

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 conseqüente 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 conseqüente 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 PEAD 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 bastante consolidado na indústria da gestão de resíduos e de tratamento deste efluente, sendo apresentada como uma solução ambientalmente adequada 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 m² de área de geomembrana instalada, apontaram para uma densidade de 5 a 6 furos/10.000 m² 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 m².

No Brasil, o monitoramento da integridade da geomembrana, após sua instalação ou uso prolongado das lagoas de lixiviado, não é uma prática adotada. 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.

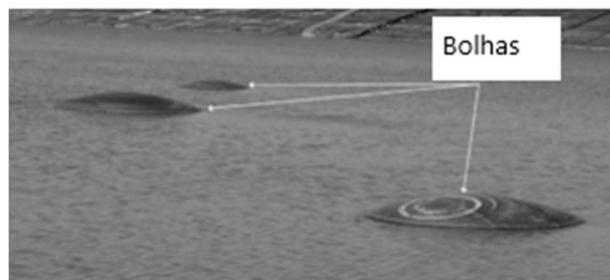


Figura 1. Imagem de uma Lagoa de geomembrana com três bolhas aparentes (*whales*), acima do nível do líquido (adaptado de Marta, 2022).

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 ao tema.

O levantamento dos documentos foi realizado mediante uma consulta à plataforma *Scopus*, utilizando-se os seguintes 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 deste trabalho.

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*).

Título do 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 liner	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

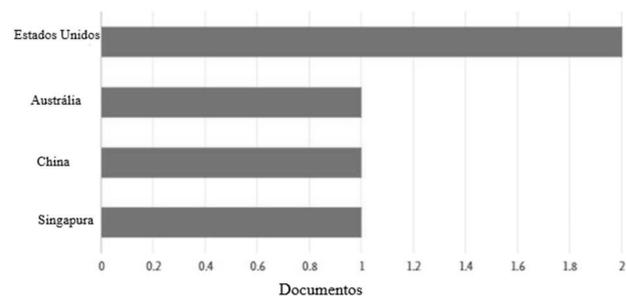


Figura 2. Gráfico de classificação dos documentos pela origem dos autores (Plataforma *Scopus*).

Documentos por tipo

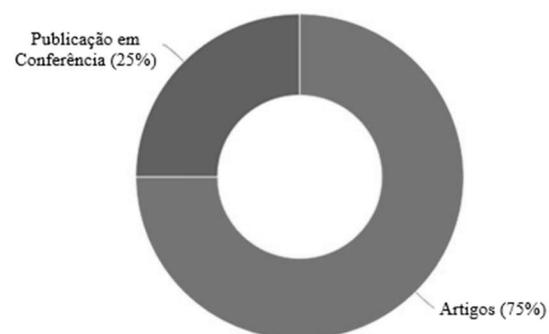


Figura 3. Gráfico de classificação dos tipos de documentos publicados (Plataforma *Scopus*).

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

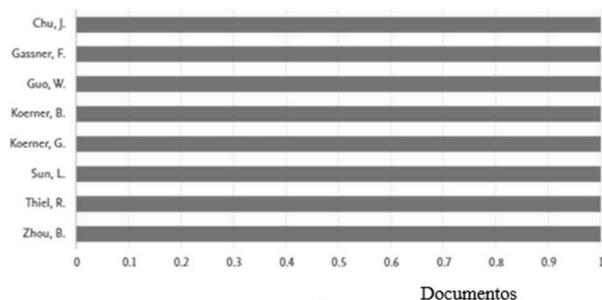


Figura 4 – Autores e quantidade de documentos publicados sobre o tema (Plataforma *Scopus*).

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.

