

## Estimativa de Emissões através de Fissuras em Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários

Riadny Patrícia de Souza Ferreira

Engenheira Geotécnica/Doutoranda em Geotecnia, TPF Engenharia/UFPE, Recife, Brasil, riadny.ferreira@ufpe.br

José Fernando Thomé Jucá

Docente, UFPE, Recife, Brasil, jucah@ufpe.br

Fernando Antônio Medeiros Marinho

Docente, USP, São Paulo, Brasil, fmarinho@usp.br

Luana Raquel Juvino da Silva

Engenheira Geotécnica, TPF Engenharia, Pindoretama, Brasil, luana.raquel.365@ufrn.edu.br

**RESUMO:** No Brasil, anualmente o setor de resíduos emite 96 milhões de toneladas de CO<sub>2eq</sub> para a atmosfera. Na disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários, a garantia de eficácia da camada de cobertura e proteção adequada do material compactado são fatores primordiais para mitigação de impactos ambientais. Isto pode ser percebido com os períodos de umedecimento e secagem do solo e a consequente formação de fissuras nos solos argilosos, comumente utilizados por suas propriedades geotécnicas. Ao surgirem de caminhos preferenciais decorrentes das fissuras, os gases de efeito estufa são emitidos junto ao aumento da infiltração de líquidos que aumenta o volume de lixiviado no maciço. Para isso, este trabalho tem a finalidade de mensurar o efeito das fissuras nas camadas de cobertura de aterros sanitários através do software SEEP/W da Geostudio. Isto foi feito com base na simulação numérica da percolação dos gases no sentido ascendente no resíduo e da infiltração de líquidos no sentido descendente. Foi utilizado o regime transiente da simulação de fluxo e os dados de entrada foram oriundos do INMET (período de 1 ano), concentração de gás metano de 700g/m<sup>3</sup>, baseado na densidade do gás metano, e as condições de contorno do modelo. Foi avaliada uma camada de cobertura em três situações: sem fissura, fissuras até metade da espessura e fissura com profundidade até o final da espessura da camada. Os resultados encontrados apontaram um crescimento das emissões com o aumento da profundidade da fissura com tendência exponencial com coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de 0,99.

**PALAVRAS-CHAVE:** Emissões de Gases de Efeito Estufa, Camada de Cobertura, Fissura, Simulação Numérica.

**ABSTRACT:** In Brazil, the waste sector annually emits 96 million tons of CO<sub>2eq</sub> into the atmosphere. When disposing of solid waste in landfills, ensuring the effectiveness of the covering layer and adequate protection of the compacted material are essential factors for mitigating environmental impacts. This can be seen with periods of soil wetting and drying and the consequent formation of fissures in clayey soils, commonly used for their geotechnical properties. When emerging from preferential paths resulting from fissures, greenhouse gases are emitted along with increased infiltration of liquids, which increases the volume of leachate in the massif. To this end, this work aims to measure the effect of cracks in the covering layers of landfills using Geostudio's SEEP/W software. This was done based on the numerical simulation of the percolation of gases upwards in the residue and the infiltration of liquids downwards. The transient regime of the flow simulation was used and the input data came from INMET (1 year period), methane gas concentration of 700g/m<sup>3</sup>, based on the density of methane gas, and the boundary conditions of the model. A covering layer was evaluated in three situations: without cracks, cracks up to half the thickness and cracks with depth up to the end of the layer thickness. The results found showed an increase in emissions with increasing crack depth with an exponential trend with a coefficient of determination (R<sup>2</sup>) of 0,99.

**KEYWORDS:** Greenhouse Gas Emissions, Covering Layer, Crack, Numerical Simulation.

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por aprimoramento de tecnologias no tocante a destinação de resíduos, no Brasil, ainda é incipiente. Além disso, tanto a educação ambiental da população quanto a aplicação de políticas públicas pelos representantes políticos apresentam deficiências, sendo perceptível desde a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em 2010, sempre com resultados prorrogados. Em busca de propor ajustes para cumprir as proposições iniciais, houve uma atualização em 2022 desta lei através do Decreto nº 10.936 (Brasil, 2022) pontuando-se apenas acerca da logística reversa.

