566 - VAZAMENTOS E FORMAÇÃO DE BOLHAS NA GEOMEMBRANA DE LAGOAS DE EFLUENTES: ESTUDOS DE CASOS

Priscila Mendes Zidan[(1)]
Engenheira Química (UERJ) , Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (COPPE-UFRJ) e Doutora em Engenharia Ambiental (DEAMB/UERJ). Professora do Curso de Especialização em Engenharia Sanitária e Ambiental (CESA/UERJ).
Arthur Fernandes Gonçalves[(2)]
Engenheiro Ambiental e Sanitarista (UERJ) e Mestre em Engenharia Ambiental (PEAMB/UERJ). Doutorando em Engenharia Ambiental (DEAMB/UERJ).
Elisabeth Ritter[(3)]
Engenheira Civil, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestre em Engenharia Civil (Geotecnia), pela PUC-Rio. Doutora em Engenharia Civil (Geotecnia Ambiental), pela COPPE/ UFRJ. Professora Titular da UERJ.

Endereço[(1)]**:** Rua São Francisco Xavier, 524 Maracanã – Rio de Janeiro – Rio de Janeiro - 20550-900 - Brasil - Tel: +55 (21) 99852-8352 – e-mail: priscilazidan@gmail.com

RESUMO

As lagoas com geomembrana de PEAD são essenciais no armazenamento e tratamento de efluentes. O sistema de barreiras destes reservatórios, tem a função de impedir o vazamento do efluente para o solo e água subterrânea. Entretanto, falhas na instalação e/ou operação da lagoa podem ocasionar furos na geomembrana. O contato do efluente com o solo pode ocasionar geração de biogás e a consequente formação de bolhas na lagoa. O presente estudo avaliou duas lagoas com geomembrana em que foi verificada a presença de bolhas: uma com lixiviado de aterro encerrado, com seis bolhas visíveis, e a outra com esgoto sanitário e diversas bolhas identificadas. Avaliou-se o histórico de construção dos reservatórios e de formação das bolhas. Além disso, utilizou-se o método dipolo para inspecionar e integridade da geomembrana das duas lagoas. Os resultados indicaram 8 vazamento na lagoa de lixiviado, sendo sete deles na base e apenas um em talude. No reservatório de esgoto sanitário foram identificados 28 pontos de vazamento, todos na base da lagoa e 79% deles na região das soldas das chicanas, implantadas em 2024. A densidade de vazamentos na lagoa de esgoto sanitário, que teve surgimento das bolhas após 30-40 dias do início da operação, foi de 26 /10.000 m^2, quase o dobro da densidade média obtida em inspeções similares publicadas na literatura e mais do que cinco vezes o valor da lagoa de lixiviado (5 vazamentos/10.000 m^2), a qual demorou 2 anos para apresentar bolhas. O estudo concluiu que a formação das bolhas nas duas lagoas está associada à ocorrência dos vazamentos nas mesmas. O impacto direto da ocorrência das bolhas foi o aumento da área de vazamento do lixiviado em relação ao tamanho do furo inicial. É recomendado que a realização de inspeções, adotando o método dipolo, nas lagoas em comissionamento e em operação, seja prevista pelos órgãos ambientais no processo de licenciamento, permitindo que reparos sejam realizados nos furos identificados, minimizando a ocorrência de bolhas.

PALAVRAS-CHAVE: bolhas; geomembrana; vazamento; lagoa de maturação; lagoa de lixiviado.

INTRODUÇÃO

O uso de geomembranas polietileno de alta densidade (PEAD) com a função de barreira em reservatórios de armazenamento e tratamento de efluentes é crescente no Brasil, principalmente com relação ao lixiviado de aterros sanitários e ao esgoto sanitário. Essa medida vem sendo exigida pelos órgãos ambientais para minimização do transporte de contaminantes no solo e águas subterrâneas. Entretanto, a adoção da geomembrana não garante a estanqueidade dos reservatórios, já que danos ocorrem durante a instalação desse material (MC DANIEL et al., 2019).

Segundo GIROUD (2016), os resultados da aplicação dos métodos geoelétricos em 150 projetos (2.500.000 m^2 de geomembrana instalada) em que procedimentos de controle de qualidade foram empregados, evidenciaram de 5 a 6 furos/10.000 m^2 do geossintético. Quando tais procedimentos não foram empregados, o número de furos chegou a mais de 25/10.000 m^2. ZIDAN et al, 2023 avaliaram 195 reservatórios de efluentes com geomembranas nos Estados Unidos, Canadá e México entre 2015 e 2021 e encontraram uma média de 14 vazamentos/10.000 m^2. Os resultados dos projetos variaram entre 0 e 689 vazamentos/10.000 m^2 e 151 dos 195 projetos apresentaram ao menos um vazamento.

GIROUD (2016) sugere a adoção de um Plano de Garantia da Qualidade da Construção para obras com geomembrana, propondo a realização de testes não destrutivos para avaliar a integridade das soldas, inspeções visuais na GM e a adoção dos métodos geoelétricos de maneira complementar, principalmente para os projetos em que a mão de obra empregada na construção não possuir padrão de excelência.

