



MODELAGEM DO TRANSPORTE DE GASES DO EFEITO ESTUFA EM CAMADA DE COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO

Hugo Allan Albuquerque Barbosa*

Universidade de Brasília/ Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/ Brasília/ Brasil

Moisés Antônio da Costa Lemos

Universidade de Brasília/ Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/ Brasília/ Brasil

André Luís Brasil Cavalcante

Universidade de Brasília/ Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/ Brasília/ Brasil

RESUMO

A emissão de gases do efeito estufa provoca diversos impactos ambientais, como as mudanças climáticas. O biogás, composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono, é gerado pela biodegradação da matéria orgânica dentro do maciço de um aterro, e podem trazer impacto ambiental se emitido para atmosfera. A camada de cobertura de aterros sanitários, mesmo bem estruturada, podem emitir de forma difusa esses gases para a atmosfera. Para evitar a emissão desses gases, é minimamente necessário o entendimento do transporte para assim minimizar os impactos ambientais. A metodologia consistiu na obtenção de trabalhos laboratoriais em ensaios de colunas que simulassem o transporte de gases em camada de cobertura de aterro sanitários. A partir da análise de trabalhos laboratoriais, obteve-se dados e parâmetros relativos ao transporte dos gases e seu respectivo comportamento ao longo de diferentes camadas de cobertura. Posteriormente, foi realizada a modelagem do transporte dos gases com os dados extraídos do trabalho de Rachor et al. (2011), através do método semi-analítico de Lemos e Cavalcante (2023) e, a modelagem numérica utilizando o COMSOL, para se obter a previsão do transporte dos gases. Dentre os resultados obtidos encontram-se: difusão dos gases, como o do metano que foi de $3,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, a taxa de oxidação do metano, taxa de formação do dióxido de carbono, taxa de consumo do oxigênio, entre outros parâmetros. Portanto, é possível perceber que este trabalho permitiu a obtenção de parâmetros da oxidação do metano, permitindo maior entendimento do transporte de gases e que futuros trabalhos busquem o aumento da eficiência desse processo.

PALAVRAS-CHAVE: Camada de cobertura, Oxidação do metano, Aterro sanitário, Modelagem.

ABSTRACT

The emission of greenhouse gases causes several environmental impacts (e.g., climate change). Landfill Gas, composed mostly of methane and carbon dioxide, is generated by the biodegradation of organic matter within the mass of a landfill, and may cause environmental impact if emitted into the atmosphere. The cover layer of sanitary landfills, even well structured, can diffusely emit these gases into the atmosphere. To avoid the emission of these gases, their transport is minimally necessary to minimize environmental impacts. The methodology consisted of obtaining laboratory research in column tests that simulate the transport of gases in the cover layer of a sanitary landfill. Based on the experimental analysis, data and parameters related to the transport of gases and their respective behavior along the different covering layers were obtained. Subsequently, gas transport modeling was carried out with data extracted from Rachor et al. (2011), through the semi-analytical method of Lemos and Cavalcante (2023) and numerical modeling using COMSOL, to obtain the prediction of gas transport. Among the results obtained are: diffusion of gases, such as methane which was $3.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, methane oxidation rate, carbon dioxide formation rate, oxygen consumption rate, among other parameters. Therefore, in this research were obtained methane oxidation parameters, allowing a better understanding of the transport of gases and

*Autor correspondente: hugoallan602@gmail.com



allowing future works increase the efficiency of this process.

KEYWORDS: Cover layer, Methane oxidation, Landfill, Modeling.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, a sociedade vem de forma acelerada enfrentando grandes problemas por causa dos impactos ambientais, sendo o aquecimento global um dos mais complexos e preocupantes (MACIEL, 2003). A emissão de gases do efeito estufa para atmosfera são advindos de diversas fontes, inclusive da disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários (CETESB, 2022). E com o advento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) - Lei nº 12.305/2010, em que se prevê uma disposição final ambientalmente adequada para os rejeitos dos resíduos sólidos urbanos, iniciou uma grande quantidade de construções de aterros sanitários pelo país, aumentando ainda mais essa preocupação já existente (BRASIL, 2010).