Segundo o artigo 54 da Lei nº 12.305 (Brasil, 2010), a disposição de resíduos em aterros sanitários estabeleceu-se como um meio ambientalmente adequado. Apesar disso, os prazos estipulados para extinção dos lixões no território brasileiro não foram alcançados, fazendo com que toneladas de resíduos ainda estejam em lixões e aterros controlados. Isto pode ser comprovado através dos dados da Abrelpe (2020), que afirmam que a disposição inadequada destes resíduos, nos últimos dez anos, aumentou de 25 para 29,5 milhões de toneladas.

Por consequência de disposição inadequada, a emissão de gases do efeito estufa (GEE) persiste como tema pelo fato do setor brasileiro de resíduos emitir aproximadamente 96 milhões de toneladas de  $CO_{2eq}$  por ano (Abrelpe, 2020). Devido a ausência de formas de captura para aproveitamento de gases gerados no aterro, não há redução nas emissões do gás metano, que é 28 vezes mais poluente que o gás carbônico (Gioda, 2018). Na contramão, existem alternativas encontradas na implementação de tecnologias como, por exemplo: tratamento mecânico biológico; digestão anaeróbia e compostagem. Estes apresentam-se como mecanismos que, se inseridos neste meio, podem auxiliar na redução do impacto ambiental causado pelo metano.

Numa aplicação prática, o aterro sanitário funciona com o manejo e acondicionamento dos resíduos com a necessidade de obediência a algumas regras de segurança e mitigação de impacto ambiental. Partindo da base no terreno até a cobertura final dos resíduos, a massa de lixo tem uma proteção de camadas de solo a fim de impedir a infiltração no subsolo. Além disso, segundo Vieira (2005), estas camadas também auxiliam na redução da entrada de chuva, cooperam na estabilização das camadas, impedem o contato com vetores externos e decaem as emissões poluentes.

As camadas citadas anteriormente relacionam-se com a camada de cobertura final do aterro sanitário. Esta é importante na barreira física quanto à infiltração da chuva e emissão de gases. A depender de sua composição, ela também pode ser capaz de oxidar (por meio de bactérias metanotróficas) o gás poluente, como identificado por Almeida (2017). A eficácia da camada de cobertura é primordial considerando a vida útil de um aterro que costuma ser projetado para, ao menos, 30 anos. O bom controle dos parâmetros desta camada é capaz de proteger os resíduos e trazer diversos benefícios para o meio ambiente.

Observando o contexto de ação da camada, de acordo com Schlud *et al.* (2019), o solo possui uma demanda maior de suas funções de barreira física no período de biodegradação dos resíduos. Isto ocorre pois, neste período, a geração de gases é maior por ser um resíduo novo. Assim, a espessura escolhida, o grau de compactação e os ciclos de umedecimento e secagem, segundo Maciel (2003), interferem no funcionamento adequado do solo ao longo do tempo. Ao observar e estudar a eficácia nestas condições, é possível aprimorar o controle dos parâmetros de operação das camadas de cobertura.

Como os aterros sanitários brasileiros possuem camadas de cobertura convencionais, em sua maioria, estes materiais serem propensos a apresentar fissuras ao longo do tempo devido à períodos de chuva e estiagem. Por consequência das fissuras, as emissões gasosas podem ser potencializadas. Isto foi identificado no Aterro de Seropédica/RJ, por Borba *et al.* (2018), ao notar a propagação de fissuras no material argiloso e a taxa de metano elevada nestas regiões. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da fissuração no quantitativo de gases emitidos, considerando a ação das intempéries, para três tipos de solo e fissuras.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Geometria do modelo e dados geotécnicos dos materiais

No software no módulo SLOPE/W e SEEP/W da Geostudio, foi modelado três modelos de perfis de camadas de cobertura, com diferentes situações de fissuração (Figura 1). As condições foram baseadas no

estudo de Costa *et al.* (2018) que aponta a variação de umidade até 30 cm de profundidade. Além disso, vale salientar que a abertura da fissura adotada foi de 1 cm e a condição (c) possui uma distância de 1 cm até o fim da camada, sem ultrapassá-la totalmente.