Diversos autores têm relatado que na prática é muito difícil garantir que não existam furos na GM após sua instalação (PEGGS, 2009; ROWE, 2012; GIROUD, 2016). Neste sentido, THIEL; GIROUD (2011) ressaltaram a importância de os projetos de engenharia considerarem a possibilidade de vazamento e estabelecerem medidas de monitoramento e controle da integridade do sistema de barreiras visando mitigar o risco. 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. No Brasil, os projetos de reservatórios de lixiviado e de esgoto sanitário não contemplam sistemas para monitoramento e controle da integridade da geomembrana.

A norma NBR 16.199 (ABNT, 2020) estabelece procedimentos de transporte, manuseio, estocagem, armazenamento e instalação de geomembranas. Estão definidas também recomendações para controle de qualidade da obra e o uso dos métodos geoelétricos para verificação da estanqueidade global da mesma. As recomendações propostas, porém, não são adotadas em muitos projetos por desconhecimento dos instaladores e responsáveis pelos empreendimentos.

Alguns autores têm relatado um problema operacional muito frequente nos reservatórios com geomembranas (PEGGS, 2022; KOERNER et al., 2015; KOERNER et al., 2014; GASSNER, 2017; THIEL, 2016; ZIDAN e RITTER, 2023; ZIDAN, 2024). Trata-se do descolamento deste geossintético de seu contato com o solo, formando bolhas de gás que emergem sobre o líquido armazenado (GUO et al., 2016). 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 que vazou do reservatório, preenchendo os vazios do solo.

Quando a causa da formação das bolhas é um vazamento em lagoas de efluentes, o líquido que atravessa o orifício do geossintético propicia a geração do biogás que será o responsável pela pressão gerada abaixo da geomembrana. O aumento da pressão ocasiona o descolamento entre a geomembrana e o solo, ocasionando elevação da taxa de vazamento para o solo abaixo do reservatório (THIEL, 2016). Além disso, a presença de rugas na geomembrana propicia o espalhamento do efluente por uma área muito maior do que a do furo original da geomembrana, conforme considerado por ROWE, 1998 e ROWE et al, 2004.

Neste sentido, a relevância deste estudo está associada ao crescente uso da geomembrana em reservatórios de efluentes, à significativa ocorrência de furos que vem sendo mencionada na literatura, à ausência de dados estatísticos de furos em reservatórios brasileiros e a inexistência de registros de ocorrência de bolhas em lagoas de efluentes no país. Desta forma, o registro e a análise de casos reais de formação das bolhas podem auxiliar na compreensão do fenômeno, na conscientização com relação aos riscos ambientais e quanto às medidas necessárias para mitigá-los.

OBJETIVOS

Investigar dois casos de lagoas de efluentes com presença de bolhas na geomembrana para verificar a ocorrência de vazamentos e avaliar se podem estar associados às causas da formação das bolhas.

METODOLOGIA UTILIZADA

O presente estudo avaliou dois reservatórios com geomembrana de PEAD: uma lagoa de lixiviado de um aterro encerrado e uma lagoa de maturação (esgoto sanitário), ambos localizados em cidades da região sudeste do Brasil, conforme apresentado a seguir.

1. Lagoas estudadas

1.1 Lagoa de lixiviado

A lagoa de lixiviado foi implantada em uma área onde já havia a presença de resíduos abaixo do seu sistema de barreiras. O reservatório estudado apresenta uma geometria irregular e assimétrica, com dimensões longitudinal e transversal de 150 x 144 m e capacidade total informada de 24.000 m3. O perfil construtivo incluiu as seguintes camadas, de baixo para cima: resíduos sólidos, 0,70 m de solo compactado e geomembrana lisa de PEAD de 1,5 mm, uma camada de geotêxtil e depois pedregulho.

1.2 Lagoa de maturação

Este reservatório possui cerca de 12.380 m3 de capacidade e dimensões externas de 60 x 180 m. É parte integrante do sistema de tratamento de esgoto de cidade com cerca de 2.700 habitantes. Além disso, possui sistema de barreiras composto por uma geomembrana de PEAD de 1 mm, instalada sobre solo compactado e um sistema de drenagem de base abaixo do solo. A geomembrana que fica em contato com o efluente é denominada primária.

2. Levantamento do histórico de formação das bolhas

Com o objetivo de caracterizar as duas lagoas do escopo deste estudo, foram feitas consultas aos responsáveis pela operação dos reservatórios. Utilizou-se o aplicativo Google Earth Pro para levantamento do histórico de construção e operação dos reservatórios, bem como o de formação das bolhas. O histórico de imagens está apresentado no item de resultados.

3. Inspeção da integridade da geomembrana

As inspeções realizadas empregaram o método dipolo, definido pela norma ASTM D7007 (ASTM, 2024) e referenciado na NBR 16.199 2020 (ABNT, 2020) para avaliação da estanqueidade global das obras que empregam geomembrana como barreira. Este método permite a identificação de vazamentos na geomembrana, em inspeções que abrangem a totalidade da área avaliada e pode ser realizado em reservatórios cheios de efluente.