A decomposição anaeróbica da matéria orgânica presente nos resíduos gera um conjunto de gases conhecidos como biogás (MACIEL, 2003). A composição majoritária do biogás é formada por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), sendo ambos gases do efeito estufa, tornando os aterros sanitários uma fonte poluente, caso esses gases sejam emitidos para a atmosfera (COSTA, 2015). Nesse sentido, o potencial de oxidação microbiana do metano em aterros sanitários surge como um dos meios para reduzir as emissões de metano para a atmosfera, como é abordado no trabalho de Hilger e Hummer (2003).

Os aterros sanitários são construídos de forma que o armazenamento dos resíduos sólidos seja dado de forma adequada (CETESB, 1982). São projetados para que haja o adequado manejo do biogás gerado ao longo do tempo, possibilitando assim uma maior eficiência na captação e oxidação do metano na camada de cobertura dos aterros, contribuindo para a redução das emissões de gases à atmosfera (COSTA, 2015). A adequada instalação também impede que parte dos líquidos infiltre no interior do aterro prevenindo uma maior produção de lixiviados (ABNT, 1992).

Como citado anteriormente, para evitar que águas pluviais adentrem no interior do aterro e que sejam emitidos gases para atmosfera, são construídas camadas de coberturas com o objetivo de mitigar

esses problemas (ABNT, 1997).

Para um melhor desempenho das camadas de coberturas é necessário se conhecer os materiais que as compõem, analisando as características geotécnicas e os condicionantes locais das regiões onde serão implantados os aterros sanitários (SCHEUTZ et al., 2009).

Nesse contexto, torna-se importante o estudo de camadas de cobertura que apresentem materiais e características construtivas, que minimizem significativamente as emissões dos gases do efeito estufa para atmosfera e que promovam a oxidação do metano gerado na massa de resíduos do aterro.

Na Figura 1 está destacado o comportamento típico dos gases na camada de cobertura, em que os gases que compõe o biogás, no caso o CH_4 e o CO_2 estão ascendendo por mecanismos de advecção e difusão, enquanto os gases atmosféricos estão adentrando a camada de cobertura pelo mecanismo de difusão (LEMOS, 2020).

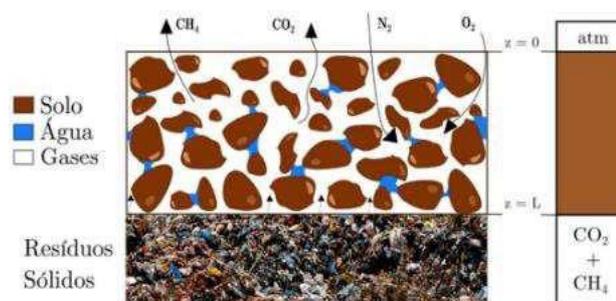


Figura 1. Ilustração da direção dos gases na camada de cobertura de um aterro (LEMOS, 2020).

Por fim, para um estudo detalhado da eficiência da camada de cobertura para a não emissão de gases do efeito estufa para a atmosfera, é necessário a previsão do transporte de gases e reações que diminuem sua concentração, como por exemplo, a oxidação do metano, dentro das camadas de coberturas dos aterros sanitários (LEMOS, 2020).

A redução da emissão de gases de efeito estufa é influenciada pelo material da camada de cobertura e disponibilidade de oxigênio. A melhoria da aeração aumenta a eficiência de oxidação de CH_4 (HUANG et al., 2020).

