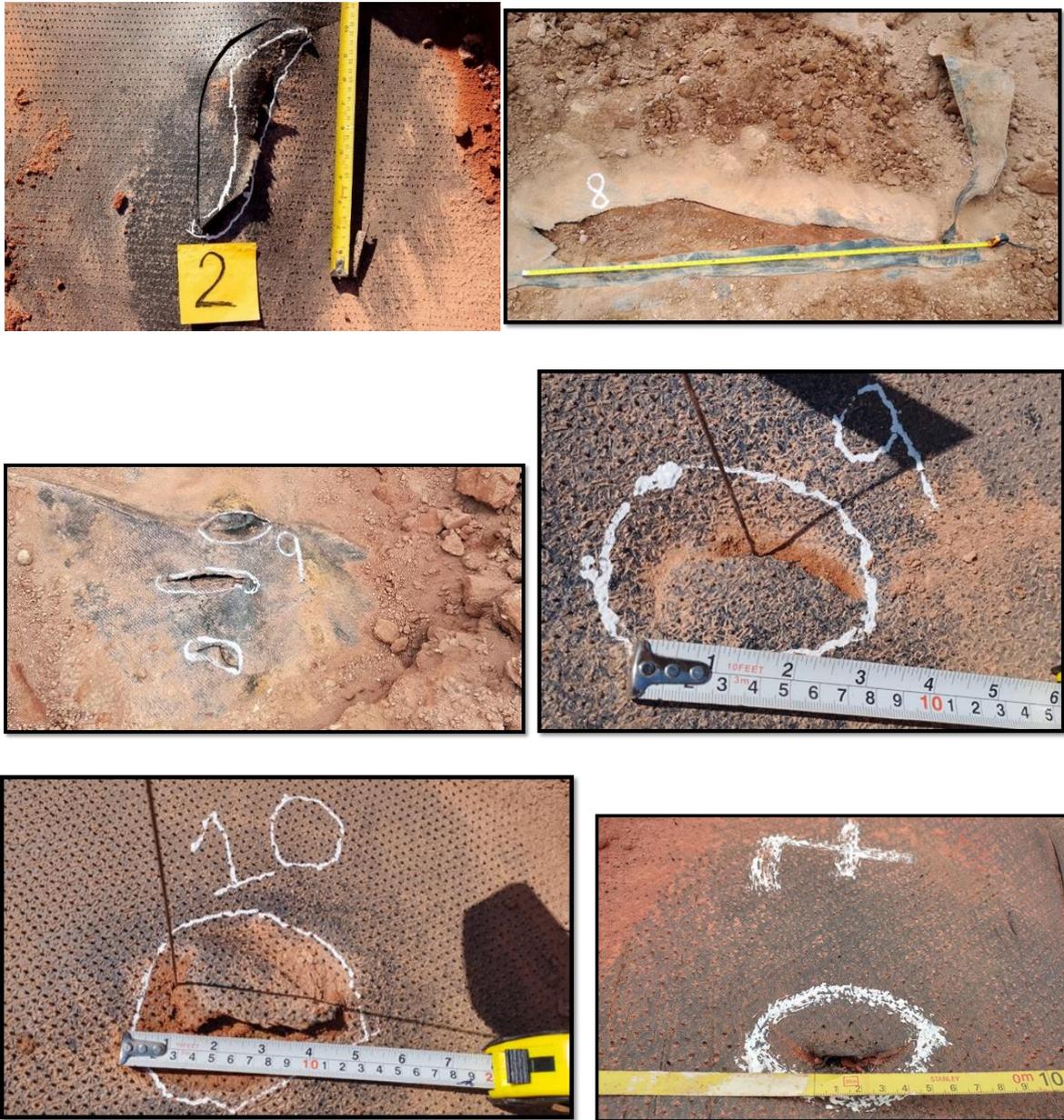
Fonte: Evolui, 2019-2023

Figura 2 - Imagens de furos por punção



Fonte: Evolui, 2019-2023

Figura 3 - Imagens de furos por máquina pesada



Fonte: Evolui, 2019-2023

Figura 4 - Imagens de furos causado por estaca



Fonte: Evolui, 2019-2023

**Produção de artigos durante o desenvolvimento da tese:**

**ANEXO C: Artigo publicado na revista Geotextile and Geomembrane em abril/2024**



Contents lists available at ScienceDirect

# Geotextiles and Geomembranes

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/geotexmem](http://www.elsevier.com/locate/geotexmem)

## Locating leaks in geomembrane-lined ponds using the electrical leak location method: Case histories

Priscila Zidan<sup>a,\*</sup>, Matthew Kemnitz<sup>b</sup>, Elisabeth Ritter<sup>a</sup><sup>a</sup> Rio de Janeiro State University (UERJ) - Av. São Francisco Xavier 524 – 5º Andar, Sala 5029 (bloco F), Rio de Janeiro, Brazil<sup>b</sup> Leak Location Service (LLSI) – 16142 University Oak, San Antonio, TX, United States

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Electrical leak location  
Geomembrane  
Lined pond  
Leak

### ABSTRACT

Results from seven years of electrical leak location methods applied to geomembrane-lined ponds to locate leaks are presented. Inspections were conducted on 195 projects designed with single ( $n = 74$ ), double ( $n = 120$ ), or triple ( $n = 1$ ) liners. These projects are located in the U.S.A. ( $n = 159$ ), Canada ( $n = 30$ ), and Mexico ( $n = 11$ ). All inspections were conducted on full ponds, which resulted in the detection and repair of 1230 leaks during the study period across an analyzed area of 322 ha. From 2015 to 2021, the average was 14 leaks/ha, with values ranging from 0 to 689 leaks/ha. The results reveal that larger inspected areas (greater than 2 ha) tend to have fewer leaks. 63% of projects had up to 5 leaks/ha. 15% of projects had more than 20 leaks/ha. The results of this study could influence landfill designers, operators, and environmental agencies in defining new practices for designing and operating geomembrane-lined ponds.

### 1. Introduction

Geomembrane-lined ponds are essential facilities for storing and treating leachate from landfills. Historically, growing knowledge of the constituents and pollutant concentrations of leachate has contributed to changing the design of ponds used to contain this type of effluent. A compacted clay liner has been used with a geomembrane in a composite liner to improve facility quality control. However, as mentioned by Rowe (2011), it is not practical to construct a liner without any holes. According to Peggs (2009), damage in the geomembrane is considered unavoidable. Designers changed the concept to double liner systems and incorporated a leak detection system to aid in removing any liquid that may have leaked through the liner. Nevertheless, many ponds still operate with a single-liner geomembrane system.

Many researchers (Giroud, 2016; Rowe, 2012; McDaniel et al., 2019) have reported the importance of adopting quality control procedures in installing geomembranes to reduce holes. According to Rowe (2012), holes may arise from manufacturing defects, handling of the geomembrane rolls, on-site placement and seaming, the placement of drainage gravel over the liner system, trafficking over the liner or the overlying protection layer, placement of waste in a landfill or cleaning of residue from the pond of a leachate lagoon. As Giroud (2019) and Rowe (2012) reported, the holes caused by geomembrane installation

procedures can be detected by applying the leak location methods as a construction quality assurance procedure. These holes can be repaired before the service stage starts and prevent the hazardous impact of contamination (Pandey and Shukla, 2020).

Lined ponds introduce an additional risk of damage due to inadequate procedures during the operation phase of these facilities. In double-lined ponds with a leak monitoring system, it is possible to notice damage and decide to repair it. Nonetheless, single-lined ponds do not afford this type of insight, and adverse trends might take some time to be noticed by an operator (Gilson-Beck, 2019). Additionally, as noted by Thiel and Giroud (2011) and Eldesouky et al. (2023), the presence of leaks in single-lined ponds allows leakage through the geomembrane. The consequent possibility of biogas production can lead to pressure beneath the liner, causing it to lose contact with the soil. As reported by Guo et al. (2016), the resulting deformed shapes of the geomembrane are referred to as “whales”. Gassner (2017) presented six cases of whales developing in geomembrane-lined ponds, and one of the causes was leaks in the geomembrane.

Despite knowledge of these risks, there has yet to be strong statistical data published about leaks in geomembrane-lined ponds after construction and subsequent use. Rowe et al. (2003) presented a historical case of a single-lined pond (geomembrane and composite clay liner) that was exhumed and visually examined. This study found 528 defects/ha

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [zidan.priscila@posgraduacao.uerj.br](mailto:zidan.priscila@posgraduacao.uerj.br) (P. Zidan), [mattk@llsi.com](mailto:mattk@llsi.com) (M. Kemnitz), [ritter@eng.uerj.br](mailto:ritter@eng.uerj.br) (E. Ritter).

<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2024.04.003>

Received 1 August 2023; Received in revised form 20 February 2024; Accepted 13 April 2024

Available online 26 April 2024

0266-1144/© 2024 Elsevier Ltd. All rights reserved.

after 14 years of lagoon use.

Laine and Miklas (1989) inspected 14.92 ha of geomembrane-lined ponds and found an average of 96 leaks/ha with a range of 8.4–208 leaks/ha in a survey of 14 new or in-service ponds. Those authors adopted the dipole method, an electrical leak location survey that identified leaks in lined ponds without the need to remove the liquid. This method was established by international regulatory standards (ASTM, 2016) and operates on the principle of applying an electrical voltage to the liquid in the pond. After systematic measurements in the liquid, leaks in the geomembrane are detected and located when an anomaly in the electrical field is found. It is essential to note that the inspection finds leaks, but not the holes without leakage through them. Thus, as long as moisture goes through a defect in the liner, it can be detected. In addition, one leak area can have more than one hole.

Gilson-Beck (2019) presented the number of leaks per hectare from two projects performed by the dipole method associated with arc testing, resulting in 1.21 and 4.05 leaks/ha in a 12.4 ha and 1.2 ha inspected area respectively. The difference between Laine and Miklas (1989) and Gilson-Beck (2019) was the use of arc testing, other electrical leak location method, used to survey the exposed geomembrane before filling the pond with liquid.

Considering that the number of holes in the geomembrane is part of the needed information to calculate the leakage rate through the composite liner, as proposed by many researchers such as Giroud et al. (1989, 1992), Giroud and Bonaparte (1989a,b), Giroud (1997), Touze-Foltz et al. (1999) and Rowe (2012), the knowledge of actual holes/area in the geomembrane is critical.

This study presents seven years of dipole method data as applied to locate leaks in the primary geomembrane in single, double, and triple-lined ponds after construction or after some time of service and to compare this with available data.

2. Method

All the leak data were provided by LLSI and were obtained using the dipole method in lined ponds covered by liquid to detect leaks in the primary geomembrane. The ponds were tested when full, either after construction or during the operational phase, in what is referred to as a “deep-water survey”. Nevertheless, the data regarding the precise start of operations for each pond were unavailable for this research.

The total inspected area was 322.11 ha, as presented in Table 1. The total number of leaks and surveyed area per year of this study are presented in Fig. 1. Each new inspection was treated as an individual project for this study. All projects involved HDPE (high density polyethylene) geomembrane. Detailed information on all surveyed ponds, including inspected areas, the number of leaks, the type of liner, and project location, can be found in Table 2 (Appendix A).

Seventy-four inspected ponds are single-liner, one hundred and twenty double, and one triple-liner system. The inspections were carried out in a total of 195 projects, which were in the United States (n = 154), Canada (n = 30), and Mexico (n = 11), from 2015 to 2021, as presented

Table 1

Summarized data from electrical leak location inspections in geomembrane-lined ponds from 2015 to 2021.