O método dipolo, que é um método geoelétrico, baseia-se na aplicação de uma tensão elétrica no líquido presente na lagoa impermeabilizada. Esta tensão produz um campo elétrico sem anomalias quando não há furos presentes. Se a geomembrana tiver um furo, a corrente que flui através deste produzirá uma anomalia no campo elétrico medida no local. Assim, os vazamentos podem ser detectados e localizados. Essas anomalias são detectadas através de medições sistemáticas na área da geomembrana que está imersa no líquido. A Figura 1 ilustra a aplicação deste método em um reservatório com líquido.

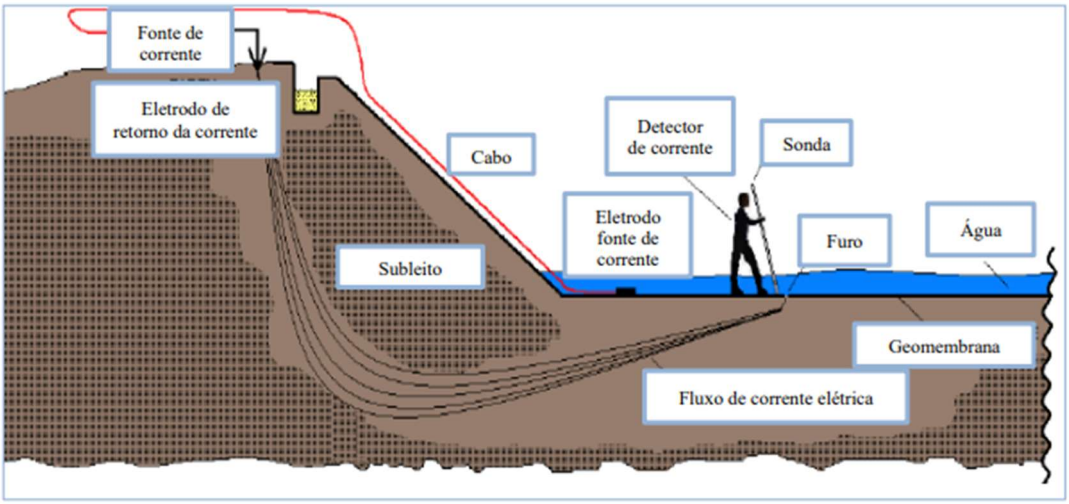

Figura 1: Representação da aplicação do método dipolo em reservatório com líquido (Fonte: adaptado de LLSI, 2016).

A preparação das lagoas para a realização das inspeções, iniciou-se com a realização de marcações, com tinta branca, nas bordas dos reservatórios, indicando os pontos onde deveriam ser realizadas as leituras. Estes locais possuíam espaçamento de 1 m entre si, o que permitiu a varredura de toda a área da geomembrana coberta com líquido. As medições nos reservatórios foram realizadas com o nível do líquido em uma altura de 0,70 m acima da base e nestas situações o operador utilizou uma sonda em formato de haste e caminhou dentro da lagoa (inspeção em nível raso). Também foram realizadas medições em que o nível de líquido no reservatório estava acima de 0,70 m e nestas situações dois operadores promoveram 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 2.

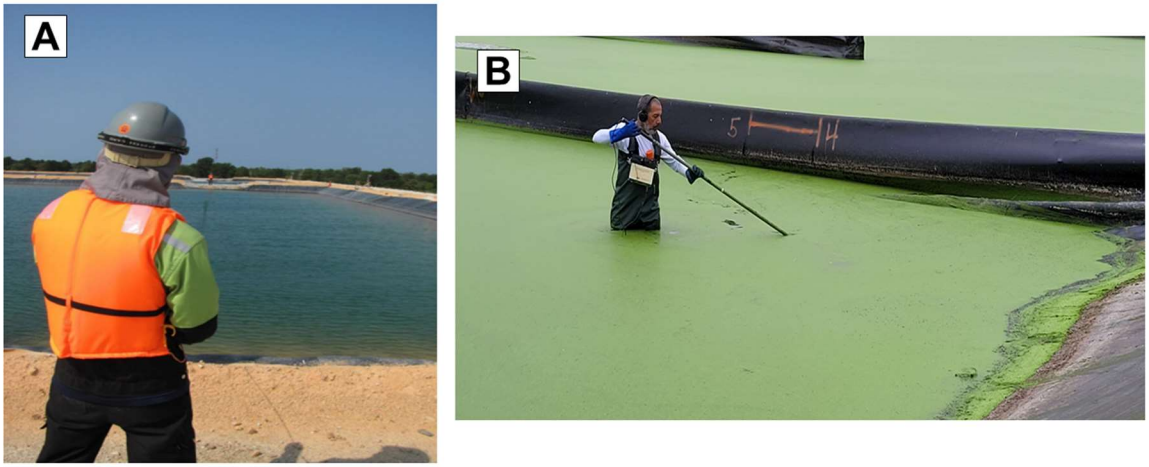

Figura 2: Imagens ilustrativas da inspeção da geomembrana: (a) nível alto de líquido (operadores fora da lagoa) e (b) nível baixo de líquido (operador dentro da lagoa) (Fonte: LLSI e Evolui, 2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Histórico de construção das lagoas e de formação de bolhas