O objetivo deste trabalho é utilizar análises experimentais obtidas na literatura e a partir do método semi-analítico de Lemos e Cavalcante (2023)

e modelagem numérica (COMSOL) modelar o comportamento do transporte dos gases em camada de cobertura de aterro sanitário. A importância do estudo visa a emissão mínima de gases do efeito estufa a partir do maior entendimento de reações e mecanismos do transporte dos gases, possível a partir de modelagens como a desenvolvida nessa pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Camada de cobertura

A camada de cobertura de aterros sanitários tem a função de isolar os resíduos do meio externo; controlar a entrada de água e ar para dentro do maciço sanitário; minimizar a migração para a atmosfera dos gases gerados pela decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos; servir como elemento de redução de odor, vetores de doença e outros inconvenientes; ser componente do sistema de drenagem das águas pluviais; e facilitar a recomposição da paisagem (CATAPRETA, 2008).

2.2 Trabalhos laboratoriais

Primeiramente, a pesquisa consistiu na busca por trabalhos laboratoriais em colunas de solo simulando camadas de cobertura em diversos materiais que compõem o sistema em aterros espalhados pelo mundo. Acerca deste assunto, destaca-se os trabalhos de Thomassen et al. (2019), Rachor et al. (2011), Huang et al. (2020), Tanthachoon et al. (2007). Na Tabela 1, verifica-se os detalhes desses trabalhos.

Tabela 1. Abordagens experimentais em solos de camada de cobertura de aterros sanitários.

Autores	Material do Ensaio	Concentração do Biogás	Temperatura do Ensaio	Material da camada de cobertura
Tanthachoon et al. (2007)	Coluna de Acrílico (D = 15 cm e L = 100 cm)	60% CH ₄ e 40% CO ₂	35°C	Areia siltosa e compostos com vegetação na parte superior
Rachor et al. (2011)	Coluna de PVC (D=19 cm) e (L=107 cm)	60% CH ₄ e 40% CO ₂	19 °C	Quatro solos minerais experimentais e um solo com sedimentos, que era rico em matéria orgânica e tinha uma fração maior de material fino
Thomassen et al. (2019)	Coluna de PVC (D=20 cm) e (L=100 cm)	99,5% CH ₄ e o restante de ar atmosférico	20 – 22 °C	O material utilizado neste experimento foi um composto coletado por uma empresa de reciclagem
Huang et al. (2020)	Coluna de acrílico (D=14 cm) e (L=100 cm)	60% CH ₄ e 40% CO ₂	25 ± 3 °C	Solo de cobertura franco arenoso, que foi coletado em um aterro sanitário em Shenzhen - China

Com a seleção dos trabalhos, foi obtido a concentração de cada gás ao longo da profundidade

da camada de cobertura como pode ser observado na Figura 2. Visto que essas informações são fundamentais para poder simular e calibrar modelos matemáticos de transporte dos gases.

Entre os trabalhos presentes na Tabela 1, o trabalho de Rachor et al. (2011), apresentava uma maior diversidade de dados, o que permitiria uma melhor validação da modelagem realizada.

Os ensaios realizados por Rachor et al. (2011) consistiram em cinco colunas, que foram construídas com tubos de PVC com comprimento de 1070 mm e diâmetro interno de 190 mm. As colunas foram fechadas com tampas de vedação em ambos os lados na parte final. Na parte inferior, uma entrada para gás sintético de aterro e na parte superior foi instalada uma entrada de ar e uma saída para o gás. Verticalmente, os pontos de amostragem de gás foram montados em intervalos de 10 cm, no qual com o uso das seringas descartáveis era possível obter a amostragem do gás do solo. Na Figura 3 está presente a configuração utilizada no ensaio de Rachor et al, 2011.

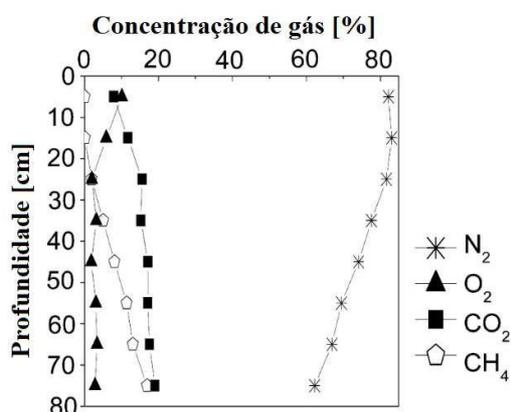


Figura 2. Concentração dos gases ao longo da profundidade. Fonte: Rachor et al. (2011)

Cada coluna foi preenchida com uma camada de distribuição composta de pedregulho com 17 cm de espessura, acima havia 80 cm de solo.