Year	Inspected area (ha)	Detected leaks	Inspected projects	Project location		
				Canada	Mexico	United States
2015	44.38	255	45	5	4	36
2016	79.82	341	34	6	0	28
2017	54.39	152	30	7	4	19
2018	57.62	309	32	6	2	24
2019	39.49	66	20	2	0	18
2020	15.85	51	16	1	0	15
2021	30.57	56	18	3	1	14
Total	322.11	1230	195	30	11	154

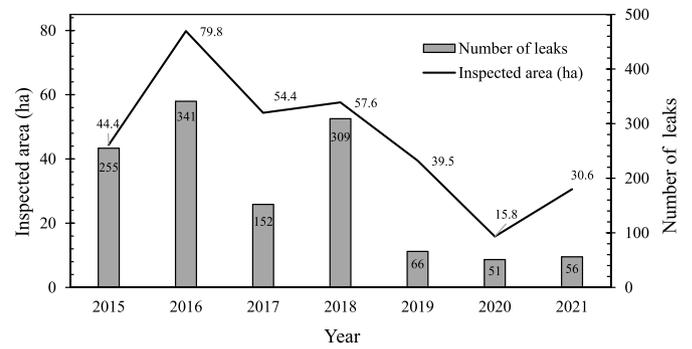


Fig. 1. Progression of the inspected area and number of detected leaks in geomembrane-lined ponds by the electrical leak location surveys from 2015 to 2021.

in Fig. 2.

Field data collection employed a 1-m grid system, with measurements taken using a probing device along a parallel grid line. The data were collected using a portable detector, scanning probe, and DC power supply. During this process, one electrode was installed in the soil beneath the geomembrane, while another electrode was positioned inside the pond, as specified by ASTM D7007. In double or triple-liner configurations, the electrode in the soil below the primary geomembrane was placed in the drainage layer situated between the primary and secondary geomembranes. This setup allowed the inspection of the primary geomembrane. On each inspection day, a test was conducted to verify the suitability of the criteria necessary to perform the test using an artificial leak.

Two operators conducted the survey by moving the probe along the predefined grid using a nylon rope. In this setup the probe could detect leaks smaller than 1.4 mm in diameter.

When potential leaks above the geomembrane covered with liquid were detected, a portable detector emitted a beep. Subsequently, a marker was placed on the edge of the geomembrane to indicate a possible leak. The quantity presented in this study refers to leaks as the inspection was carried out in a pond that was full. Any identified leaks were repaired by the individuals responsible for installing or operating the pond.

3. Results and discussion

Table 1 displays 1230 leaks identified in 322.11 ha of inspected geomembrane-lined ponds over a seven-year period (2015–2021). This equates to an average of 14 leaks/ha in a range spanning from 0 to 689 leaks/ha. Detailed data can be found in Appendix A (Table 2). As shown

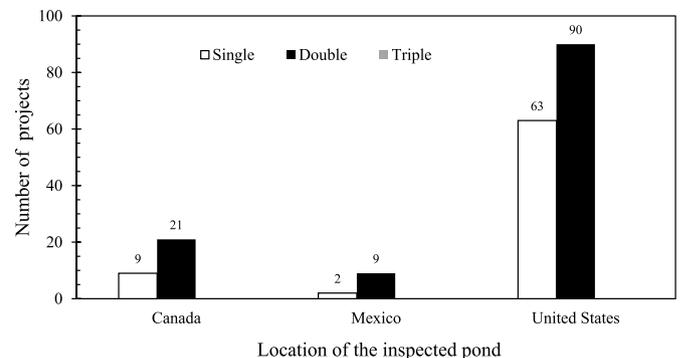


Fig. 2. Location (Canada n = 30; Mexico n = 11; United States n = 154) and typical liner: single (n = 74), double (n = 120), and triple (n = 1, in the United States) in geomembrane-lined pond inspected by electrical leak location from 2015 to 2021.

in Tables 1, in 2020, the total inspected area significantly decreased because of restrictions of the COVID-19 pandemic, but it increased again in 2021.

The graph presented in Fig. 3 illustrates the number of detected leaks/ha, plotted against the size of the inspected area (in hectares) during the period of 2015–2021 (n = 195). This figure also presents the results of Laine and Miklas (1989). Despite the difference in survey period between the two studies, the high number of leaks/ha found by Laine and Miklas in 1989 can be observed in some projects in the present study. However, 98% of projects demonstrated less than 80 leaks/ha, while in Laine and Miklas (1989), only 43% of the ponds showed a comparable outcome. The results from both studies indicate that the number of leaks is lower for areas greater than 2 ha of the geomembrane. This behavior aligns with the observations made by Giroud and Touze-Foltz (2003) and Giroud (2016). This similar pattern suggests that, potentially, larger installations benefit from better workmanship, receiving increased attention to quality assurance (QA) and quality control (QC), which leads to fewer leaks in the geomembrane.

Fig. 4 presents a 95% confidence interval of means for leaks/ha using data from this study (n = 195) and Laine and Miklas (n = 14). Different confidence interval ranges are noted, and these differences can be attributed to the different sample sizes (n = 195 and n = 14) and means in both studies.

According to Fig. 4, the means values recorded in this study are smaller than those obtained by Laine and Miklas (1989). This difference may potentially be associated with improvements in QC procedures over the time elapsed between both studies. As electrical leak location started to be applied in 1980s (Gilson-Beck, 2019), the results presented by Laine and Miklas (1989) were obtained at the beginning of its use. Over the past 30 years, this method has also been employed in conjunction with QC procedures. This fact can contribute to the progressive reduction in the leaks per area of geomembrane. Further investigations should be conducted to verify whether there is a natural trend toward reduced leaks over time.

Fig. 5 displays a histogram illustrating the number of inspected projects (n = 195) distributed across five ranges of leaks/ha. The data reveal a significant concentration of projects in the 0–2 leaks/ha range, followed by the >2–5 leaks/ha range. Together, these two ranges accumulate 63.6% of the surveyed ponds. The ranges >5–10 and >10–20 leaks/ha presented 25 and 17 projects, respectively, totaling 21.5% of the inspected ponds. However, a group of 29 ponds exhibited more than 20 leaks/ha, including 9 single and 20 double-lined projects. Due to the absence of a drainage layer in single-lined ponds, leaks cannot be quickly identifying, as suggested by Gilson-Beck (2019). Additionally, the infiltration into the ground could not be avoided, resulting in

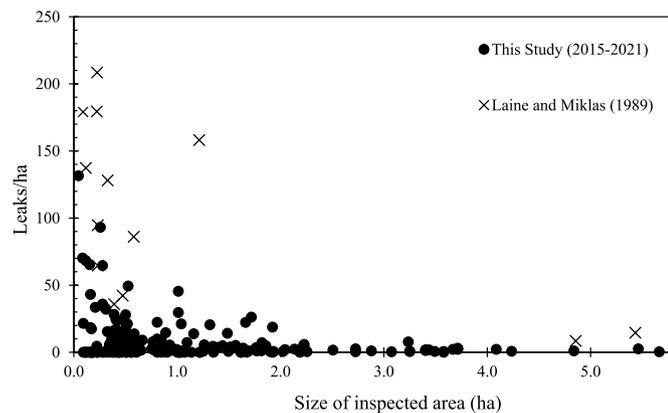


Fig. 3. Distribution of leaks/ha per size of inspected area (in ha) from this study (n = 195) and Laine and Miklas (n = 14). Data from electrical leak location inspection performed in “deep water survey” in geomembrane-lined ponds.

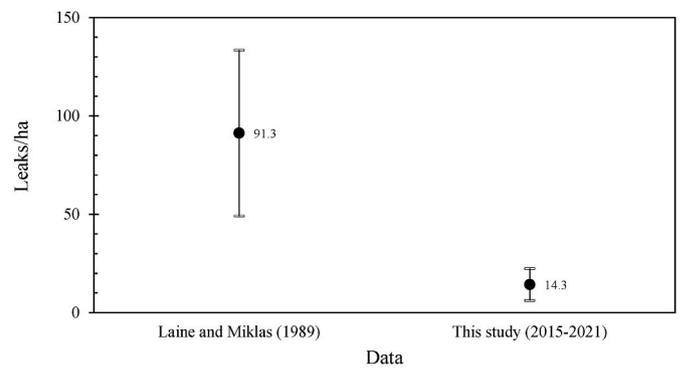


Fig. 4. Graph of 95% confidence intervals of means of leaks/ha to data from this study (n = 195) and Laine and Miklas (n = 14).

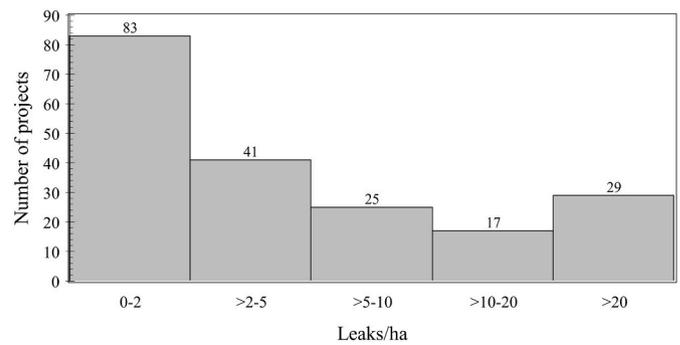
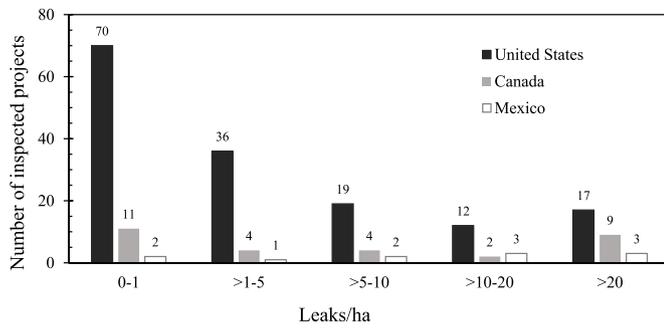


Fig. 5. Histogram chart showing the number of inspected projects (n = 195) distributed in five ranges of leaks/ha: 0–2; >2–5; >5–10, >10–20, and >20. Data from electrical leak location inspection performed in geomembrane-lined ponds in “deep water survey” from 2015 to 2021.

contamination of the soil and/or geotechnical damages, as mentioned by Thiel and Giroud (2011). On the other hand, from the 20 double-lined ponds that presented more than 20 leaks/ha, there are projects with 689, 387, and 132 leaks/ha. Despite these double-lined projects potentially include a drainage layer, the leakage rate should not exceed the capacity of the removal system, as recommended by Thiel and Giroud (2011). These authors suggested that ponds should be taken out of service if the leakage rate exceeds its removal capacity until the leaks are located and repaired. Due to the absence of data indicating when each pond started to operate, it is impossible to classify these data as relating to newly constructed or already operational ponds. Nevertheless, these statistics are notable and, the leaks per area results are significantly higher than the available data in the literature for geomembrane installation projects. According to Giroud and Bonaparte (1989a), “a frequency of 25 holes/ha or more is possible when quality assurance is limited to an engineering spot-checking the work done by geomembrane installers”. Consequently, the surveyed projects displaying a high number of leaks per hectare likely did not implement effective quality control procedures during geomembrane installation or adopted inadequate operational procedures in the ponds. Further data analysis is essential to draw conclusions about trends of high values of leaks/ha in the operational stage. Furthermore, at least one leak was found in 151 of the inspected ponds in this study, of which 56 were single-liner, 94 were double-lined, and 1 was triple-lined. Given this information, it is essential to establish a regular inspection for single-lined ponds to minimize leakage and to reduce the risk of the formation of “whales” in those facilities. For double and triple-lined projects, inspections should be conducted before the drainage layer reaches its maximum leachate removal capacity.