   1.1 Lagoa de lixiviado

A Figura 3 apresenta um conjunto de imagens da lagoa de lixiviado que foram avaliadas para melhor compreensão sobre o histórico de construção da lagoa e de formação das bolhas. Em abril/2011 a lagoa de lixiviado já havia sido impermeabilizada com geomembrana, recebido a cobertura com geotêxtil e pedregulhos. As imagens de julho do mesmo ano evidenciam o início do estágio operacional do reservatório que já se apresentava coberto com lixiviado à época. Em maio/2013, já é possível identificar o surgimento das bolhas acima do nível do líquido (Figura 3 (d)). Estas bolhas se mantêm na posição em todas as imagens captadas em datas posteriores, inclusive na imagem de

maio/2023, mês que marca os 10 anos do surgimento das bolhas nesta lagoa.

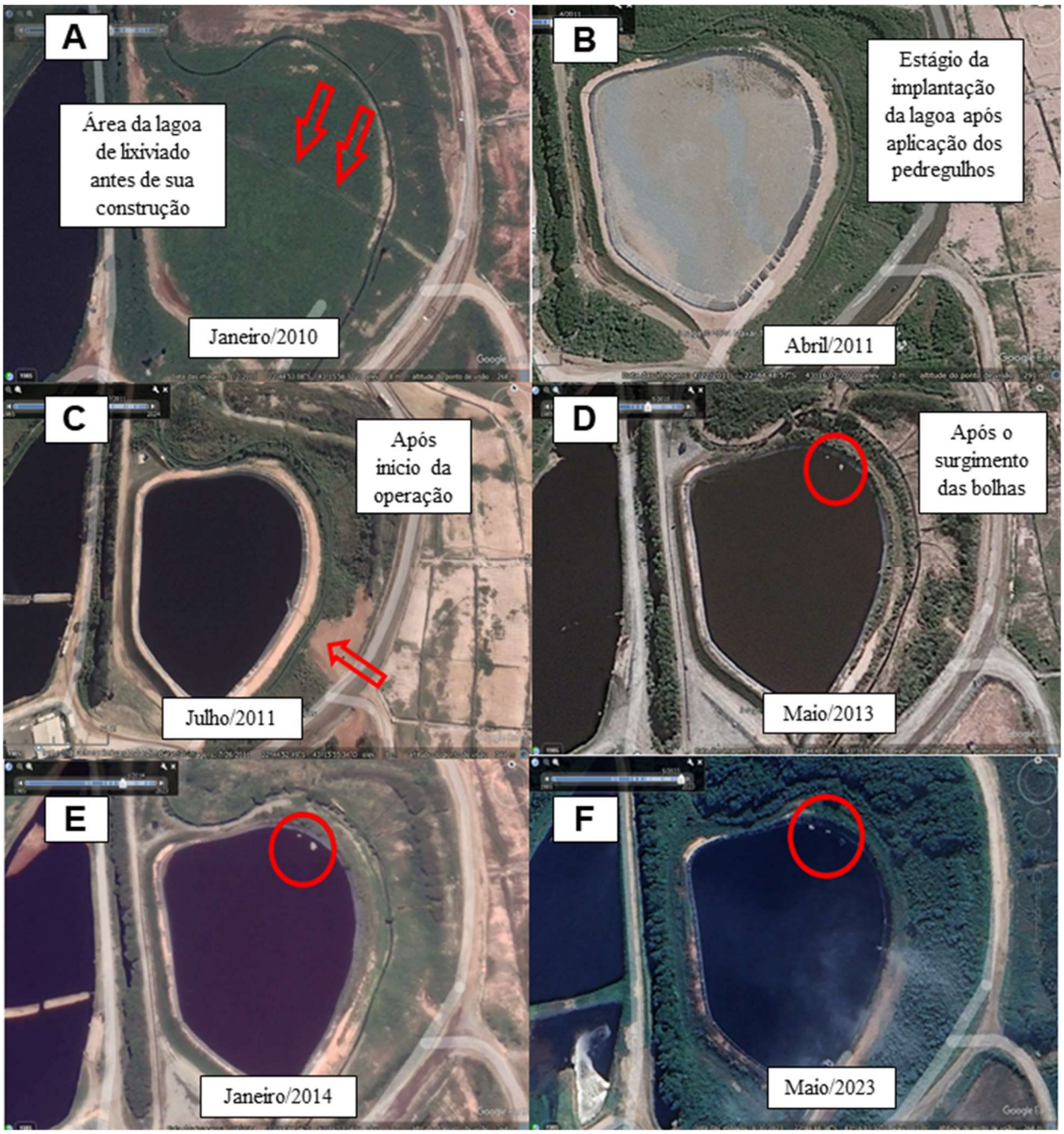

Figura 3: Imagem aérea da lagoa de lixiviado estudada (Fonte: adaptado do Google Earth, 2025).