Os solos, que foram selecionados de um aterro na Holanda, consistiam de quatro solos arenosos e um solo com características de uma areia argilosa, que era rico em matéria orgânica e tinha uma fração maior de material fino. Nenhum dos materiais foi exposto ao gás de aterro sanitário antes do início do experimento (RACHOR et al, 2011).

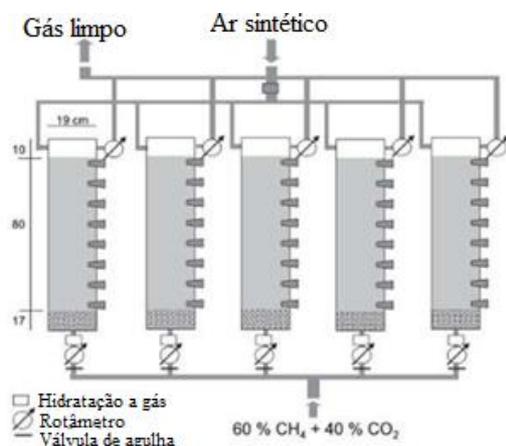


Figura 3. Configuração esquemática do experimento de coluna (Modificado de Rachor et al., 2011).

2.3 Programas Computacionais

2.3.1 Web Plot Digitizer

O *Web Plot Digitizer* foi desenvolvido para a extração de dados, visto que uma grande quantidade de dados técnicos está disponível apenas na forma de gráficos e imagens (ROHATGI, 2020). Nessas imagens, é fácil visualizar a relação entre as variáveis envolvidas, mas recuperando os valores numéricos exatos dos dados, é possível obter diversas avaliações que ficariam restringidas apenas com as imagens.

2.3.2 SWRC AI

O software *SWRC AI* foi utilizado para obtenção de parâmetros relativos a curva de retenção de água no solo nos quais são de grande importância em diversos modelos de simulação de transporte de gases. A aplicação foi desenvolvida pela parceria do Geofluxe (Grupo de Pesquisa Inovações e Tecnologias Aplicadas em Geotecnia Ambiental) e GEOAMB (Laboratório de Geotecnia Ambiental - UFBA).

2.3.3 Mathematica

O Software *Mathematica* usa números de alta precisão controlados e análises simbólicas para resolver problemas que seriam de solução impossível com métodos numéricos tradicionais e números de precisão limitada.

2.3.4 COMSOL

O *COMSOL Multiphysics*, é um software de análise de elementos finitos, solucionador e simulador multifísico de plataforma cruzada. Ele permite interfaces de usuário convencionais baseadas em física e sistemas acoplados de equações diferenciais parciais (COMSOL, 2022).

3. METODOLOGIA

A metodologia (Figura 4) utilizada consistiu, primeiramente, na obtenção de trabalhos laboratoriais que realizaram ensaios de coluna, com os solos utilizados na camada de cobertura de aterros sanitários ao redor de todo o mundo, simulando o transporte dos gases e a relação destes na oxidação do gás metano.

Após a seleção de trabalhos sobre o tema realizou-se a extração dos dados referentes aos parâmetros geotécnicos do solo. Além dos valores numéricos dos gráficos que relacionam a profundidade da camada de cobertura com a concentração dos gases, através do software *Web Plot Digitizer* (ROHATGI, 2020). Após a extração dos dados de todos os artigos pesquisados, foi selecionado os parâmetros que foram utilizados na modelagem. Assim, escolheu-se um dos artigos, para realizar a modelagem e calibração posterior nos softwares *Mathematica* (LEMOS e CALVALCANTE, 2023) e *COMSOL*.