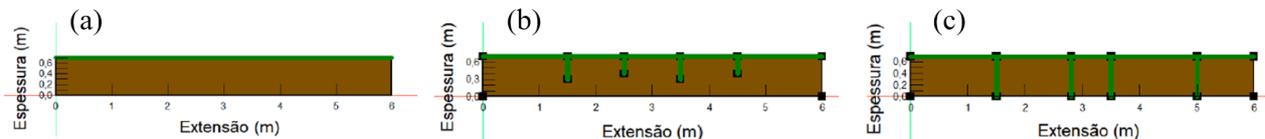


Figura 1. Camadas de cobertura modelo (a) sem fissura (b) com fissura até metade da profundidade (c) fissura até o limiar da camada.

Os dados geotécnicos utilizados foram baseados em revisão de literatura, utilizando os materiais argilosos, siltosos e areno-siltosos dos autores Maciel (2003), Lopes (2011) e Almeida (2017), respectivamente. Os solos possuem índice de plasticidade de, respectivamente, 30, 13 e 7. Vale salientar que o dado de entrada do software foi a curva característica de sucção de cada material, a fim de compreender e avaliar o comportamento do solo mediante fluxo de gás ascendente e descendente de água.

As ordens de grandeza das permeabilidades dos solos à água dos solos estudados, respectivamente, Almeida (2017), Lopes (2011) e Maciel (2003) foi de  $10^{-6}$  m/s,  $10^{-9}$  m/s e  $10^{-10}$  m/s. Todas estas ordens de grandeza foram utilizadas para o material em condição saturada.

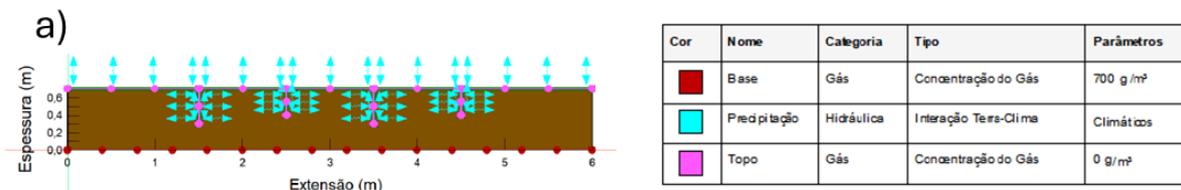
## 2.2 Dados climatológicos

O período de análise abrangeu os dados pluviométricos do SISDAGRO (Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária) e INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). As informações da estação Recife de código A301 foram do dia 13 de janeiro de 2021 a 13 de janeiro de 2022. Para entrar no software, utilizou-se da precipitação total diária, temperatura e velocidade do vento, adaptadas da unidade original para as unidades do programa ( $m^3/dia/m^2$ , dias/ $^{\circ}C$  e m/dia). Além disso, também foram utilizados os dados solarimétricos (radiação solar e umidade relativa) para o intervalo de dias anual supracitado.

## 2.3 Concentração de gás metano e condições de contorno

Por limitações de simulação bidimensional, a entrada para análise do programa é a concentração do gás. Isso acontece, pois, para usar situações de fluxo de gás, pede-se que a análise seja feita de forma unidimensional. Como a densidade do gás metano é equivalente a  $0,72kg/m^3$ , a escolha para a simulação foi de  $700g/m^3$ .