Fig. 6 illustrates the number of inspected projects from Canada (n = 30), Mexico (n = 11) and the United States (n = 154). Despite the



**Fig. 6.** Graph showing the number of inspected projects from the three studied locations (Canada  $n = 30$ ; Mexico  $n = 11$ ; United States  $n = 154$ ), distributed in five ranges of leaks/ha: 0–1; >1–5; >5–10; >10–20; and >20. Data from electrical leak location inspection performed in geomembrane-lined ponds in “deep water survey” from 2015 to 2021.

differences in the sample size of this three locations, the United States presents a significant number of ponds with 0–1 and >1–5 leaks/ha, totaling 68% of inspected ponds in the country. However, 17 projects in the United States reported more than 20 leaks/ha. In Canada, most projects fall into the 0–1 leaks per hectare category ( $n = 11$ ) and the >20 leaks per hectare category ( $n = 9$ ), with eight of the nine projects in the latter range being double-lined ponds. The results for Mexico were distributed across these five ranges, and further data analysis is essential to draw conclusions about trends.

The ratio of total leaks/total inspected area (in ha) for each year is presented in Fig. 7, covering the years 2015–2021 ( $n = 195$ ). Linear regression line suggests a further trend of reduced leaks per unit area over the study period. As mentioned by Giroud (2019), in modern geomembrane installation practices, most holes can be identified and repaired due to construction quality assurance and electrical leak location surveys. The knowledge obtained after many years of applying quality assurance procedures during geomembrane installation likely contributes to the reduction in leaks/area.

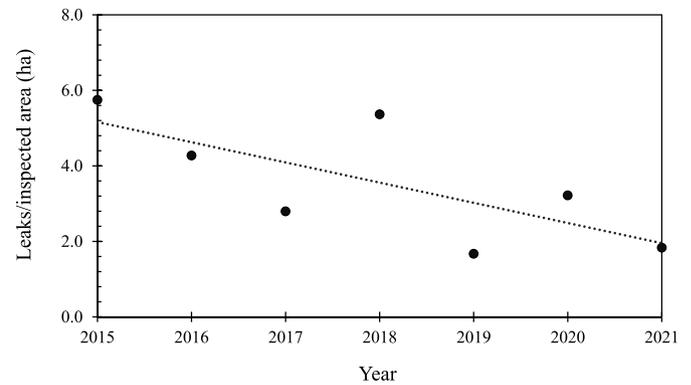
Fig. 8 presents the 95% confidence intervals of means of leaks/ha per year of inspection from 2015 to 2021 from this study ( $n = 195$ ). This figure presents a reduction in the confidence interval over the years. Furthermore, the means within these confidence intervals demonstrate a consistent tendency to decrease over the study period. This information corroborates the data presented in Figs. 4 and 7. Further studies should investigate a potential trend of decreasing leaks per area in newly constructed ponds and assess the long-term integrity of geomembranes after given periods of service.

#### 4. Conclusions

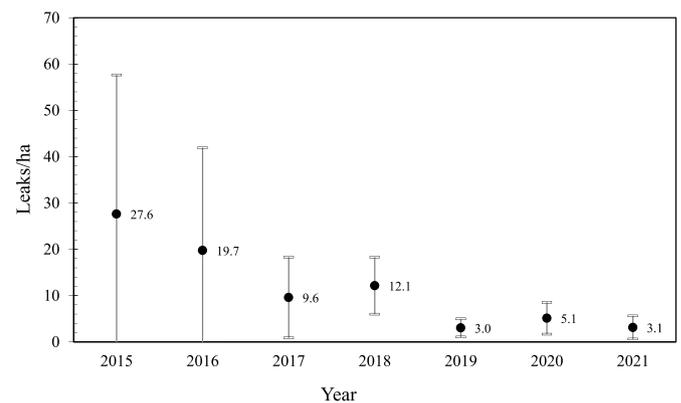
The results presented in this study confirmed that the number of leaks in geomembrane-lined ponds tends to be lower for areas greater than 2 ha. This trend was also observed in the data from Laine and Miklas (1989). Presumably, this pattern suggests that larger installations benefit from better workmanship and increased attention to QA/QC, which leads to fewer leaks in the geomembrane.

The present data had a lower average leaks/ha than those published by Laine and Miklas (1989). This difference, which was statistically significant at a 95% confidence interval, suggests that the use of electrical leak location associated with QC procedures may have contributed to the reduction of leaks over these almost 30 years of method application.

Many projects studied here presented 0–2 leaks/ha and >2–5 leaks/ha. However, approximately 15% of the studied projects had more than 20 leaks per hectare, with some ponds having values of 689, 387, and 132 leaks per hectare, which are much higher than those reported by Giroud and Bonaparte (1989a) for projects with low quality assurance in geomembrane installation. These high values of leaks per hectare could



**Fig. 7.** Leaks per inspected area (ha) for each year of inspection. Data from this study ( $n = 195$ ) by application of electrical leak location in geomembrane-lined ponds on “deep water survey” from 2015 to 2021.



**Fig. 8.** Graph of 95% confidence intervals of means of leaks/ha per inspection year. Data from this study ( $n = 195$ ) by application of electrical leak location in geomembrane-lined ponds on the “deep water survey” from 2015 ( $n = 45$ ), 2016 ( $n = 34$ ), 2017 ( $n = 30$ ), 2018 ( $n = 32$ ), 2019 ( $n = 20$ ), 2020 ( $n = 16$ ), and 2021 ( $n = 18$ ).

be associated with inadequate operational procedures in the ponds or the absence of QA/QC during the installation of the geomembrane.

These findings underscore the importance of considering the risk of leaks in geomembrane-lined ponds when designing new leachate reservoirs. This highlights the significance of incorporating electrical leak location methods as procedures during both the construction and service stages of ponds.

#### CRediT authorship contribution statement

**Priscila Zidan:** Formal analysis, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Matthew Kemnitz:** Data curation, Methodology, Resources, Writing – review & editing. **Elisabeth Ritter:** Supervision, Validation, Writing – review & editing.

#### Data availability

Data will be made available on request.

#### Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2024.04.003>.

## References

- ASTM, 2016. Standard Practice for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials, D7007. ASTM, West Conshohocken, PA.
- Eldesouky, H.M.G., Thiel, R., Brachman, R.W.I., 2023. Assessment of geomembrane strain from pond liner bubble. *Geotext. Geomembranes* 51 (6), 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2023.07.002>.
- Gassner, F., 2017. Development and management of geomembrane liner hippos. *Geotext. Geomembranes* 45 (6), 702–706.
- Gilson-Beck, A., 2019. Controlling Leakage through installed geomembranes using electrical leak location. *Geotext. Geomembranes* 47 (5), 697–710. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2019.103501>.
- Giroud, J.P., 2019. Lessons learned from case histories of reservoirs lined with geomembranes. *Rev. Fr. Geotech.* 159 (2), 1–13. <https://doi.org/10.1051/geotech/2019014>.
- Giroud, J.P., 2016. Leakage control using geomembrane liner. *Soils and Rocks* 39 (3), 213–235.
- Giroud, J.P., Touze-Foltz, N., 2003. Geomembrane for landfills. *Geosynth. Int.* 10 (4), 124–133.
- Giroud, J.P., 1997. Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners due to geomembrane defects. *Geosynth. Int.* 4 (3–4), 335–348.
- Giroud, J.P., Badu-Tweneboah, K., Bonaparte, R., 1992. Rate of leakage through a composite liner due to geomembrane defects. *Geotext. Geomembranes* 11 (1), 1–28.
- Giroud, J.P., Khatami, A., Badu-Tweneboah, K., 1989. Evaluation of the rate of leakage through composite liners. *Geotext. Geomembranes* 8 (4), 337–340.
- Giroud, J.P., Bonaparte, R., 1989a. Leakage through liners constructed with geomembranes-part I: geomembrane liners. *Geotext. Geomembranes* 8 (1), 27–67.
- Giroud, J.P., Bonaparte, R., 1989b. Leakage through liners constructed with geomembranes-part 2: composite Liners. *Geotext. Geomembranes* 8 (2), 71–111.
- Guo, W., Chu, J., Zhou, B., Sun, L., 2016. Analysis of geomembrane failure due to liquid flow through composite liner. *Geotext. Geomembranes* 44 (3), 247–253.
- Laine, D., Miklas, M., 1989. Detection and location of leaks in geomembrane liners using an electrical method: case histories. In: *Proceedings of the 10<sup>th</sup> National Conference*, pp. 35–40.
- McDaniel, H.D., Belts, R., Saunier, P., 2019. Improved QA and QC of double-lined ponds for processed water containment. In: *Proceedings of Tailing and Mine Waste*. Canada, Vancouver, pp. 473–484.
- Peggs, I.D., 2009. Geomembrane Liner Action Leakage Rates: what Is Practical and what Is Not? *Land and Water Magazine*, pp. 47–50. July/August.
- Pandey, L.M.S., Shukla, S.K., 2020. Detection of leakage of MSW – landfill leachate through liner defect: experimental and analytical methods. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 146 (8) [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002288](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002288).
- Rowe, R.K., 2012. Short-and long-term leakage through composite liners. *Can. Geotech. J.* 49 (2), 141–169. <https://doi.org/10.1139/t11-092>.
- Rowe, R.K., 2011. Systems engineering: the design and operation of municipal solid waste landfills to minimize contamination of groundwater. *Geosynth. Int.* 18 (6), 391–404. <https://doi.org/10.1680/gein.2011.18.6.391>.
- Rowe, R.K., Sangam, H.P., Lake, C.B., 2003. Evaluation of an HDPE geomembrane after 14 years as a leachate lagoon liner. *Can. Geotech. J.* 40, 536–550. <https://doi.org/10.1139/T03-019>.
- Thiel, R., Giroud, J.P., 2011. Important considerations for geomembrane-lined ponds. In: *Proceedings of 13<sup>th</sup> International Waste Management and Landfill Symposium*, p. 12.
- Touze-Foltz, N., Rowe, R.K., Duquennoi, C., 1999. Liquid flow through composite liners due to geomembrane defects: analytical solutions for axi-symmetric and two-dimensional problems. *Geosynth. Int.* 6 (6), 455–479.