Com os dados extraídos dos trabalhos experimentais, verificou-se que parte dos parâmetros necessários para a modelagem numérica não foram citados nos trabalhos, sendo necessário a utilização de outra aplicação para obtenção desses valores.

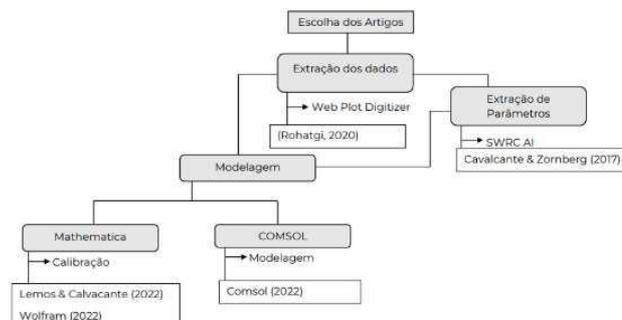


Figura 4. Organograma das etapas da metodologia.

Por exemplo, para obtenção de parâmetros a respeito da curva de retenção de água no solo utilizou-se o software *SWRC AI* (GEOFLUXO, 2022).

No SWRC AI foram incluídos os valores das proporções granulométricas do solo, utilizando o modelo constitutivo de Cavalcante e Zornberg (2017) para se obter o parâmetro do ajuste hidráulico da curva de retenção da água no solo.

Entre os parâmetros extraídos com essa aplicação, tem-se: teor de água volumétrica saturada (θ_s) e Teor de água volumétrica residual (θ_r) e ajuste hidráulico da curva de retenção de água no solo.

Além da escolha de um dos trabalhos para se realizar a modelagem e calibração do modelo, para poder se obter o transporte dos gases na camada de cobertura simulado com aquele tipo de solo.

Utilizou-se o trabalho de Rachor et al. (2011) e a previsão do transporte dos gases foi modelado utilizando-se o modelo analítico de Lemos e Cavalcante (2023).

Calibrando os dados experimentais a partir do modelo desenvolvido por Lemos e Cavalcante (2023), foi possível, se obter dados de saídas, que seriam comparadas com a modelagem numérica realizada pelo software COMSOL.

Com a utilização do COMSOL, realizou-se a modelagem numérica. Após realizada a previsão do transporte dos gases, foi realizada uma comparação com os resultados obtidos pelo método de Lemos e Cavalcante (2023).

Na Tabela 2 estão os dados extraídos do trabalho de Rachor et al. (2011), os dados que não se encontravam no trabalho, foram extraídos do trabalho de Lemos (2020) e do software SWRC AI (GEOFUXO, 2022) em que foram utilizados para a calibração no Mathematica.

Tabela 2. Parâmetros extraídos de Rachor et al. (2011).

Parâmetro	Valor
Porosidade (n)	0,3798
Densidade aparentemente seca do solo (ρ_d)	1670 kg m ⁻³
Densidade das partículas do solo (ρ_s)	2692 kg m ⁻³
Teor de água volumétrica saturada (θ_s)	0,3798
Teor de água volumétrica residual (θ_r)	0,03
Taxa máxima de oxidação do metano (V_{max})	7,5x10 ⁻⁵
Constante de Henry para CH ₄	0,0316
Constante de Henry para O ₂	0,0318
Constante de Henry para CO ₂	0,8145

Constante de Henry para N ₂	0,0159
Fração do metano (X_{CH_4}) %	60
Areia %	86,8
Silte %	6,3
Argila %	7,1
Tempo de ensaio	36

Para modelagem no COMSOL, foram obtidos os parâmetros que necessitavam para a simulação do transporte dos gases com o trabalho realizado por Rachor et al. (2011). Na Tabela 3 é possível verificar os parâmetros utilizados.

Tabela 3. Parâmetros utilizados no COMSOL.