No mês de setembro/2023 realizou-se um cadastramento das bolhas da lagoa de lixiviado. Foram identificadas seis bolhas estando a lagoa com o nível de lixiviado em sua condição operacional, como pode ser observado na Figura 4.

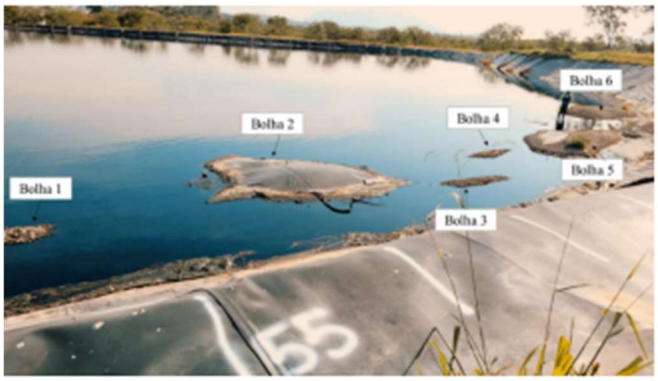

Figura 4: Imagem da lagoa de lixiviado em setembro/2023, evidenciando a presença de seis bolhas na geomembrana. (Fonte: os autores, 2024).

1.2 Lagoa de maturação

A Figura 5 apresenta um conjunto de imagens da lagoa de maturação que foram analisadas para levantamento do histórico de sua construção e da formação das bolhas. Em maio/2015 a lagoa em estudo encontrava-se em fase de implantação e o início da sua operação ocorreu em até um ano depois (maio/2016). Entre esta última data e outubro/2018 a lagoa permaneceu em operação. Após este período, a próxima imagem disponível é de junho/2019 em que o reservatório já se encontra vazio e continua assim até outubro/2023. Não foram disponibilizadas imagens mais atualizadas desta lagoa até janeiro/2025.

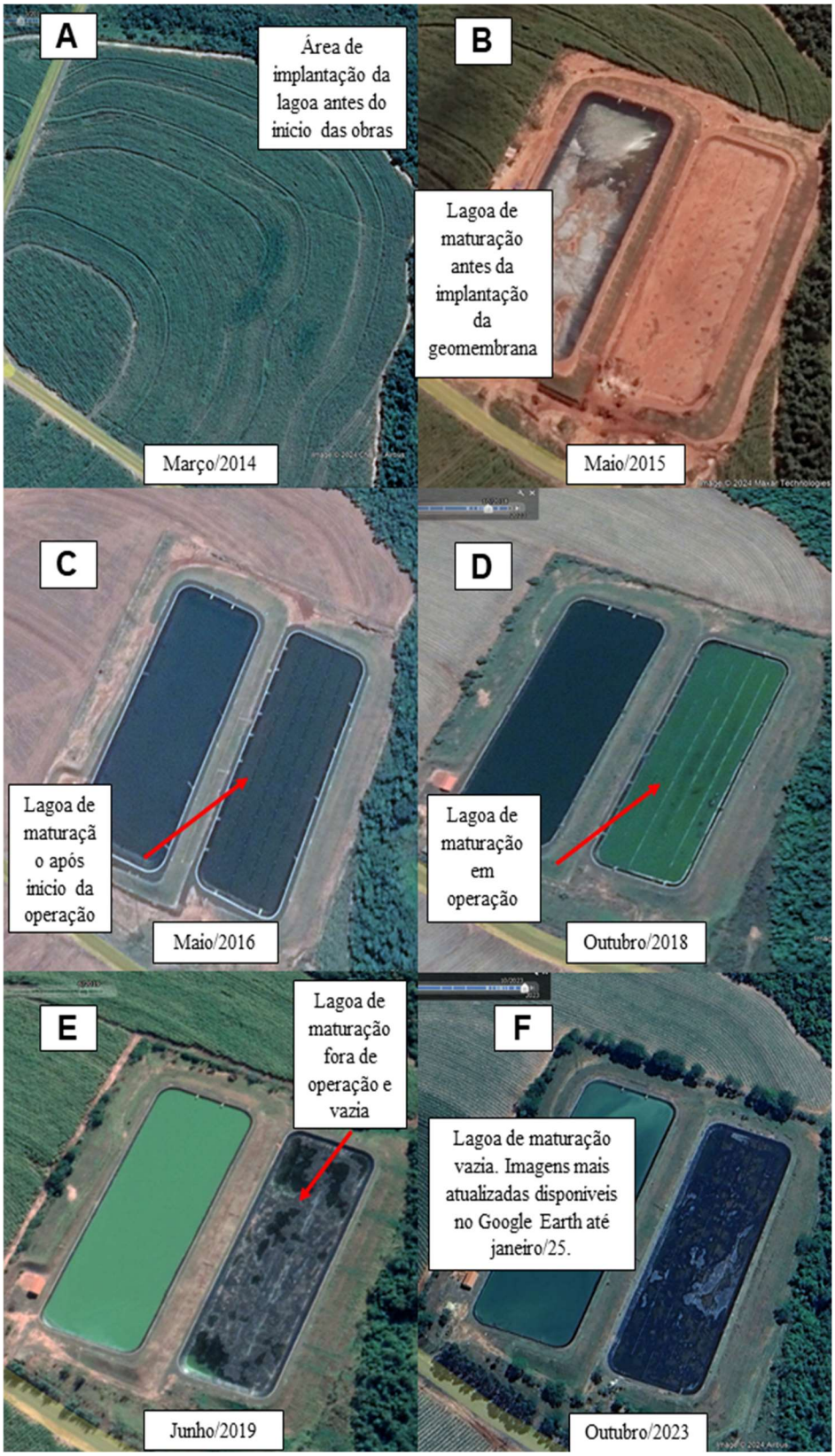

Figura 5: Imagem aérea da lagoa de maturação estudada. (Fonte: adaptado do Google Earth, 2025).