**ANEXO D: Artigo apresentado no Geoaméricas 2024 – Toronto/Canadá em maio/2024**

# Experience in locating leaks in geomembrane-lined ponds

Priscila Zidan<sup>1\*</sup>, Matthew Kemnitz<sup>2</sup> and Elisabeth Ritter<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Rio de Janeiro State University (UERJ), Av. São Francisco Xavier 524– 5° andar, sala 5029 (bloco F), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

<sup>2</sup>Leak Location Service (LLSI) – 16142 University Oak, San Antonio, Texas, United States

**Abstract.** This study presents the results of five years of applying the dipole method in geomembrane-lined ponds to locate leaks arising from either the construction or operational stage. Inspections were conducted on 136 projects designed with single (n=57) or double (n=79) liner and located in the United States (n=108), Mexico (n=5), or Canada (n=23). The ponds were tested either full or at a depth between 0.3m and 0.8m, both sets of results were compared to the available literature. Approximately 210 ha of primary geomembrane-lined ponds were surveyed, uncovering 825 leaks during the study period. An average number of leaks/ha was 13.2 ranging from 0 to 272. The highest results were 272, 242, and 131 leaks/ha in double-lined, and 80 and 77 leaks/ha in single-lined ponds. The inspected data revealed that 43% of projects had 0-2 leaks/ha, 20% had >2-5 leaks/ha, 14% had >5-10 leaks/ha, and 16% of the ponds had >20 leaks/ha. The results of this study are crucial for designers, Landfill Operators, and Environmental Agencies in establishing inspection practiced for lined ponds, particularly after a period of operation.

## 1 Introduction

Geomembrane-lined ponds are essential facilities for storing and treating leachate in landfills. However, as mentioned by Rowe [1], constructing a liner without any holes is not likely. According to Peggs [2], damage to the geomembrane is considered unavoidable. Given this understanding, Thiel and Giroud [3] suggested that the most fundamental consideration in designing an exposed geomembrane-lined pond is to assume that the geomembrane leaks.

Over the years, the design of ponds used to contain leachate has evolved. The compacted clay liner, often used in conjunction with the geomembrane as a composite liner, has been replaced by the double liner with a leak detection system, which helps to identify and remove any liquid that may have leaked through the liner. Despite this advancement, many ponds still operate with a single-liner geomembrane system.

Giroud [4] and Rowe [5] have emphasized the importance of adopting quality control procedures during geomembrane installations to reduce the occurrence of holes. According

---

\* Corresponding author: [priscilazidan@gmail.com](mailto:priscilazidan@gmail.com)

to Rowe [5], holes may arise from manufacturing defects, handling of the geomembrane rolls, seaming, on-site placement, traffic over the liner, placing the cover soil, waste placement in landfills and subsequent stress cracking. More recently, studies has been published presenting problems of leakage through geomembranes in tailing storage facilities [6-7] ]. As noted by Giroud [8], holes caused by geomembrane installation procedures can be detected by employing leak location methods as part of construction quality assurance. These holes can be repaired before the service stage begins, thus preventing environmental contamination [9].

Lined ponds pose an additional risk of damage due to inadequate procedures during the service stage. Moreover, ponds may be more susceptible to damage compared to landfills because the liquid pressure is higher and more evenly distributed, and the pressure does not decrease when the liner settles [10]. In the case of double-lined ponds with a leak monitoring system, it is possible to detect leakage and thus make repairs promptly. However, single-lined pond lacks this level of insight and may take some time to be noticed by the operator.

The primary consequence of failing to identify leaks in single-lined projects is the potential leakage of leachate from the pond through the liner. Several studies [11-14],[4],[5] have been conducted to quantify this leakage rate. Despite this awareness of this risk, no available statistical data has been published regarding leaks in geomembrane-lined ponds after construction and a period of use. This study aims to present the results of five years of applying the dipole method, an electrical leak location method to locate leaks in the primary geomembrane in both single and double-lined ponds immediately after construction or after a period of service and compare this with existing data.

## 2 Methodology

All the presented data was provided by LLSI (Leak Location Service, Inc) and are the results of the application of the dipole method in lined ponds covered by liquid to locate leaks in the primary geomembrane. Ponds were tested when full, in a deep-water survey, or when the liquid level was at a depth between 0.3m and 0.8 m, in a shallow-water survey. The inspections were conducted after construction or in the operational phases.

The dipole method has already been established according to international regulatory standards [15], enabling the location of leaks in the geomembrane covered by liquid. This method's principle is based on applying electrical voltage to the liquid covering the geomembrane. After systematic measurements in the liquid, leaks in the geomembrane are detected and located when an anomaly in the electrical field is found. The inspection identifies leaks but not holes without leakage through them. If moisture passes through a defect in the liner, it can be detected. One leak area can have more than one hole.

Field data collection utilized a one-meter grid system. Measurements with a probe were conducted along parallel lines on the grid. The data was collected using a portable detector, scanning probe and a power supply. One electrode was installed in the soil beneath the geomembrane while another electrode was positioned inside the pond, as specified by ASTM D7007. In double-lined configurations, instead of installing the electrode in the soil, it was placed in the drainage layer between the primary and secondary geomembranes. This setup allows the inspection of the primary geomembrane. On each inspection day, a test was performed using an artificial leak to ensure that the criteria necessary for conducting the test were met.

In the deep-water survey, two operators positioned outside the pond move the probe along a defined grid using a nylon rope. In the shallow water survey, one operator walks inside the pond, moving another probe along a marked grid. In this setup, the probe could detect leaks smaller than 1.0 mm in diameter.

Signs of potential leaks above the geomembrane covered with liquid were detected due to a beep emitted by the portable detector. A mark is placed on the border of the

geomembrane (deep water survey), or a sandbag with a float is positioned on the leak signal to indicate the possible hole. As the inspection was conducted in a pond with liquid, the quantities presented refer to leaks.

The total inspected area was 210 ha from 2017 to 2021, of which 198 ha are from deep water and 12 ha are from shallow water surveys. Each new pond inspection was considered a project for this study. Data were analysed in Microsoft Excel, and the results are presented in Figures 1 to 5.

### 3 Results and Discussion

The application of the deep-water survey in 116 projects, most of them in the United States, from 2017 to 2021, resulted in 634 leaks found in almost 198 ha of inspected geomembrane-lined ponds, as shown in Table 1. This data presents an average of 7.5 leaks/ha in a range of 0-131 leaks/ha.

**Table 1.** Summary of deep-water survey data from 2017 to 2021.

Year	Inspected projects	Inspected area (ha)	Leaks	Project location			Typical liner	
				Mexico	Canada	USA	Single	Double
2017	30	54.39	152	4	7	19	14	16
2018	32	57.62	309	1	6	25	13	19
2019	20	39.49	66	0	3	17	8	12
2020	16	15.85	51	0	1	15	4	12
2021	18	30.57	56	0	4	14	5	13
Total	116	197.91	634	5	21	90	44	72

The shallow-water survey was applied to 20 projects, mostly in the United States, from 2017 to 2021, resulting in 191 leaks found in almost 12 ha of inspected geomembrane-lined ponds. This data shows an average of 46 leaks/ha in a range of 0-272 leaks/ha.

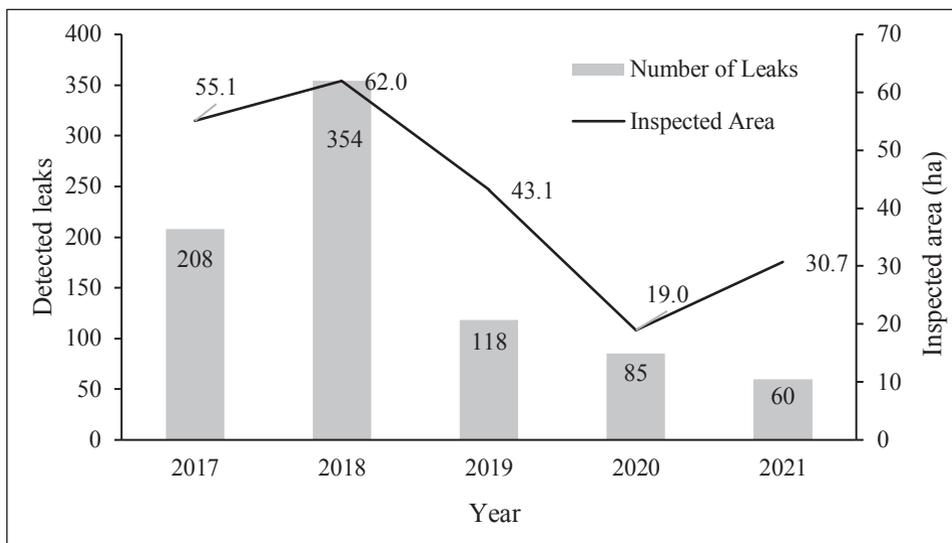
**Table 2.** Summary of shallow-water survey data from 2017 to 2021.

Year	Inspected projects	Inspected area (ha)	Leaks	Project location			Typical liner	
				Mexico	Canada	USA	Single	Double
2017	2	0.72	56	0	2	0	2	0
2018	8	4.36	45	0	0	8	4	4
2019	4	3.65	52	0	0	4	2	2
2020	4	3.10	34	0	0	4	3	1
2021	2	0.16	4	0	0	2	2	0
Total	20	11.99	191	0	2	18	13	7

The highest average of leaks/ha in shallow-water compared to deep-water is associated with the greater accuracy of the shallow probe compared to deep-water. The deep-water method employs a highly sensitive probe that will not distinguish between two or three leaks that are close together.

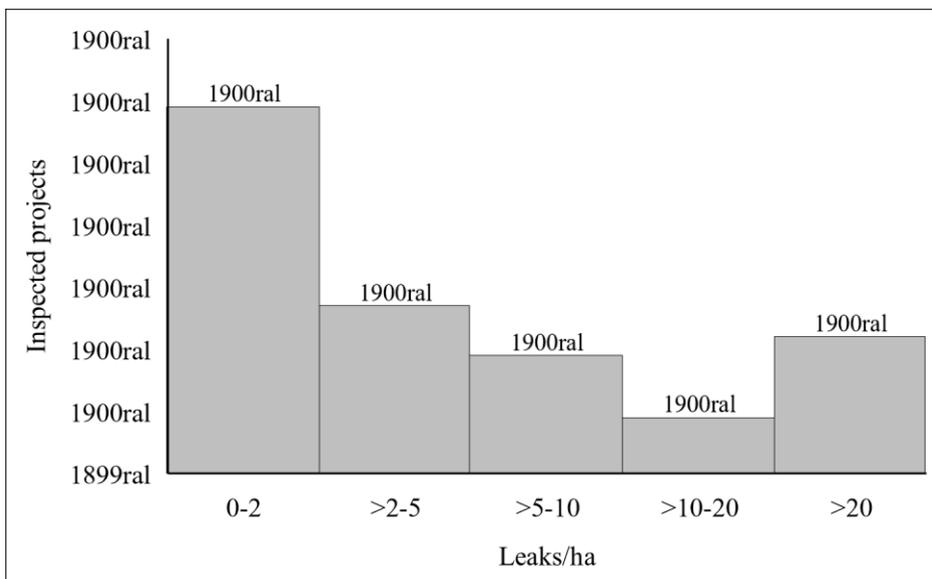
The graph presented in Figure 1 presents the number of leaks detected in a year and the corresponding inspected area by applying the dipole method (n=136) in one of the two options: deep (n=116) or shallow (n=20) water to locate leaks for the period of this study (2017 to 2021). According to this figure, in 2020, there was a significant reduction in the

total inspected area due to restrictions of the COVID-19 pandemic, but in 2021, the areas increased again.



**Fig. 1.** Progression of deep (n=116) and shallow (n=20) water inspections in geomembrane-lined ponds from 2017 to 2021.

Figure 2 displays the number of inspected projects (n=136) distributed in five ranges of leaks/ha.