Parâmetro	Valor
Temperatura (n)	19 °C
Massa Molar CH ₄	1670 kg m ⁻³
Massa molar CO ₂	44,0095 g/mol
Massa molar O ₂	31,998 g/mol
Massa molar N ₂	28,0134 g/mol
Massa molar H ₂ O	18,01528 g/mol
Permeabilidade Intrínseca (K_{in})	1*10 ⁻¹² m ²
Teor de Umidade volumétrico Inicial (θ_i)	0,167
Umidade volumétrica mínima que a oxidação é insignificante ($\theta_{wiltting}$)	0,04
Umidade volumétrica máxima que não ocorra infiltração no solo (θ_{rc})	0,15
Comprimento da Coluna (L)	0,80 m
Raio da coluna	9,5 cm
Constante de meia saturação (K_{m,CH_4})	0,0066
Constante de meia saturação (K_{m,O_2})	0,012
Viscosidade CH ₄	1,10x10 ⁻⁵ Pa.s
Viscosidade CO ₂	1,46x10 ⁻⁵ Pa.s
Viscosidade O ₂	2,03x10 ⁻⁵ Pa.s
Viscosidade N ₂	1,75x10 ⁻⁵ Pa.s
Constante universal dos gases	8,314 J mol ⁻¹ *K ⁻¹
Fluxo total de biogás	22,93 mol m ⁻² d ⁻¹

Após a realização de todos os passos, foi possível obter os parâmetros referentes ao transporte dos gases do trabalho realizado por Rachor et al. (2011), em que valores como a difusão real do gás Metano, a taxa de oxidação do CH₄, a taxa de consumo do oxigênio durante a oxidação do CH₄, a geração de CO₂ nesse processo, como será

possível verificar na parte de resultados.

4. RESULTADOS

Utilizado os softwares *Mathematica* e *COMSOL*, para calibração e tratamento dos dados, respectivamente, e o modelo desenvolvido por Lemos e Calvacante (2023), foi possível chegar em resultados satisfatórios.

Resultados como a previsão do transporte dos gases e o comportamento da oxidação do metano ao longo da profundidade da camada de cobertura, como pode ser observado na Figura 5. As linhas contínuas são a previsão do modelo e os pontos são advindos dos dados experimentais (t = 36 dias).

Foi comparado os resultados obtidos com a simulação do transporte dos gases realizada no *COMSOL*, com os dados extraídos do trabalho de Rachor et al. (2011), no qual temos um resultado satisfatório, visto que ambos apresentam comportamento semelhante, as diferenças se dão por conta dos arredondamentos e parâmetros utilizados na modelagem do *COMSOL*. Na Figura 6 está a comparação dos resultados obtidos, sendo as linhas contínuas e coloridas os dados obtidos com a simulação realizada no *COMSOL*, e os pontos os dados extraídos do trabalho de Rachor et al. (2011) para t = 36 dias.

Após ter sido realizado a modelagem no *COMSOL* comparou-se com os valores obtidos pelo modelo de Lemos e Cavalcante (2023). A obtenção de diversos parâmetros foi possível por conta da utilização de todo o método e softwares utilizados neste trabalho. Como resultados, foram obtidos a difusão dos gases, como pode ser observado na Tabela 4 pelo método de Lemos e Cavalcante (2023) e pelo *COMSOL* (Tabela 5).

Além dos valores de difusão de cada um dos gases analisados, também foi possível obter a taxa de oxidação do CH₄, a taxa de formação do CO₂ com o processo de oxidação do CH₄ e a taxa de consumo do O₂. Na Tabela 6, é possível verificar os valores constantes obtidos em duas faixas de profundidade da camada de cobertura. Na Tabela 7 constam os valores obtidos pelo *COMSOL*, os valores variam ao longo da profundidade, dessa maneira optou-se por mostrar o maior valor ao longo da coluna.