Segundo foi levantado junto à equipe responsável pela gestão da lagoa, após implantação de um sistema de chicanas no interior da mesma, obra realizada no início do ano de 2024, o reservatório retornou à operação em maio e, após cerca de 30 dias de sua partida, surgiram inúmeras bolhas na geomembrana, como pode ser observado na Figura 6.

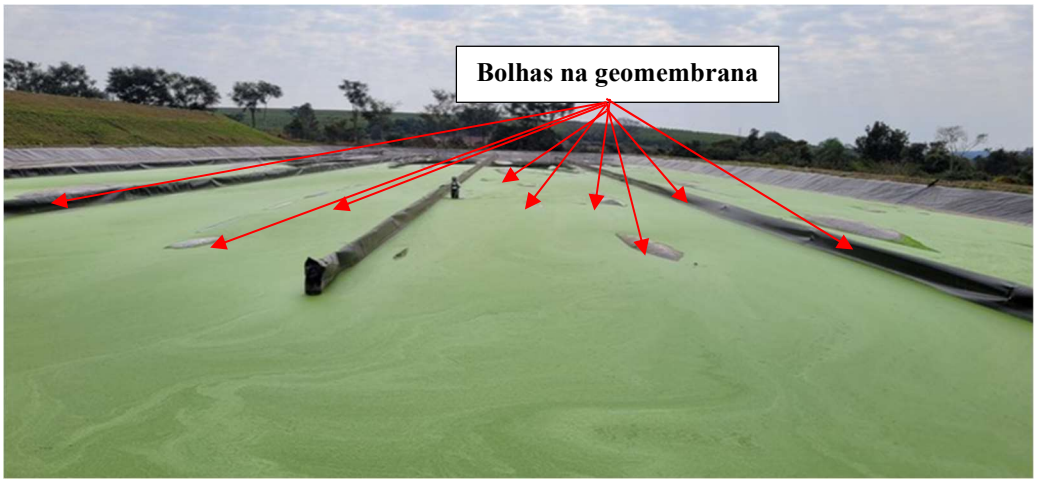

Figura 6: Fotografia da lagoa de maturação em julho/2024 (durante a realização da inspeção) evidenciando a presença de diversas bolhas na geomembrana. (Fonte: os autores, 2024).

A avaliação comparativa entre os dois reservatórios avaliados permite evidenciar que o tempo decorrido entre o início da operação e o surgimento das bolhas foi muito menor na lagoa de maturação (30- 40 dias) do que na de lixiviado (2 anos). Além disso, a quantidade de bolhas que surgira na lagoa de maturação foi sensivelmente maior do que na lagoa de lixiviado.

2. Resultados da inspeção da integridade da geomembrana

2.1 Lagoa de lixiviado

O resultado da inspeção indicou a presença de 8 (oito) sinais de vazamentos, conforme representado na Figura 7. Sete sinais foram identificados na base da lagoa, todos eles na região do entorno das bolhas identificadas. Apenas um sinal de vazamento foi identificado no talude da lagoa e fora dessa última região.

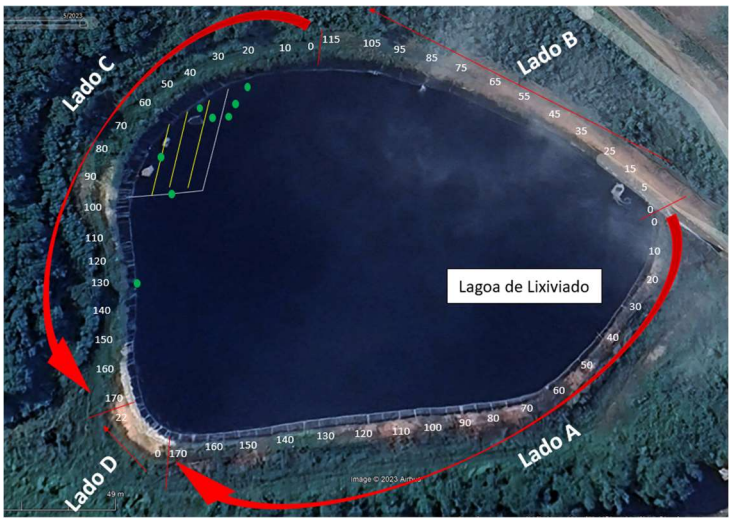

Figura 7: Imagem aérea da lagoa de lixiviado com a indicação dos pontos onde foram registrados sinais de vazamentos na geomembrana (pontos verdes) (Fonte: adaptado do Google Earth, 2023).