As condições de contorno aplicadas na simulação (Figura 2a) são do tipo concentração de gás e interação terra-clima. As concentrações de topo e fundo foram diferentes para impor ao software o fluxo de maior para menor concentração. Para a condição sem fissura e com fissura até a metade da camada, o domínio foi discretizado em uma malha de 420 elementos – 10 cm x 10 cm. Para melhor refinar os valores, adaptou-se a malha, para a condição de maior profundidade de fissura, com discretização de 1680 elementos – 5 cm x 5 cm (Figura 2b).



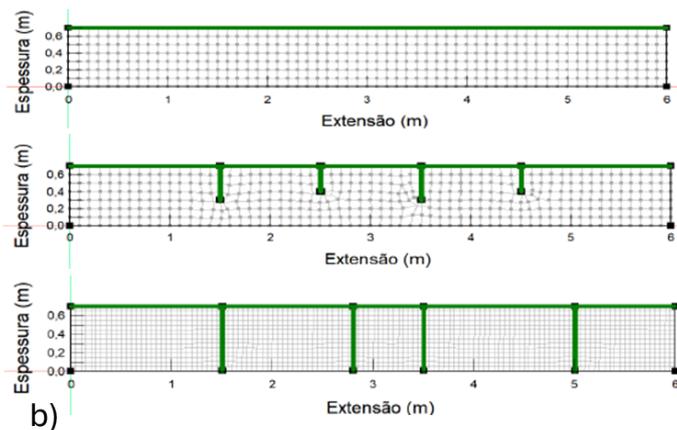


Figura 2. (a) Condições de contorno aplicadas e (b) malha discretizada.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados encontrados para a situação em que a camada de cobertura estava sem fissura, para o material argiloso de Maciel (2003), apontaram que o material conteve a passagem de gases principalmente nos períodos mais chuvosos, permitindo a passagem no período em que a precipitação era mais baixa. Este comportamento também foi observado nos materiais siltosos e areno-siltosos de Lopes (2011) e Almeida (2017), respectivamente. Mediante a formação da fissura, a concentração final em peso do metano emitido foi aumentando consideravelmente.

Percebe-se, ao observar a Tabela 1, o aumento na ordem de grandeza com uma tendência exponencial ao aumentar sempre com uma razão equivalente de 1000. Somando-se a isso, nota-se que a ordem de grandeza crescente foi constante e, ao invés de apresentar relação direta com o tipo de solo, relacionou-se mais com a presença de trincas no material.

Tabela 1. Emissões de gases em relação a fissura na camada de cobertura.

| Solo/Condição  | Concentração de gás em peso |                              |                                      |
|----------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
|                | Sem fissura                 | Fissura até metade da camada | Fissura até o limiar final da camada |
| Maciel (2003)  | 91,27 g                     | 18,80 kg                     | 6.656 t                              |
| Lopes (2011)   | 171,10 g                    | 468,50 kg                    | 10.311 t                             |
| Almeida (2017) | 3,71 g                      | 173,30 kg                    | 13.14 t                              |

Além disso, o comportamento do material após o período de estiagem reitera um comportamento semelhante ao encontrado por Benson *et al.* (1994) que afirma o aumento da condutividade, independente do aumento do teor de umidade da camada. Isto pode ser observado através da comparação dos cenários sem fissura e com fissura até metade da camada, para o mesmo solo, conforme a Figura 3.