**Fig. 2.** Histogram chart illustrating the distribution of the number of inspected projects (n=136) across five ranges of the leaks/ha: 0-2; >2-5; >5-10; >10-20; and > 20. Data from electrical leak location inspections performed in geomembrane-lined ponds in deep (n=116) or shallow (n=20) water surveys from 2017 to 2021.

According to Figure 2, 77% of the inspected ponds fall within the ranges of 0-2 leaks/ha ( $n=59$ ), >2-5 leaks/ha ( $n=27$ ), and >5-10 leaks/ha ( $n=19$ ). Additionally, it is important to note that results were observed at 272, 239, and 131 leaks/ha (in double-lined projects) and 80 and 77 leaks/ha (in single-lined ponds). Due to the absence of a drainage layer in single-lined ponds, leaks are not easily noticed and infiltration into the ground cannot be avoided, resulting in the contamination of the soil and/or other damages [3]. Despite the double-lined projects potentially including a drainage layer, the leakage rate should not exceed the capacity of the removal system [3]. It is recommended that ponds should be taken out of service if the leakage rate exceeds its removal capacity until the leaks are located and repaired [3].

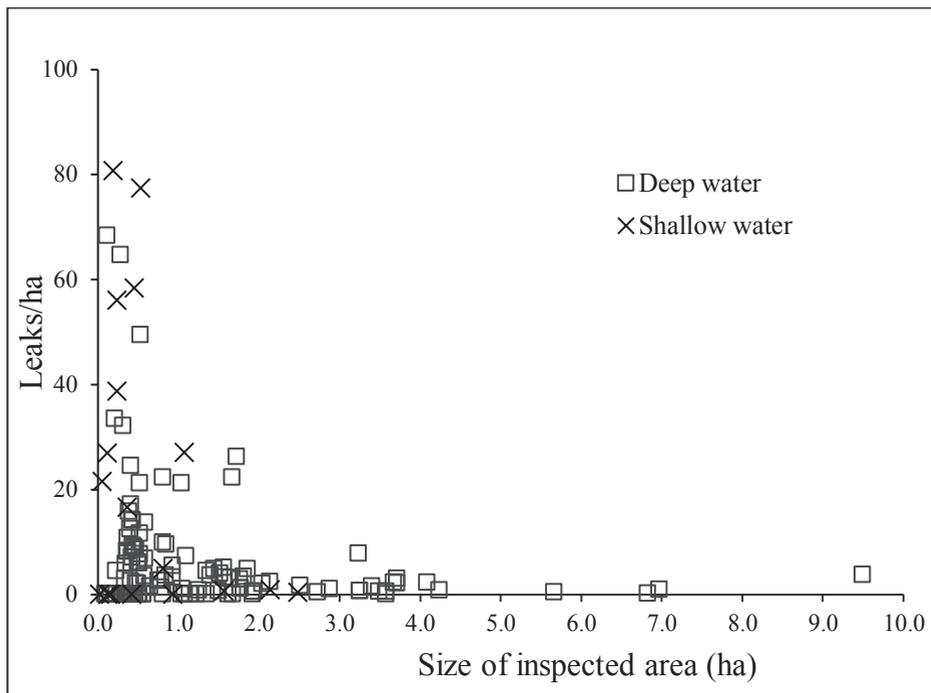
This higher value of leaks/ha found differs from the available data in the literature for constructed geomembrane-lined ponds. In 2016, Giroud [4] reviewed 150 cases of electrical leak location surveys conducted across 250 ha of HDPE-installed geomembrane in the United States, with typical construction quality assurance, and found an average of 5.4 holes/ha. The same article [4] concluded that 5 to 6 holes/ha could be considered typical at the end of geomembrane installation when quality control procedures were implemented. However, in situations where this is not the case, a higher number of leaks/ha can be expected, as suggested by Giroud and Bonaparte [11], who stated that "a frequency of 25 holes/ha or more is possible when quality assurance is limited to an engineer spot-checking the work done by geomembrane installers". Due to the lack of data indicating when each pond started to operate, it is impossible to classify this data as relating to newly constructed or already operational ponds. The surveyed projects that exhibited numerous leaks/ha likely required the implementation of quality control procedures during geomembrane installation or may have adopted inadequate pond operating procedures. Further data analysis is essential to draw conclusions about trends of high values of leaks/ha in the operational stage.

At least one leak was found in 104 of the inspected ponds in this study, which means approximately 77% of the surveyed pond, with 45 ponds from this group being single-lined and 59 being double-lined projects. Based on this information, it is crucial to establish an inspection frequency post-construction during the operational stage for this type of pond to minimize leakage. Figure 3 illustrates the detected leaks/ha based on deep ( $n=116$ ) or shallow ( $n=20$ ) water survey by size of the inspected area in geomembrane-lined ponds from 2017 to 2021.

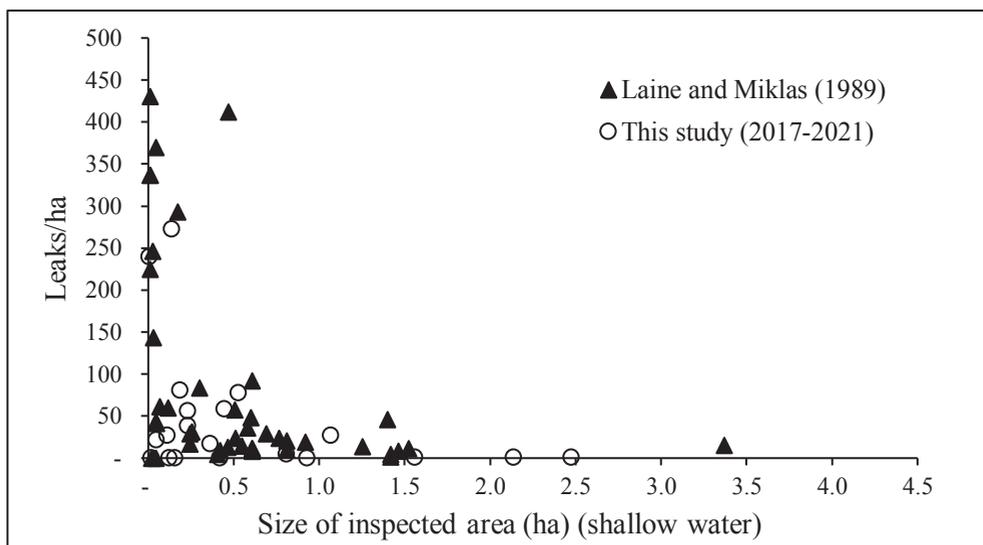
According to Figure 3, most shallow water data showed higher leaks/ha than deep water data. The highest results for leaks/ha, such as 272 and 242, were found in shallow water inspections. Furthermore, most results from this type of inspection were higher than those from deep water inspections. This difference is attributed to the greater accuracy of the probe used in the shallow method compared to deep water method. In other words, during the deep water inspections, several small leaks can appear as a single leak. In shallow water inspections, this occurrence is less likely.

The graph presented in Figure 4 illustrates detected leaks/ha per size of inspected area during 2017 and 2021 from shallow water surveys ( $n=20$ ). This figure also displays the results of Laine and Miklas [17] using the same method. Despite the difference in survey period between the two studies, the high number of leaks/ha found by Laine and Miklas [17] can be observed in some projects inspected in this study. However, most projects from this study exhibit leaks/ha lower than results reported by Laine and Miklas.

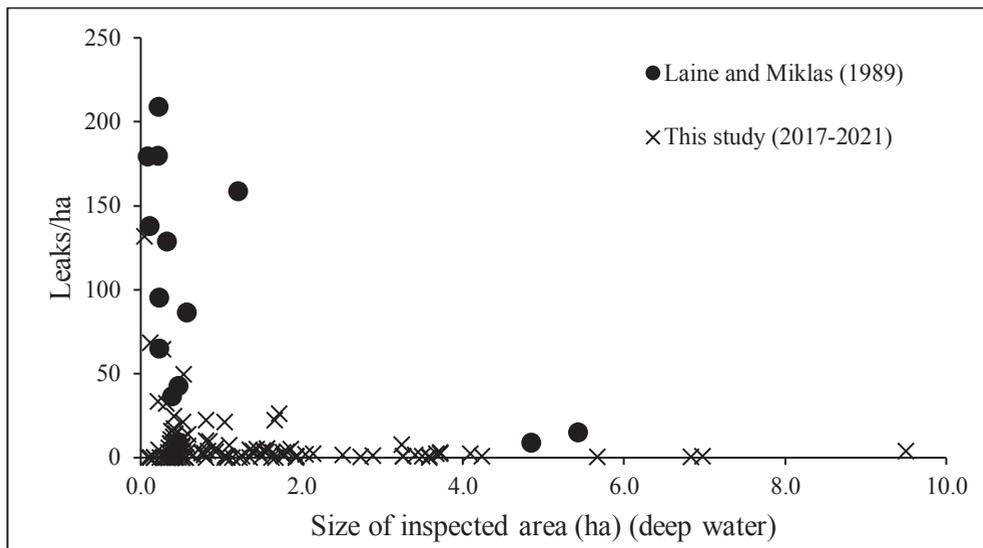
Figure 5 plots detected leaks/ha per size of inspected area during 2017 and 2021 from deep water survey ( $n=116$ ). This Figure also depicts the results of Laine and Miklas [17] using the same method. The majority of the projects from this study exhibited leaks/ha lower than those reported by Laine and Miklas. These results suggest that improvements in the practice of QA/QC over the last 30 years, including the adoption of electrical leak location which began to be commercialized in about 1985 [18], may have influenced the reduction in leaks, as proposed by Giroud [8].



**Fig. 3.** Distribution of leaks/ha per size of inspected area (ha) from this study. Data from electrical leak location inspections performed in deep (n=116) or shallow (n=20) water survey in geomembrane-lined ponds from 2017 to 2021.



**Fig. 4.** Distribution of leaks/ha per size of inspected area (ha) from this study (n=20) and Laine and Miklas (n=47). Data from electrical leak location inspection performed in shallow water survey in geomembrane-lined ponds.



**Fig. 5.** Distribution of leaks/ha per size of inspected area (ha) from this study (n=116) and Laine and Miklas (n=14). Data from electrical leak location inspections performed in deep water surveys” in geomembrane-lined ponds.

In Figure 3, 4 and 5, the data from this study and Laine and Miklas indicated that the number of leaks is smaller for large areas of geomembranes (greater than 2 ha). This behaviour was described by Giroud and Touze-Foltz [16] and Giroud [4]. This similar pattern suggests that larger ponds likely receive greater attention to quality control and assurance procedures during the installation of the geomembrane, consequently reducing leaks.

## 4 Conclusion

The results presented in this study suggest that the number of leaks tends to be lower in areas of geomembrane greater than 2 ha. This behaviour was also observed in the results of Laine and Miklas. The variation in the average leaks/ha between deep and shallow water results is attributed to the differing accuracy of their probes, and this information is crucial to consider when selecting which method to apply.

In 77% of inspected ponds, at least one leak was found, highlighting the importance of electrical leak location as a practice to be adopted in conjunction with quality control procedures to minimize leakage. Many projects exhibited more than 20 leaks/ha, with ponds having 272, 239, and 131 leaks/ha in double-lined and 80 and 77 leaks/ha in single-lined systems. These higher results could be attributed to inadequate operational procedures, defects that occurred after the ponds were filled, or the poor quality control procedures during the geomembrane installation.

