

PERMEABILIDADE AO AR DE MISTURAS DE SOLO COM LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.16.25.XI-022>

Maria Eduarda Weber Correia da Silva (*), Márcia Maria dos Anjos Mascarenha

* Universidade Federal de Goiás, mariaweber@discente.ufg.br.

RESUMO

A emissão de metano (CH_4) em aterros sanitários representa uma das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa. A cobertura final dos aterros exerce papel decisivo na contenção do fluxo gasoso, sendo o comportamento hidráulico e a permeabilidade ao ar parâmetros determinantes para o desempenho dessa barreira. Este estudo avalia o efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (LETA) em misturas com solo utilizado como camada de cobertura. Foram analisadas duas composições, com 20 % e 40 % de LETA em massa seca, compactadas na umidade ótima. Determinaram-se as curvas características solo-água (CCSA) por ensaios de Tempe Cell e WP4C. A partir dessas curvas, estimou-se a permeabilidade não saturada e , em seguida, a permeabilidade efetiva ao metano. Os resultados indicam aumento da porosidade total e da saturação efetiva com a adição de LETA, acompanhado de redução do índice de distribuição de poros (λ) e da permeabilidade relativa ao ar, o que resulta em permeabilidades efetivas ao metano de duas a três ordens de grandeza inferiores às do solo natural. Conclui-se que o uso de LETA contribui para a melhoria da barreira gasosa, reforçando sua aplicabilidade em coberturas finais de aterros sanitários.

PALAVRAS-CHAVE: Metano, Aterro sanitário, Camada de cobertura, CCSA, Permeabilidade ao ar.

INTRODUÇÃO

A disposição final de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários é reconhecida como uma das principais fontes de emissão de metano (CH_4), gás de efeito estufa cujo potencial de aquecimento global é cerca de vinte vezes superior ao do dióxido de carbono. A liberação não controlada de CH_4 agrava as mudanças climáticas e representa riscos de explosividade e desconforto ambiental em áreas vizinhas (IPCC, 2021). Por esse motivo, normas técnicas e projetos de engenharia de aterros sanitários preveem sistemas de cobertura capazes de reduzir a migração de gases da massa de resíduos para a atmosfera (ABNT, 2019).

A cobertura final do aterro sanitário constitui o principal elemento dessa barreira, sendo normalmente composta por camadas de solo compactado que têm a dupla função de limitar a infiltração de água da chuva no maciço de resíduos e restringir a emissão dos gases de decomposição (ABNT, 2019; USEPA, 1991). Para que essa cobertura seja eficiente, é essencial compreender o comportamento do solo em condições não saturadas, pois o transporte de gases ocorre predominantemente nos poros preenchidos por ar e o teor de umidade afeta diretamente a condutividade gasosa.

A caracterização da relação entre sucção do solo e teor volumétrico de água — expressa pela curva característica solo-água (CCSA) — permite estimar, para diferentes condições de umidade, a fração de poros efetivamente disponíveis ao fluxo de gases (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012). Com base nessa curva, modelos consagrados na literatura, como o de Brooks e Corey (1964), possibilitam avaliar a permeabilidade relativa do ar e , a partir dela, estimar a permeabilidade efetiva ao metano.

Diversos estudos vêm avaliando o uso de materiais alternativos como substitutos ou complementos ao solo nas camadas de cobertura, Morselli *et al.* (2022) concluiu que o LETA é inadequado para ser utilizado sozinho em camada de cobertura de aterros sanitários e apresenta como proposta de uso em misturas com solo natural, assim como estudado por Prim (2011), Castilhos Junior, Prim e Pimentel (2011), Gonçalves *et al.* (2016), Mazzutti, Klamt e Faro (2023) e Lima (2025) sendo observado que a mistura com solo natural melhorou a vedação hidráulica, resultando em valores de permeabilidade compatíveis com os critérios técnicos estabelecidos.

Neste contexto, materiais alternativos como o lodo de estação de tratamento de água (LETA) surgem como opção para complementar o solo natural, oferecendo potencial de reaproveitamento de resíduos e redução de custos. Contudo, é necessário investigar como a presença de LETA altera a estrutura de poros e , consequentemente, a permeabilidade ao metano.

OBJETIVO

O presente estudo tem como objetivo avaliar a permeabilidade ao ar de misturas de solo com lodo de estação de tratamento de água (LETA), quando utilizadas como camada de cobertura de aterros sanitários.

METODOLOGIA

O solo estudado foi obtido em uma jazida localizada em um aterro sanitário privado localizado na cidade de Guapó-GO, sendo escolhido como material de estudo devido a sua utilização pelo aterro sanitário como camada de cobertura. O LETA, classificado por Lima (2025), foi coletado na Estação de Tratamento Meia Ponte, situada no bairro Floresta, na cidade de Goiânia-GO.