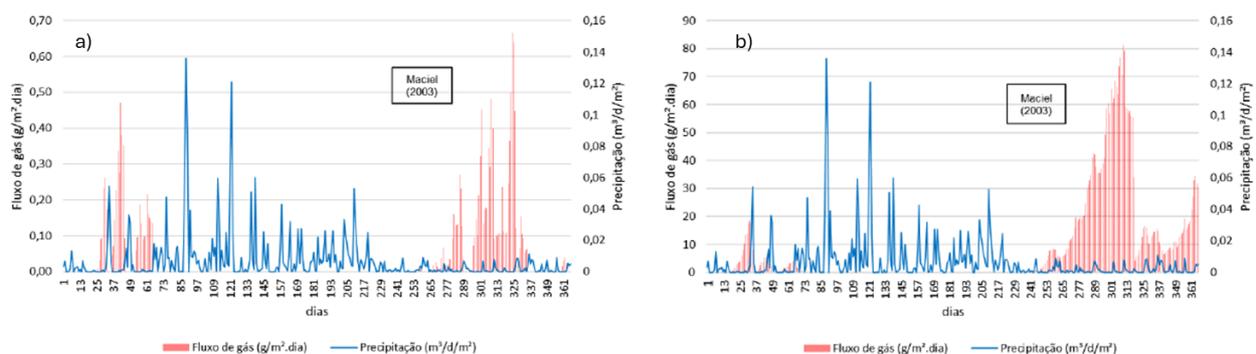


Figura 3. Fluxos temporais de gás para a (a) condição sem fissura e (b) com fissura na metade da camada para o solo de Maciel (2003).

Salienta-se que a intenção de realizar a análise com a profundidade da fissura no limiar da camada foi para identificar os *hotspots*, assim nomeados pelos autores Li *et al.* (2020). De acordo com os autores, estes *hotspots* são formados por degradação e assentamento diferencial, ocasionando a geração de pontos com maiores vazões de emissão. De acordo o estudo, foi comprovada a formação de pontos com vazões mais altas nessas profundidades mais altas.

Após a mensuração do quantitativo de metano emitido em relação ao solo intacto e com a ocorrência de fissuras em duas condições, a análise foi direcionada para entender o comportamento destes valores. Para isso, realizou-se uma correlação estatística a fim de entender se o aumento do material tende a um crescimento exponencial de emissões gasosas. Ao avaliar este aumento, encontrou-se coeficientes de correlação de Pearson ( $R^2$ ) com valores acima de 0,9, segundo a Figura 4.

De acordo com Hopkins (2000), quando este coeficiente resulta valores entre 0,9 e 1, considera-se a relação como quase perfeita. Os coeficientes de correlação encontrados foram 0,999 para Maciel (2003), 1 para Lopes (2011) e 0,995 para Almeida (2017).

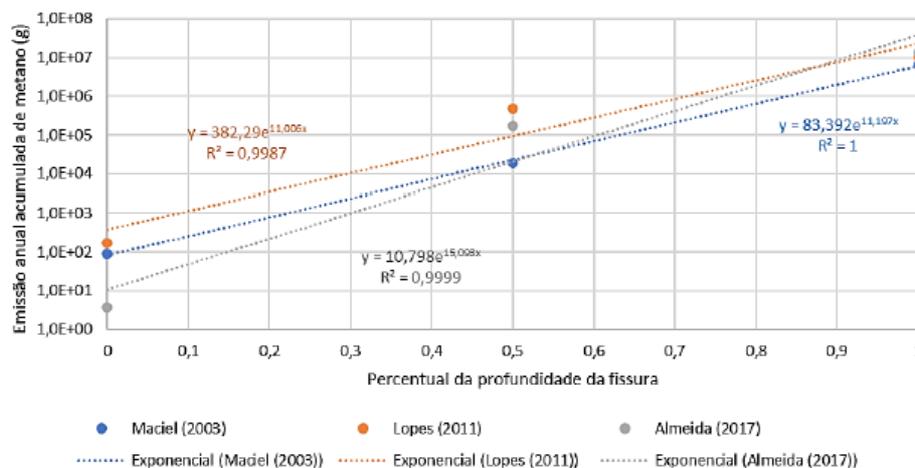


Figura 4. Tendência de crescimento exponencial da emissão de gases em relação à profundidade da fissura.

Dessa forma, nota-se uma boa correlação entre as variáveis “profundidade de fissura” e “emissão de gases” de acordo com a tendência exponencial encontrada.