These findings indicate the importance of considering the risk of leaks in the geomembrane when designing new ponds. Additionally, it is crucial to incorporate electrical leak location post-construction, in conjunction with QC procedures and in the operational phase when leakage rates approach the removal rate of the drainage layer.

The Authors are grateful to LLSI for providing all the field data to this study.

## References

1. R. K. Rowe, Systems engineering: the design and operation of municipal solid waste landfills to minimize contamination of groundwater. *Geosynth. Int.* **18** (6), 391–404 (2011)
2. I. Peggs, Geomembrane liner action leakage rates: What is practical and what is not? *Land and Water Magazine*, pp. 47-50 July/August (2009)
3. R. Thiel, J. Giroud, Important Considerations for Geomembrane-Lined Ponds. In: *Proceedings of 13th International Waste Management and Landfill Symposium*, p.12 (2011)
4. J. Giroud, Leakage control using geomembrane Liner. *Soils and Rocks* **39** (3), 213-235 (2016)
5. R. K. Rowe, Short-and long-term leakage through composite liners. The 7th Arthur Casagrande Lecture. *Can. Geotech. J.*, **49**, (2), 141–169 (2012)
6. R. K. Rowe, Protecting the environment with geosynthetic. 53<sup>rd</sup> Karl Terzaghi Lecture. *J. Geotech. Geoenviron Eng.* **146** (9) (2020)
7. J. Fan, R. K. Rowe, Effect of subgrade on leakage through a defective geomembrane seam below saturated tailing. *Geotext. Geomembranes*, **51**(2), 360-369 (2023)
8. J. Giroud, Lessons Learned from Case Histories of reservoirs lined with geomembranes. *ver. Fr. Geotech.*, **159**(2), 1-13 (2019)
9. L. Pandey, S. Shukla, Detection of Leakage of MSW - landfill leachate through liner defect: experimental and analytical Methods, *J. Geotech. Geoenviron Eng.* **146** (8) (2020)
10. D. Elton, I. Peggs, Geomembrane research needs – technical paper. *Geosynth. Int.* **9** (3), 283-300 (2002)
11. J. Giroud, R. Bonaparte, Leakage through liners constructed with geomembranes, Part I: geomembrane liners. *Geotext. Geomembranes*, **8**(1), 27-67 (1989a)
12. J. Giroud, R. Bonaparte, Leakage through liners constructed with geomembranes, Part 2: Composite Liners. *Geotext. Geomembranes*, **8**, 71-111 (1989b)
13. J. Giroud, K. Badu-Tweneboah, R. Bonaparte, Rate of leakage through a composite liner due to geomembrane defects. *Geotext. Geomembranes*, **11**, 1-28 (1992)
14. J. Giroud, Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners due to geomembrane defects. *Geosynth. Int.* **4** (3-4), 335-348 (1997)
15. ASTM D7007. Standard Practice for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials.
16. J. Giroud, N. Touze-Foltz, Geomembrane for Landfills. *Geosynth. Int.* **10** (4), 124–133 (2003)
17. D. Laine, M. Miklas, Detection and location of leaks in geomembrane liners using an electrical method: case histories, *Superfund'89 Proceedings of the 10th national Conference*, p. 35-40 (1989)
18. R. M. Koerner, J. M. Koerner, G. R. Koerner, Status of the electrical leak location survey (ELLS) method among state environmental protection agencies in the USA – white paper #34, *Geosynth. Inst.*, 1 (2016)

**ANEXO E: Artigo apresentado no REGEO – Salvador/Brasil em julho/2023**



# Formação de Bolhas em Geomembranas de Impermeabilização, Empregadas em Lagoas de Lixiviados de Aterros Sanitários: Revisão Bibliográfica

Priscila Mendes Zidan

UERJ, Rio de Janeiro, Brasil - priscilazidan@gmail.com

Elisabeth Ritter

UERJ, Rio de Janeiro, Brasil - ritter@eng.uerj.br

**RESUMO:** O uso de lagoas para contenção e tratamento de lixiviado é uma necessidade básica em projetos de aterros sanitários e sua impermeabilização com geomembrana de PEAD é requisito mínimo exigido pelos órgãos ambientais para licenciamento dos empreendimentos. A formação de bolhas de gás embaixo da geomembrana de impermeabilização destas lagoas, as chamadas “whales” ou “hippos”, tem sido relatada por alguns autores. Uma das possíveis causas para tal formação é a presença de vazamentos na geomembrana com consequente formação de biogás pela degradação do lixiviado que entra em contato com o solo abaixo do geossintético. Considerando a relevância do tema e o fato de haver restrita literatura disponível, o presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica narrativa sobre o assunto, focando nas causas da formação das bolhas, entendimento do fenômeno e identificação das lições aprendidas e boas práticas a serem adotadas nos projetos brasileiros. A pesquisa mostrou que a formação da bolha pode causar deformação na geomembrana e consequente necessidade de sua substituição. A troca do solo abaixo do geossintético pode também ser necessária em função da interação do lixiviado com o solo compactado. Além disso, bolhas contendo lixiviado e/ou biogás formado podem estar presentes na lagoa, mas demoram algum tempo para estar visíveis acima do nível do líquido do reservatório. A implantação de sistema de drenagem para o lixiviado e gases formados abaixo da geomembrana pode contribuir para minimizar a formação das bolhas e reduzir seu tamanho.

**Palavras-Chaves:** Geomembrana, *whale*, *hippo*, bolha de ar, lagoa de efluentes, lagoa de lixiviado

**ABSTRACT:** The use of ponds for containment and treatment of leaching is a basic need in landfill projects and their waterproofing with HDPE geomembrane is a minimum requirement required by environmental agencies for licensing of the enterprises. The formation of gas bubbles beneath the waterproofing geomembrane of these lagoons, the so-called "whales" or "hippos" has been reported by some authors. One of the possible causes for such formation is the presence of leaks in the geomembrane with consequent formation of biogas by the degradation of leachate that meets the soil below the geosynthetic. Considering the relevance of the theme and the fact that there is restricted literature available, the present paper intends to present a narrative bibliographic review on the subject, focusing on the causes of bubble formation, understanding of the phenomenon, and identifying lessons learned and good practices to be adopted in Brazilian projects. Research has shown that bubble formation can cause deformation in the geomembrane and consequently need for its replacement. Soil exchange below the geosynthetic may also be necessary due to the interaction of leached with compacted soil. In addition, bubbles containing leached and/or formed biogas may be present in the pond but take some time to be visible above the liquid level of the reservoir. The implementation of drainage system for leaching and gases formed below the geomembrane can contribute to minimize the formation of bubbles and reduce their size.

**Keywords:** Geomembrane, whale, hippo, air bubble, effluent pond and leachate pond.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), no ano de 2020 foram dispostos 65,3 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), sendo 73,8% deste total, em aterros sanitários (em 652 Unidades), 11,6

% em aterros controlados (em 617 Unidades) e 14,6% em lixões (em 1.545 Unidades).

Nos aterros sanitários e, talvez, em alguns aterros controlados, a instalação de lagoas para contenção de lixiviado e, equalização e/ou tratamento deste efluente é uma prática comum. Desta maneira, pode-se afirmar que em cada um destes aterros brasileiros

existe no mínimo uma lagoa de lixiviado.

O uso de geomembranas de PEAD (polietileno de alta densidade) expostas (sem proteção superficial) para a impermeabilização de lagoas de lixiviado é crescente na indústria da gestão de resíduos e de tratamento deste efluente, sendo recomendada como uma solução ambientalmente adequada (ABNT, 2020) e exigida pelos órgãos ambientais no processo de licenciamento dos aterros sanitários.

A adoção da geomembrana de PEAD como barreira de impermeabilização para os reservatórios, entretanto, requer procedimentos adequados para transporte, armazenamento e instalação do geossintético. Segundo Giroud (2016), os resultados da aplicação dos métodos geoeletricos em 150 projetos, envolvendo 2.500.000 m<sup>2</sup> de área de geomembrana instalada, apontaram para uma densidade de 5 a 6 furos/10.000 m<sup>2</sup> do geossintético. Para o mesmo autor, tais resultados foram compatíveis com projetos onde houve a adoção de procedimentos de garantia da qualidade. Quando tais procedimentos não foram empregados, o número de furos chegou a mais de 25/10.000 m<sup>2</sup>.

No Brasil, o monitoramento da integridade da geomembrana, após sua instalação ou uso prolongado, não é uma prática adotada (Zidan & Frigo, 2016). Por este motivo, a inspeção deste geossintético não faz parte dos procedimentos de controle e garantia da qualidade. A última revisão da norma NBR 16.199 – Barreiras Geossintéticas – Instalação de Geomembranas Poliméricas (ABNT, 2020) incluiu a recomendação do uso dos métodos geoeletricos para verificação da estanqueidade global das obras do tipo I (aquelas em que falhas nas barreiras causam danos ambientais).

O monitoramento da qualidade das águas através de poços subterrâneos é adotado em projetos de aterro sanitário, como forma de avaliar a ocorrência de eventuais contaminações em decorrência de vazamentos dos reservatórios. Entretanto, este tipo de dispositivo somente permite identificar os vazamentos quando eles já alteraram a qualidade das águas subterrâneas.

Fora do Brasil, alguns autores têm relatado um problema operacional muito frequente nas lagoas impermeabilizadas com geomembrana (Peggs, 2022 a, b). Trata-se do descolamento do geossintético de seu contato com o solo, formando uma bolha de gás que submerge sob o líquido armazenado (Guo et al., 2016). Estas bolhas, que podem ser observadas na Figura 1, são chamadas pela comunidade científica de “whales” ou “hippos” (Thiel, 2016), possivelmente devido à semelhança com a imagem de uma baleia ou hipopótamo, parcialmente submersos no líquido.

Segundo Marta (2022), a formação das bolhas

acontece devido à pressão de um fluido existente embaixo da geomembrana, o qual pode ser um gás decorrente da biodegradação de matéria orgânica presente no solo, ou ser um líquido oriundo de vazamento pela geomembrana.



Figura 1. Imagem de uma Lagoa de geomembrana com formação de bolhas (*whales*), acima do nível do líquido (adaptado de Marta, 2022).

Quando a bolha é decorrente de furos na geomembrana, o lixiviado que percola pelos orifícios do geossintético propicia a geração do biogás que será o responsável pela pressão embaixo da geomembrana (Guo et al., 2016). Com o aumento da geração do gás, poderá ocorrer o descolamento do geossintético do seu contato com o solo. A partir deste momento, o fluxo do vazamento tenderá a aumentar, contribuindo para maior formação de gás e contaminação do solo abaixo da lagoa (Thiel, 2016). Nesta situação, além do prejuízo operacional decorrente da minimização do espaço útil da lagoa, o dano ao meio ambiente será tanto maior quanto maior for o tempo para o reparo do problema.

Tendo em vista a relevância do tema, o entendimento sobre o fenômeno de formação do *Whale*, suas causas e soluções de tratamento ou minimização tornam-se de grande relevância para os órgãos ambientais e operadores de aterros sanitários. Neste sentido, visto que os relatos sobre o assunto são pouco frequentes, o objetivo deste trabalho é fazer uma revisão bibliográfica narrativa sobre o tema, para mapear informações sobre a ocorrência, causas e soluções utilizadas e/ou lições aprendidas que possam vir a ser avaliadas para adoção no Brasil.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma revisão bibliográfica narrativa foi desenvolvida através de uma pesquisa exploratória, de caráter amplo, com vistas a avaliar qualitativamente o conteúdo textual desenvolvido e publicado entre os anos de 2002 e 2022 a respeito do tema.