As misturas de solo com LETA adotadas nesta pesquisa foram definidas com base em proporções previamente estudadas por Lima (2025), que realizou a caracterização geotécnica das misturas com 20 e 40% de LETA em massa seca. A relação de proporções dos materiais do estudo foi então denominada como sendo:

- Mistura 1 - **SL20** – 80% Solo + 20% LETA;
- Mistura 2 - **SL40** – 60% Solo + 40% LETA.

Foram realizados os ensaios de compactação, por meio da NBR7182 (ABNT, 2025a), e massa específica dos grãos, por meio da NBR 6458 (ABNT, 2025b), com o objetivo de comparar as características do solo e das misturas analisadas com as classificações previamente apresentadas por Rodrigues (2024) e Lima (2025). Ambos os autores utilizaram material oriundo do mesmo local de coleta dessa pesquisa, porém em períodos distintos. A comparação dos resultados obtidos nos ensaios citados com os de estudos anteriores permite avaliar a consistência das propriedades geotécnicas do material em amostras coletadas em áreas distintas de uma mesma jazida, possibilitando o aproveitamento das caracterizações já realizadas.

Os valores da permeabilidade saturada (k), foram determinados por Rodrigues (2024) e Lima (2025) para materiais oriundos da mesma jazida e proporções de mistura.

Para a obtenção das propriedades hidráulicas em condições não saturadas, do solo e das misturas compactadas na umidade ótima, foram determinados os parâmetros da Curva Característica Solo Água (CCSA), por meio de dois equipamentos complementares, para abranger toda a faixa de sucções de interesse, são eles:

- **Tempe Cell**: utilizado para determinar a relação entre o teor de umidade volumétrica e a sucção em baixas tensões matriciais (faixa de 0 a 100 kPa).
- **WP4C (Dewpoint Potentiometer)**: utilizado para determinar a sucção em altas faixas de tensão (acima de 100 kPa).

Os ensaios de *Tempe Cell* foram realizados em duplicata para cada material. As amostras foram moldadas na umidade ótima de compactação, e divididas em duas camadas, sendo cada camada compactada estaticamente com o auxílio da prensa CBR (Figura 1a). Após o preenchimento das duas camadas, deixou-se uma fina camada de solo acima da cápsula (Figura 1b) a fim de garantir o contato entre o solo e a pedra porosa durante todo o ensaio. Concluída a compactação, procedeu-se à etapa de saturação das amostras por capilaridade, permitindo que a água ascendesse lentamente a partir da base da célula (Figura 1c). Essa fase de saturação durou cerca de 6 horas. Em seguida, as amostras foram submetidas a estágios de pressões de 2, 4, 8, 15, 30, 60 e 100 kPa (Figura 1d), tais pressões foram mantidas até que se obtivesse uma estabilização definida pela constância de massa do conjunto. Durante os ensaios registrou-se a massa do conjunto após a estabilização de cada estágio e após a aplicação de todas as pressões, cada célula foi desmontada e seu conteúdo levado para estufa para a determinação do teor de umidade final. A partir dos registros de massa obtidos ao longo das diferentes tensões, foi possível realizar a retroanálise das umidades correspondentes a cada estágio de sucção, obtendo-se os pontos da curva característica solo-água (CCSA) em toda a faixa de baixas sucções investigadas.