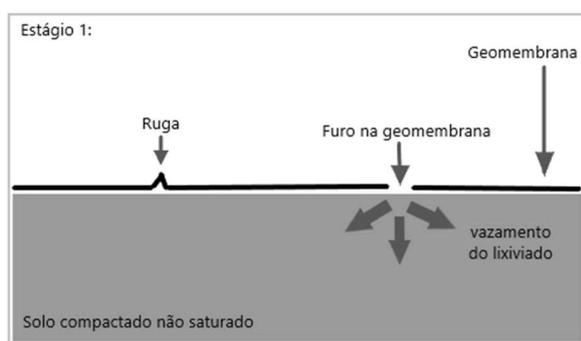


Figura 5 – Estágio inicial do processo de formação da bolha (adaptado de Guo et al, 2016).

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.

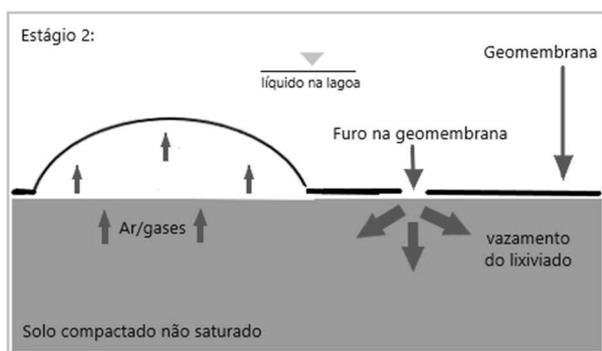


Figura 6 – Estágio um pouco mais avançado do processo de formação da bolha (adaptado de Guo et al, 2016).

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 à 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 causados 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 chave e desenvolver gráficos de previsão para uso prático.

Dentre os gráficos apresentados no artigo, 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.

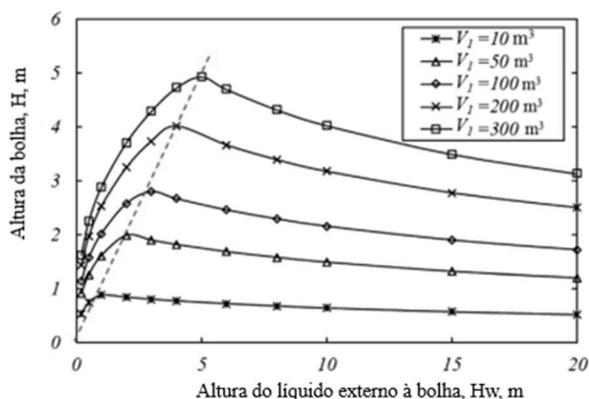


Figura 7: Variação da altura da bolha (H) em função da altura do líquido externo à mesma (Hw), considerando diferentes volumes de líquido percolado V_1 pelo furo da geomembrana (adaptado de Guo et al, 2016).

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 7, para cada volume de líquido percolado (V_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.

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 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 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.

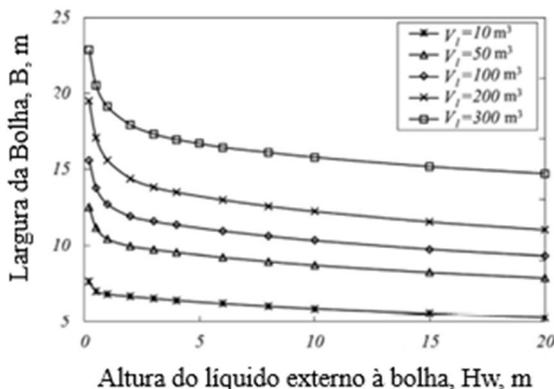


Figura 8: Variação da largura da bolha (B) em função da altura do líquido externo à mesma (H_w), considerando diferentes volumes de líquido percolado (V_1) pelo furo da geomembrana (adaptado de Guo et al, 2016).

Segundo os 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), são elas:

- 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 mesmo para a atmosfera, através de um vent 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 form Occurring”- GSI White Paper #33, publicado em 09 de dezembro de 2015 pelo *Geosynthetic Institute*;

2. “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* 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 (Grassner, 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 reduzem 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 geoeletricos, 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, 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.