## 4 CONCLUSÕES

Algumas considerações foram identificadas através dos resultados encontrados na simulação numérica destas camadas de cobertura, são estas:

- O coeficiente de correlação próximo a 1 apontou que os dados apresentam coerência para afirmar que quanto mais profunda é a fissura, mais biogás são emitidos pela camada, devido a geração de caminhos preferenciais;
- Existe uma tendência de progressão geométrica entre a emissão de gases correlacionados com a profundidade da fissura com uma razão aproximada de 1000;
- Solos com fissuras no limiar de ultrapassar a espessura da camada tendem a emitir 1 milhão de vezes mais gramas de metano do que camadas de solo sem fissuras;
- A eficácia da camada de cobertura pode ser melhorada através de um plano de manutenção contendo o umedecimento das camadas nos períodos mais secos, aumentando a condutividade à água e reduzindo a condutividade ao gás;
- A plasticidade do solo não afeta diretamente na simulação numérica, mas afeta na condição de formação de fissuras em campo. Ou seja, quanto mais plástico o solo usado na camada de cobertura, maior a tendência de surgência de fissuras e trincas;
- Após identificar que apenas a fissura influencia diretamente na emissão, pode-se afirmar que o tipo de solo não é uma condição preponderante no aumento das emissões gasosas. Apesar disto, os materiais

menos plásticos e mais impermeáveis ainda continuam sendo a escolha mais segura na prevenção de trincas.

## AGRADECIMENTOS

À TPF Engenharia que incentiva seus colaboradores para desenvolvimento científico e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa no período de desenvolvimento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, A. J. G. A. (2017) *Avaliação do desempenho das camadas de cobertura de aterro sanitário para a redução de emissões de gases do efeito estufa*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru.
- ABRELPE (2020) Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. São Paulo: ABRELPE, 2020.
- Benson, C.; Bosscher, P. Lane, D.; Pliska, R. Monitoring system for hydrologic evaluation of landfill final covers. 1994. *Geotechnical Testing Journal*. v.17, n.2, p.138-149, 1994.
- Borba, P. F. S; Martins, E. M.; Correa, S. M.; Ritter, E. (2018) Emissão de gases do efeito estufa de um aterro sanitário no Rio de Janeiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. n. 23, v. 1, Rio de Janeiro.
- Brasil. (2010) *Lei 12.305*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Publicada no D.O.U. em 03/08/2010.
- Brasil. (2022) *Decreto Presidencial nº 10.936*, que regulamenta a Lei nº 12.305 de 2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e cria ainda o Programa Nacional de Logística Reversa. Publicada no D.O.U. em 12/01/2022.
- Costa, M. D.; Mariano, M. O. H.; Araujo, L. B.; Jucá, J. F. T. (2018) Estudos laboratoriais para avaliação do desempenho de camadas de cobertura de aterros sanitários em relação à redução de emissões de gases e infiltrações. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. v.23, n.1, pp. 77-90.
- Gioda, A. (2018) Comparação dos níveis de poluentes emitidos pelos diferentes combustíveis utilizados pela cocção e sua influência no aquecimento global. *Química Nova*, v.41 n.8, p.839-848.
- Hopkins, W. G. (2000) *Correlation coefficient: a new view of statistics*. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>.
- Li, S.; Meng, B.; Yue, B.; Gao, Q.; Ma, Z.; Zhang, W.; Li, T.; Yu, L. (2020) Seasonal CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> effluxes in a final covered landfill site in Beijing, China. *Science of The Total Environment*. v. 725, 10 July 2020, 138355.
- Lopes, R. L. (2011) *Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 274p..
- Maciel, F. J. (2003) Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco. 173 p.
- Vieira, A. M. (2005) Estudo de barreiras capilares como Cobertura final de aterro de resíduos. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Schlub, A. C. M.; Silva, L. A. O.; Holanda, S. H. B.; Firmo, A. L. B.; Jucá, J. F. T. (2019) Resíduos sólidos urbanos: potencial fonte de carbono para degradação microbiana e produção de biogás. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 5 n. 8, p. 11927-11942.