O levantamento dos documentos foi realizado mediante uma consulta à plataforma *Scopus*, utilizando-se os termos: “GEOMEMBRANE AND WHALE OR HIPPO” (pesquisa 1). Estes termos foram consultados nos campos de título, resumo e

palavras chaves dos artigos. As buscas foram feitas em documentos em português e inglês, nos dias 04 e 05 de março de 2022 e foram repetidas no dia 08 e 21 de novembro do mesmo ano.

A consulta na plataforma *Scopus* resultou em apenas 04 artigos, os quais foram classificados, pela mesma, com relação ao ano de publicação e país de origem do autor principal, o que segue apresentado de forma gráfica no item 3.

A partir da leitura dos documentos selecionados, realizou-se análise e consolidação das informações.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Visão Geral das Publicações Sobre o Tema

A análise do conteúdo dos artigos selecionados, a partir da pesquisa na plataforma *Scopus*, resultou na consolidação do que segue apresentado neste item. Importante mencionar que a pesquisa realizada em março de 2022 obteve o mesmo resultado daquela realizada em novembro do mesmo ano.

A primeira observação decorrente dos dados coletados foi a limitada quantidade de trabalhos encontrados na plataforma selecionada, durante o período 2002 até 2022, referente aos termos pesquisados, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Relação dos artigos publicados entre os anos de 2002-2022 (Plataforma *Scopus*).

Item	Tipo de Documento	Autores	Ano	Citações
1	Development and management of geomembrane liner hippos	Gassner, F.	2017	2
2	Analysis of geomembrane whale due to liquid flow through composite liners	Guo, W., Chu, J., Zhou, B., Sun, L.	2016	4
3	Avoiding geomembrane whales and hippos in surface impoundments	Koerner, B., Koerner, G.	2016	0
4	Analysis of Stresses and Strains in Geomembrane Gas Bubbles that occur in surface impoundments	Thiel, R.	2016	0

A análise longitudinal dos documentos permite identificar que 3 dos 4 documentos foram publicados em 2016 e apenas 1 foi em 2017. Estes documentos foram citados por outros 6 artigos publicados até o dia 26/11/22, como também pode ser verificado na tabela 1.

A análise dos documentos em função do país de origem dos autores está apresentada na Figura 2.

A avaliação do tipo de documento resultou no gráfico que segue apresentado na Figura 3, o qual classifica os documentos em artigos e publicações em congresso.

#### Documentos por país ou território

Comparação da quantidade de documentos pelos principais países

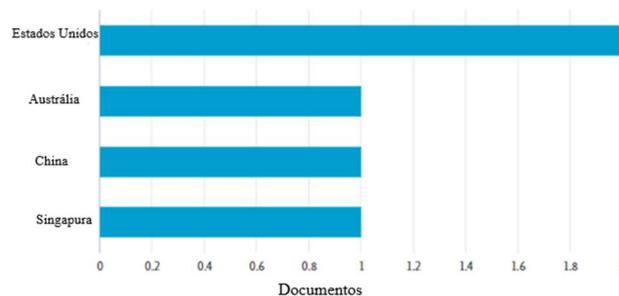


Figura 2. Gráfico de classificação dos documentos pela origem dos autores (Plataforma *Scopus*).

#### Documentos por tipo

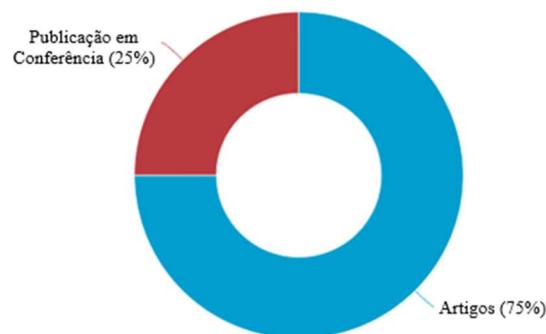


Figura 3. Gráfico de classificação dos tipos de documentos publicados (Plataforma *Scopus*).

Os autores responsáveis pelos registros sobre o tema foram incluídos no gráfico da Figura 4, que apresenta a quantidade de documentos publicados por cada autor.

#### Documentos por Autor

Comparação da contagem de documentos pelos principais autores

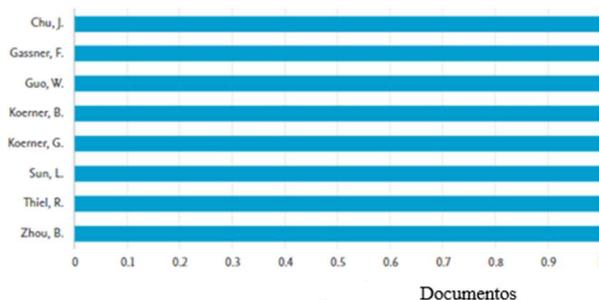


Figura 4 – Autores e quantidade de documentos publicados sobre o tema (Plataforma *Scopus*).

### 3.2 Informações Obtidas a Partir dos Documentos Analisados

#### 3.2.1 Formação da Bolha e seus Impactos

Guo et al. (2016) citam que o lixiviado de lagoas de contenção pode vazar através de furos na geomembrana, os quais são decorrentes de diversos fatores como: defeitos de fabricação do material, manipulação dos rolos, processo de estocagem do geossintético, implantação do sistema de drenagem, tráfego de veículos sobre a camada de proteção, dentre outros. A partir do vazamento do lixiviado pelo solo abaixo da geomembrana, o ar presente nos poros ou biogás decorrente da biodegradação por microrganismos irá migrar para regiões onde há rugas ou pontos mais altos da geomembrana. Esta condição inicial pode ser visualizada através da Figura 5.

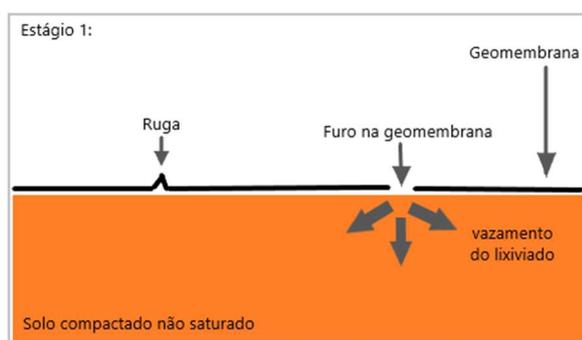


Figura 5 – Estágio inicial do processo de formação da bolha (adaptado de Guo et al., 2016).

Segundo os mesmos autores, quando a quantidade de gás abaixo da geomembrana possibilita que a pressão do gás supere a pressão hidráulica, a geomembrana se desprende do solo gerando uma bolha, como pode ser observado na Figura 6.

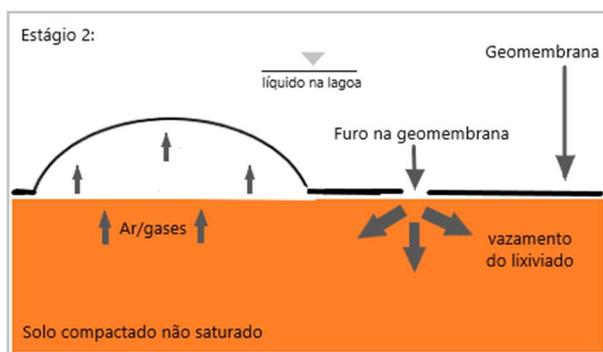


Figura 6 – Estágio um pouco mais avançado do processo de formação da bolha (adaptado de Guo et al., 2016).

De acordo com Guo et al. (2016), a formação da bolha irá aliviar a pressão de gás abaixo da geomembrana, alongando a mesma e tornando-a mais fina, aumentando o risco de falha e reduzindo a capacidade de estocagem do reservatório.

Thiel (2016) também citou alguns destes problemas como consequência da formação da bolha:

perda do volume efetivo de armazenamento dentro da lagoa, abertura de uma grande área acima do solo compactado para infiltração do lixiviado através do furo na geomembrana, aumento da suscetibilidade do geossintético a danos mecânicos causados pela exposição do mesmo próxima ou acima da superfície do líquido estocado e perda da capacidade de alongamento devido à tensão e deformação pela pressão do gás, até o ponto de ruptura da geomembrana.

Em seu estudo, Thiel (2016) apresentou uma solução analítica com a intenção de propor uma primeira aproximação quantitativa para a deformação, tensão e pressão em situação real da bolha formada na geomembrana. Segundo o autor, esta proposição parece estar alinhada com uma situação real já testemunhada.

### 3.2.2 Correlações Propostas Entre Fatores Chave, Para Uso Prático

O objetivo do estudo desenvolvido por Guo et al. (2016) foi propor uma solução analítica para avaliar a geometria e a resistência à tração ao longo da bolha. Além disso, foram desenvolvidos estudos paramétricos para identificar a influência de fatores chaves e desenvolver gráficos de previsão para uso prático.

Dentre os gráficos apresentados no artigo dos autores previamente citados, destacam-se três correlações apresentadas na sequência.

Correlação 1: Relação entre a altura da bolha e a do líquido externo à mesma, conforme a Figura 7.

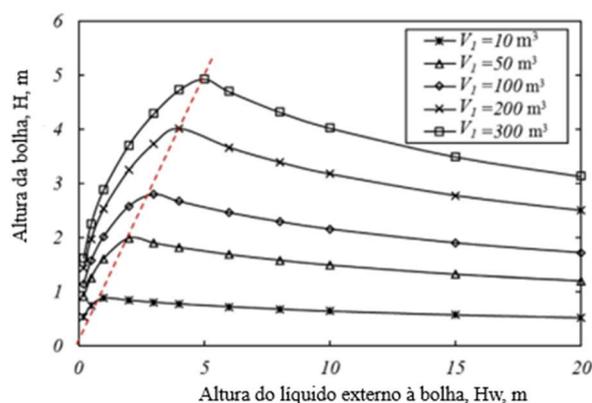


Figura 7: Variação da altura da bolha (H) em função da altura do líquido externo à mesma ( $H_w$ ), considerando diferentes volumes de líquido percolado  $V_l$  pelo furo da geomembrana (adaptado de Guo et al., 2016).

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 7, para cada volume de líquido percolado ( $V_l$ ) a curva

apresenta uma altura máxima (H) que a bolha pode atingir até ser submersa pelo volume externo. Antes de atingir sua altura máxima, a bolha vai aumentando de tamanho de forma não linear com a altura do líquido externo ( $H_w$ ). Após o pico, o líquido externo submerge e comprime a bolha, fazendo com que sua altura diminua com o aumento da altura do líquido.

A partir desta correlação apresentada, é possível observar, na Figura 7, que quanto maior o volume de líquido percolado (dentro da faixa avaliada), maior será a altura máxima atingida pela bolha. Além disso, pode-se supor que as bolhas devem estar presentes nas lagoas sem que estejam visíveis, nas situações em que o vazamento de lixiviado foi pequeno e a altura do líquido externo é significativa.

Esta informação vai ao encontro do que foi mencionado por Gassner (2017), que apresentou o resultado de sua experiência na investigação e remediação de seis casos em que houve formação de bolhas em reservatórios com geomembrana: as bolhas podem existir total ou parcialmente submersas nas lagoas. Em um dos casos apresentados por Gassner (2017) foi mencionado um reservatório em que o diâmetro da bolha acima da superfície era de aproximadamente 5 m e, após esvaziamento do líquido, o diâmetro real da bolha era de 35 m.