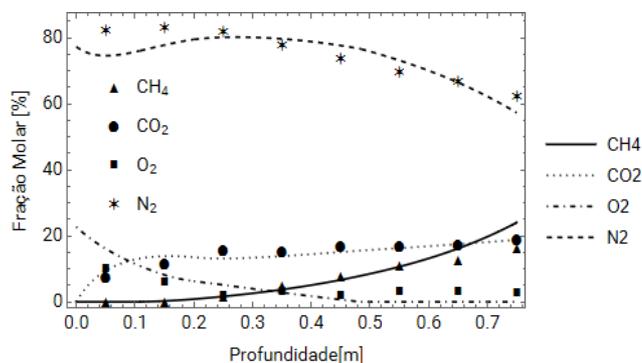


Figura 5. Calibração do modelo utilizando o MATHEMATICA.

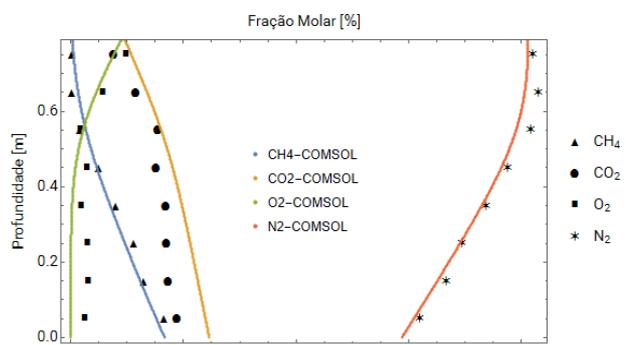


Figura 6. Calibração do modelo utilizando o COMSOL.

Tabela 4. Difusão dos gases pelo método de Lemos e Cavalcante (2023).

D _{CH4} [m s ⁻²]	D _{CO2} [m s ⁻²]	D _{O2} [m s ⁻²]	D _{N2} [m s ⁻²]	v _g [m s ⁻¹]
2,4x10 ⁻⁵	3,9x10 ⁻⁷	4,8x10 ⁻⁶	7,6x10 ⁻⁶	7,9x10 ⁻⁶

Tabela 5. Difusão dos gases pelo COMSOL.

D _{CH4} [m s ⁻²]	D _{CO2} [m s ⁻²]	D _{O2} [m s ⁻²]	D _{N2} [m s ⁻²]	v _g [m s ⁻¹]
2,6x10 ⁻⁶	2,0x10 ⁻⁶	2,5x10 ⁻⁶	2,3x10 ⁻⁶	1,1x10 ⁻⁶

Tabela 6. Taxas de geração/consumo dos gases devido a oxidação do metano pelo método de Lemos e Cavalcante (2023).

Prof. [m]	Y _{CH4} [mol/m ³ s]	Y _{CO2} [mol/m ³ s]	Y _{O2} [mol/m ³ s]
L < 0,2	-0,000615	0,0001230	-0,0011076
L ≥ 0,2	-0,000043	0,0000217	-0,0000652

Tabela 7. Maiores taxas de geração/consumo dos gases devido a oxidação do metano obtido no COMSOL.

Prof. [m]	Y _{CH4} [mol/m ³ s]	Y _{CO2} [mol/m ³ s]	Y _{O2} [mol/m ³ s]
L=0,2	-0,000061	0,000031	-0,00012

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da modelagem semi-analítica e numérica realizada nessa pesquisa, percebeu-se que os modelos simularam o transporte dos gases na camada de cobertura de aterro sanitário satisfatoriamente, e assim, foi possível a obtenção de parâmetros da oxidação do metano. As vantagens desses estudos devem-se a melhora, no entendimento do transporte de gases, o que pode futuramente melhorar a eficiência desse processo e diminuir a emissão que ocorre de forma difusa dos gases de efeito estufa pela camada de cobertura para a atmosfera. Ressalta-se ainda que esta pesquisa mostrou a importância de complementar trabalhos experimentais com a parte de modelagem, em que em conjunto, possibilitam uma melhor análise sobre o tema.