2.2 Lagoa de maturação.

Os resultados da inspeção pelo método dipolo indicaram 28 sinais de vazamento na geomembrana primária, divididos entre as seções A e B, conforme representado na Figura 8. Esta imagem apresenta o posicionamento indicativo dos pontos de vazamento identificados. De acordo com o que foi notado, apenas 6 dos 28 pontos identificados não estavam na região das soldas das chicanas. Todos os sinais de vazamento identificados estavam na base da lagoa, não tendo sido registrados vazamentos nos taludes.

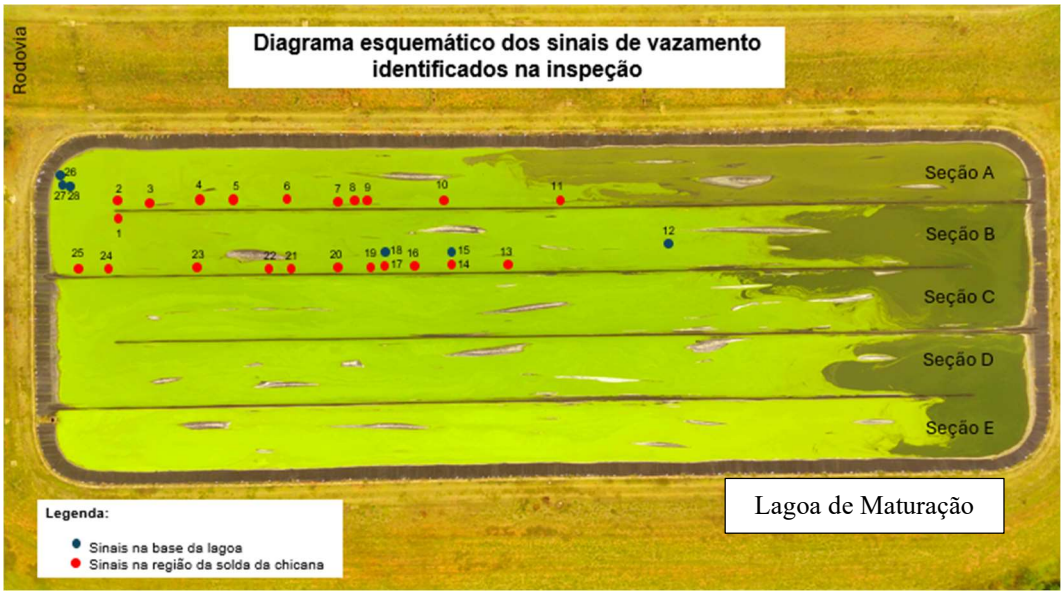

Figura 8: Imagem aérea da lagoa de maturação com a identificação dos pontos onde foram registrados sinais de vazamentos na geomembrana. (Fonte: os autores, 2024).

Considerando que na lagoa de maturação foram identificados 28 sinais de vazamento em uma área de cerca de 10.800 m^2 de geomembrana, este reservatório apresentou de 26 vazamentos/10.000 m^2. Na lagoa de lixiviado foram identificados 8 sinais de vazamento em cerca de 16.000 m^2 de área de geomembrana, o que resulta em 5 vazamentos/10.000 m^2. A comparação entre o número de sinais de vazamentos/área nas duas lagoas mostrou que a lagoa de maturação apresentou mais do que cinco vezes a quantidade de vazamentos da lagoa de lixiviado.

A comparação destes resultados com os obtidos por ZIDAN et al., (2024) mostrou que a lagoa de maturação apresentou quase o dobro da densidade de vazamentos média obtida nos 195 projetos inspecionados nos Estados Unidos, México e Canada entre 2015 e 2021. A lagoa de lixiviado, entretanto, apresentou densidade de vazamentos inferior à média e equivalentes a 63,5% dos projetos avaliados, os quais incluem-se na categoria de 0 a 5 vazamentos/10.000 m².

3. Análise das causas da formação das bolhas a partir dos resultados obtidos no estudo

Dentre as causas já descritas na literatura para formação de bolhas em reservatórios impermeabilizados com GM (GUO et al., 2016; ZIDAN e RITTER, 2023; GASSNER, 2017; KOERNER; KOERNER, 2016) estão incluídas: 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 e furos na geomembrana.

Considerando-se que na lagoa de maturação não havia matéria orgânica na área dada implantação da lagoa sugere-se que a presença dos furos seja a causa da formação das bolhas. No caso da lagoa de lixiviado, que foi construída em cima de um maciço de resíduos, poderiam-se cogitar duas hipóteses para a causa da formação das bolhas: a presença de matéria orgânica abaixo da geomembrana e/ou a presença dos furos. Como as bolhas desta lagoa, ao longo de seus 10 anos de existência, surgiram apenas na região do entorno dos furos identificados na base da lagoa, sugere-se que a causa provável para a formação das bolhas seria também a presença dos furos na geomembrana.