Correlação 2: Relação entre a largura da bolha e a altura do líquido externo à mesma, conforme a Figura 8.

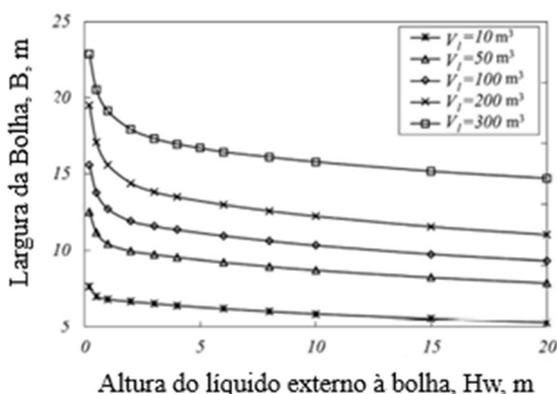


Figura 8: Variação da largura da bolha (B) em função da altura do líquido externo à mesma ( $H_w$ ), considerando diferentes volumes de líquido percolado ( $V_l$ ) pelo furo da geomembrana (adaptado de Guo et al., 2016).

Segundo seus autores, o gráfico apresentado na Figura 8 mostra uma redução da largura da bolha de forma não linear com o aumento da altura do líquido externo. Entretanto, podem ser identificados dois momentos: o primeiro quando a redução da largura é mais expressiva com o aumento do líquido, o que ocorre antes do ponto de submersão da bolha. Após este processo, que seria o segundo momento, a

redução da largura ocorre mais lentamente com o aumento do líquido externo.

Nota-se através desta Figura 8 que, para uma mesma altura de líquido externo, a elevação do volume de percolado ocasiona aumento representativo da largura da bolha. Tal fato possui um significado importante: a área de contato do lixiviado com o solo, que era inicialmente o ponto de furo da geomembrana, passa a ser toda a área da base da bolha formada.

### Correlação 3: Influência do Módulo Elástico.

Ainda segundo Guo et al. (2016), quanto maior for o produto entre módulo elástico e espessura da geomembrana, menor será o tamanho da bolha formada. Isto porque uma geomembrana mais rígida apresentará maior habilidade para confinar os gases abaixo da geomembrana, conferindo um tamanho menor à bolha.

### 3.2.3 Causas Possíveis da Formação da Bolha

Koerner & Koerner (2016) relataram em seu artigo outras causas possíveis para a formação das bolhas de gás, nas lagoas impermeabilizadas com geomembranas, além daquela estudada por Guo et al. (2016):

- Degradação da matéria orgânica existente embaixo da geomembrana;
- Volatilização de hidrocarbonetos em áreas contaminadas;
- Aumento do nível de água do lençol freático;
- Mudanças na pressão barométrica.

Segundo os mesmos autores, a solução para evitar a ocorrência deste fenômeno é a implantação de uma camada de material permeável abaixo da geomembrana, o qual possibilite a captura e condução lateral dos gases até os taludes e depois liberação dos mesmos para a atmosfera, através de um *vent* (respiro) instalado.

O artigo de Koerner & Koerner (2022) faz referência a duas outras publicações anteriores, sobre o tema:

- “Underdrain Design for Geomembrane Lined Surface Impoundments to Avoid Whales/Hippos from Occurring”- GSI White Paper #33, publicado em 09 de dezembro de 2015 pelo *Geosynthetic Institute*;
- “In situ Repairs of Geomembrane Bubbles, Whales and Hippos” – GSI Paper #30, publicado em

07 de julho de 2014 pelo mesmo *Geosynthetic Institute*.

Estas publicações apresentam recomendações sobre instalação dos drenos abaixo da geomembrana (Koerner et al., 2015) e orientações para reparo das *Whales* em campo (Koerner et al., 2014). São indicadas, pelos autores, alternativas para viabilizar a retirada dos gases de dentro da bolha e viabilizar a retomada das condições operacionais da lagoa.

De acordo com Thiel (2016), as recomendações mais comuns para evitar a formação das bolhas são a instalação de drenos subsuperficiais e/ou instalação de *vents* (respiros) no topo da geomembrana.

### 3.2.4 Estudos de Caso Apresentados

Gassner (2017) apresentou sua experiência em processos de investigação e remediação de seis casos reais de formação de bolha em reservatórios impermeabilizados com geomembrana. O autor apresenta informações sobre os projetos, possíveis causas, relata sobre períodos de observação da bolha e descreve o que foi identificado após o rebaixamento do nível do reservatório. As causas apontadas para a formação da bolha foram diversas, envolvendo não somente a elevação do nível do lençol freático e furos na geomembrana. Em nenhum dos casos relatados houve apresentação de resultados de análise de solo, água ou de caracterização da geomembrana danificada. As ações de remediação foram distintas em cada um dos cenários.

Podem ser citadas as seguintes medidas relacionadas à remediação dos casos apresentados: troca da geomembrana no local onde houve formação da bolha e o geossintético apresentou comprometimentos relacionados à sua estrutura (por exemplo, deformação); troca de geomembrana associada à recomposição do solo compactado abaixo da mesma; inspeção da geomembrana, por método dipolo, para localização de furos no reservatório e a correção dos mesmos, dentre outras (Gassner, 2017).

Ao final de cada caso o autor cita as lições aprendidas, das quais podem ser destacadas:

- a) Quando a deformação da geomembrana ocorre em decorrência de uma grande bolha é necessária a reposição do *liner* em função da extensão da deformação;
- b) O tamanho da bolha formada pode ser muito maior do que o que se pode ver na superfície do líquido estocado;
- c) Uma bolha grande pode ser formada a partir de um pequeno defeito na geomembrana, especialmente se esta estiver sobre solo compactado e com baixa permeabilidade, onde o líquido abaixo

da geomembrana ocasiona a flutuação do polietileno. A presença do gás ou do ar embaixo da geomembrana irá posteriormente aumentar a probabilidade de formação da bolha;

d) As bolhas no *liner* podem ser formadas sem ar preso embaixo da geomembrana, mas este tipo de bolha não tende a aparecer acima da superfície do líquido;

e) Um vazamento através da geomembrana pode levar muito tempo para formar a bolha. A formação da bolha é influenciada pelo formato geométrico da geomembrana e a existência de restrições na superfície da mesma. A presença de rugas pode iniciar a formação da bolha.

Por fim, Gassner (2017) apresenta algumas conclusões muito relevantes:

- A taxa de formação da bolha pode ser baixa ou alta e geralmente está relacionada à taxa de vazamento pela geomembrana;
- Algumas bolhas são formadas pela combinação de líquido (oriundo da lagoa) e ar ou gás e outras se formam apenas pela presença do líquido abaixo da geomembrana;
- A formação da bolha não é sempre decorrente de furo na geomembrana, mas pode estar relacionada à uma alta pressão abaixo de uma geomembrana intacta;
- Em geral as bolhas se formam em *liners* compostos por geomembrana e solo compactado de baixa permeabilidade, onde a taxa de dissipação do líquido e do ar é baixa. Por isso, a inclusão de drenos abaixo da geomembrana reduz a probabilidade de formação e o tamanho das bolhas.

## 4 CONCLUSÕES

A partir da análise da bibliografia disponível sobre o tema, da formação das bolhas em reservatórios de lixiviados com geomembranas, notou-se a importância do entendimento deste processo, suas causas e possíveis consequências para a operação da unidade e para o meio ambiente.

Ações relacionadas à instalação da geomembrana, controle de qualidade do material, minimização de rugas e adoção de um plano de garantia da qualidade da obra tornam-se importantes. Além disso, importante que seja avaliado, na fase de projeto, a possibilidade de adoção de dupla camada de geomembrana e sistema de drenagem entre as mesmas, logicamente com coleta para recirculação do lixiviado em caso de vazamentos pela primeira camada.

Importante que sejam estabelecidas rotinas de inspeção e manutenção das lagoas em operação, de modo a verificar a ocorrência de pequenas bolhas que ainda não tenham surgido acima do nível do líquido, para possível correção. A inspeção periódica da geomembrana do reservatório, através dos métodos geoelétricos, pode localizar furos e viabilizar seu reparo em menor tempo, minimizando a formação da bolha.

Entende-se que o tema pode ser objeto de estudos complementares, tendo em vista sua relevância e a quantidade restrita de documentos publicados em relação ao mesmo.

## REFERÊNCIAS

- ABNT (2020). NBR 16199: *Barreiras Geossintéticas – Instalação de Geomembranas Poliméricas*. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p. 88.
- Gassner F. (2017). *Development and management of geomembrane liner hippos*. Geotextile and Geomembrane. International Geosynthetic Society, v. 45, p.702-706.
- Giroud, J. P. (2016). *Leakage Control Using Geomembrane Liner*. Soils and Rocks, São Paulo, Brasil, v. 39, n. 3, p.213-235.
- Guo W, Chu J, Zhou B & Sun L. (2016). *Analysis of geomembrane whale due to liquid flow through composite liner*. Geotextile and Geomembrane. International Geosynthetic Society, v. 44, n.3, p.247-253.
- Koerner B. & Koerner G. *Avoiding geomembrane whales and hippos in surface impoundments*. Geosynthetics, <https://geosyntheticsmagazine.com/2016/04/25/avoiding-geomembrane-whales-and-hippos-in-surface-impoundments/>, acessado em 22/11/2022.
- Koerner, R.M., Koerner, J.M. & Koerner, G.R. (2015). *Underdrain design for geomembrane lined surface impoundment to avoid whale/hippos from occurring - White Paper #33*. Geosynthetic Institute, Folsom, Pensilvânia, EUA, p.1-9.
- Koerner, R.M., Koerner, J.M. & Koerner, G.R.(2014). *In-situ repairs of geomembrane bubbles, whales and hippos - White Paper #30*, Geosynthetic Institute, Folsom, Pensilvânia, EUA, p. 1-7.
- Marta, A. *Geomembrane Whales and a Case study*, <https://www.linkedin.com/pulse/geomembrane-gmb-whales-case-study-attila-marta/>, acessado em 22/11/22.
- Peggs, I. *A “Whales” of a problem – Concrete Construction*, [https://www.concreteconstruction.net/projects/infrastructure/a-whale-of-a-problem\\_o](https://www.concreteconstruction.net/projects/infrastructure/a-whale-of-a-problem_o), acessado em 22/11/2022.
- Peggs,I. *Preventing HDPE – Geomembrane Whales – A Primer*, <https://www.geosynthetica.com/preventing-hdpe-geomembrane-whales-a-primer/>, acessado em 22/11/22.
- SNIS *Painel de Indicadores: Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos*, <https://www.gov.br/mdr/ptbr/assuntos/saneamento/snis>, acessado em 22/11/22.
- Thiel, R. (2016). *Analysis of stresses and strains in geomembrane gas bubbles that occur in surface impoundments*. Geotechnical special publication, ASCE, Nova Iorque, EUA p.244-255.
- Zidan, P.M. & Frigo, L.P.A. (2016). *Soil Survey: metodologia inovadora, no Brasil, adotada pela CTR-Rio para controle da qualidade da instalação da geomembrana*. Revista Ares Ambiente & Resíduos, Grappa Editora e Abrelpe, v.6, p.56-63.