Com as modelagens que foram realizadas, foi possível, a partir de calibrações, alcançar uma oxidação do metano de forma otimizada. Além disso, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, haja vista que mostraram uma visão geral de como a simulação do transporte dos gases é importante para obtenção da taxa de consumo do O_2 , taxa de oxidação do CH_4 e a taxa de formação do CO_2 , e assim, é possível obter uma melhor taxa de oxidação do metano possível, podendo potencializar esse processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos, pelo suporte dado a esta pesquisa, à Universidade de Brasília (UnB), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq Projetos 305484/2020-6 e 140923/2020-9), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF).

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). NBR 13.896: *Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro, 1997.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). NBR 8419: *Apresentação de projetos de*

- aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro, 1992.
- Brasil (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). *Diário Oficial da União*. República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 de agosto de 2010.
- Catapreta, C. A. A. (2008). *Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação*. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.
- Cavalcante, A. L. B; Zornberg, J. G. (2017). Efficient Approach to Solving Transient Unsaturated Flow Problems. I: Analytical Solutions. *International Journal of Geomechanics*, 1–17p., 2017.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1982). *Norma para apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. CETESB. São Paulo, 1982.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2022). *Gases do Efeito Estufa e Fontes de Emissão*. CETESB. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>. Acesso em: 23 de agosto de 2022.
- Comsol (2022). *COMSOL Multiphysics*. 2022. Disponível em: <https://www.comsol.com/>. Acesso em: 12 de agosto de 2022.
- Costa, M. D. (2015). *Estudos De Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários em Colunas De Solos*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, 144p. 2015.
- De Visscher, A., Thomas, D., Boeckx, P., Van Cleemput, O. (1999). Methane oxidation in simulated landfill cover soil environments. *Environ. Sci. Technol.* 33 (11), 1854–1859, 6p, 1999.
- Geofluxo (2022). SWRC AI. Disponível em: <https://www.geofluxo.com/geoapps/swrc-ai/>. Acesso em 18 de agosto de 2022.
- Hilger, H., Humer, M. (2003). Biotic landfill cover treatments for mitigating methane emissions. *Environ. Monit. Assess.* 84p, 2003.
- Huang D, Yang L, XU W, Chen Q, KO JH, XU Q. (2020). Enhancement of the methane removal efficiency via aeration for biochar-amended landfill soil cover. *Environ Pollut* 263, 9p., 2020.
- Maciel, F. J.; Jucá, J. F. T. (2011). Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. *Waste Management*, v. 31, n. 5, 12p., 2011.
- Maciel, F. J.; Jucá, J. F. T. (2003). *Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE*. 2003. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-

- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.
- Lemos, M.A.C. (2020). *Modelagem Analítica do Transporte Transiente de Gases em Meio Poroso Não Saturado*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM- 341/2020, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100 p.
- Lemos, M. A.C; Cavalcante, A. L. B. (2023). Semi-Analytical Modeling of Gas Transport and Methane Oxidation in a Landfill Cover Layer. *Sustainability* (No prelo).
- Rachor, I., Gebert, J., Grongroft, A., Pfeiffer, E.M. (2011). Assessment of the methane oxidation capacity of compacted soils intended for use as landfill cover materials. *Waste Manage.* 31, 833–842, 10p., 2011.
- Rohatgi, A. (2020). WebPlotDigitizer User Manual. 2020. Disponível em: <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/userManual.pdf>. Acesso em: 10 de agosto de 2022.
- Thomasen, T. B., Scheutz, C., Kjeldsen, P. (2019). Treatment of landfill gas with low methane content by biocover systems. *Waste Management*, 84, 29-37, 2019.
- Scheutz, C., Bogner, J., De Visscher, A., Gebert, J., Hilger, H., Huber-Humer, M., Kjeldsen, P., Spokas, K. (2009). Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. *Waste Manag. Res.* 27 (5), 409–455, 2009.
- Wolfram (2022). *Wolfram Mathematica*. 2022. Disponível em: <https://www.wolfram.com/mathematica/>. Acesso em: 10 de agosto de 2022.