Neste sentido, os furos identificados na geomembrana das duas lagoas teriam, então, possibilitado o vazamento do efluente 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 efluente e o aumento da área de contato deste líquido com o solo.

Tendo em vista que as bolhas da lagoa de maturação, que apresentou a maior quantidade de vazamentos (26/10.000 m^2), surgiram em cerca de 30-40 dias após o início da operação do reservatório e que na lagoa de lixiviado (5 vazamentos/10.000 m^2) isso ocorreu após cerca de 2 anos, sugere-se que possa haver uma relação entre a quantidade de vazamentos e o tempo decorrido entre a ocorrência destes e o surgimento das bolhas. Esta relação foi já mencionada por ROWE (2012): a taxa de vazamento através da geomembrana é função do número e tamanho dos furos, permeabilidade da camada de solo abaixo da geomembrana, altura do líquido na lagoa,

interface entre a geomembrana e o solo, rugas e propriedades do efluente estocado.

É possível também que a diferença das propriedades dos efluentes estocados, como mencionado por ROWE (2012) possa ter influenciado a velocidade de formação das bolhas. Sabe-se que lixiviados provenientes de aterros com mais de 10 anos de operação, condição que se aplica ao caso estudado, tendem a apresentar relações DBO/DQO em torno de 0,1 ou menos (CORSINO et al., 2020). Por outro lado, estudo recente relatou que a relação média DBO/DQO em afluente de lagoa de maturação, posterior às lagoas anaeróbia e facultativa, foi da ordem de 0,4 (CAMELO et al., 2024). Estes dados sugerem uma maior disponibilidade de matéria orgânica biodegradável na lagoa de maturação quando comparada a de lixiviado, o que favoreceria à formação de biogás na primeira lagoa em relação à segunda e, por consequência menor tempo para formação das bolhas.

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

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados deste estudo indicam que a causa da formação das bolhas nas duas lagoas avaliadas foi a existência de vazamentos na geomembrana dos reservatórios.

A inspeção da geomembrana da lagoa de maturação indicou que este reservatório possui 5 vezes mais vazamentos/área do que a lagoa de lixiviado avaliada. Além disso, a mesma lagoa apresentou uma quantidade de bolhas maior e o surgimento das mesmas ocorreu em um prazo muito menor do que o da lagoa de lixiviado. Este fato parece indicar que a lagoa com maior quantidade de vazamentos/área possivelmente tinha a maior taxa de vazamento de efluentes para as camadas inferiores e gerou, em consequência, uma maior quantidade de biogás, acelerando a formação das bolhas. É provável que a maior disponibilidade de matéria orgânica biodegradável no esgoto sanitário da lagoa de maturação tenha contribuído para o menos tempo de formação da bolha quando comparado à lagoa de lixiviado.

Apesar da lagoa de lixiviado ter apresentado menor quantidade de vazamentos e menos bolhas, o vazamento do efluente para as camadas inferiores de solo se deu por cerca de dez anos.

Considerando as consequências operacionais e os impactos ambientais decorrentes da formação das bolhas nos reservatórios de efluentes é fundamental que sejam implementadas medidas para minimizar sua ocorrência. No caso da lagoa de lixiviado, estudos em andamento já evidenciaram a contaminação do solo abaixo da geomembrana.

Neste sentido é fundamental que a realização das inspeções nos reservatórios em comissionamento e em operação, adotando o método dipolo como recomendado pela NBR 16.199 (ABNT, 2020), 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, minimizando a ocorrência de bolhas.

Por fim, dada a subnotificação de casos de bolhas em reservatórios de efluentes 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, 2024.

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

CAMELO, L.; BRITO, D. O.; ALMEIDA, M. C. Performance evaluation of wastewater treatment plants in Southern Brazil. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 29, p. e20230060, 2024.

CORSINO, S. F., et al. Assessment of landfill leachate biodegradability and treatability by means of allochthonous and autochthonous biomasses. *New Biotechnology*, v. 55, p. 91-97, 2020.

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

GIROUD, J.P. Leakage control using geomembrane liner. *Soils and Rocks*, São Paulo, Brasil, v. 39, n. 3, p.213-235, 2016.

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.

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.; 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. 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.

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.

PEGGS, I. Geomembrane liner Action Leakage Rates: What is practical and what is not? *Land and Water Magazine*, pp. 48-50, 2009.

PEGGS, I. Preventing HDPE – geomembrane whales – A Primer. Disponível em: https://www.geosynthetica.com/preventing-hdpe-geomembrane-whales-a-primer/. Acessado em 22 nov. 2022.

ROWE, R. K. Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste. In: 6th International Conference Geosynthetics, 27-103, 1998.

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. Short-and long-term leakage through composite liners. The 7th Arthur Casagrande Lecture. *Canadian Geotechnical Journal*, 49, (2), 141–169, 2012.

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.; GIROUD, J. P. Important considerations for leakage control of exposed geomembrane-lined ponds. In: Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium. Proceeding. Sardinia, 2011.

ZIDAN, P.M. Formação de bolhas na geomembrana de lagoas de lixiviado de aterros sanitários, tese (doutorado), Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 219p., 2024.

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.

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.