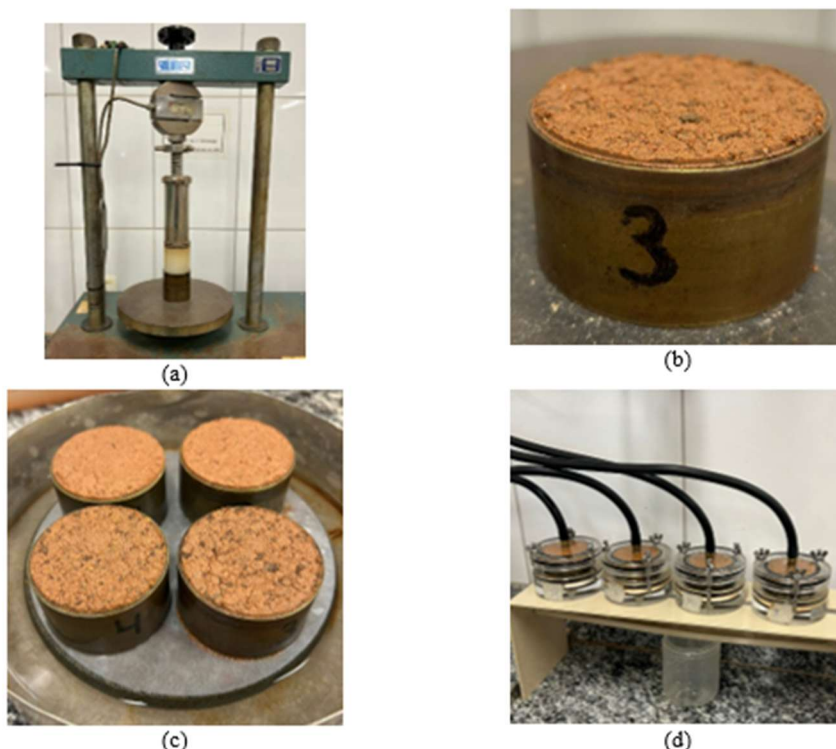


Figura 1: a) compactação das amostras; b) amostra compactada; c) saturação das amostras; d) execução do ensaio. Fonte: Autor do Trabalho.

Os corpos de provas utilizados nos ensaios de higrômetro de ponto de orvalho (WP4C) foram moldadas na umidade ótima de compactação. Para isso, utilizou-se uma peça metálica que permitiu pressionar e compactar o solo contra a cápsula, de modo que cerca de 50 % da altura interna da cápsula ficasse preenchida com o material a ser ensaiado (Figura 2a).

Após a compactação, as cápsulas foram colocadas em dessecador, onde permaneceram para que o material perdesse gradualmente umidade (Figura 2b). Esse procedimento possibilitou a obtenção de diferentes níveis de teor de água entre as cápsulas, cerca de 1 % a 2 % de variação de umidade entre elas, formando uma sequência de pontos de umidade para a construção da CCSA na faixa de altas tensões matriciais. Durante o período de secagem, a variação de massa das cápsulas foi monitorada em intervalos regulares, permitindo acompanhar a redução do teor de água. Para cada nível de umidade identificado, foram realizadas duas leituras consecutivas no WP4C na mesma cápsula (Figura 2c), a fim de garantir a reprodutibilidade dos resultados. Concluídas as leituras, o material de cada cápsula foi levado à estufa, para determinação do teor de umidade final de referência. Com base na variação de massa observada ao longo do ensaio e no teor de umidade determinado em estufa, foi possível retroanalisar os teores de umidade correspondentes a cada leitura de sucção, obtendo os pontos da CCSA na faixa de altas sucções.

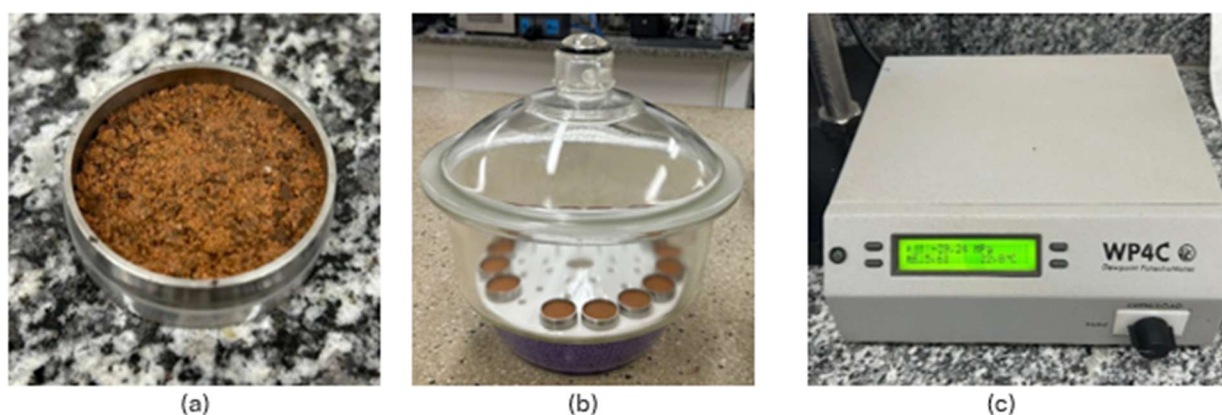


Figura 2: a) compactação das amostras; b) processo de secagem; c) execução do ensaio. Fonte: Autor do Trabalho.

Com os dados experimentais obtidos nos dois equipamentos, foi possível definir a CCSA para o solo natural e para cada mistura (SL20 e SL40), ajustando-as pelo modelo matemático de Gitirana Júnior e Fredlund (2004).

Com as curvas de retenção ajustadas, estimou-se a permeabilidade não saturada com base na formulação clássica de Brooks e Corey (1964). O procedimento adotado compreendeu as seguintes etapas:

- **Saturação efetiva** – A saturação efetiva (S_e) foi calculada a partir da Equação (1):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{equação (1)}$$

em que:

θ = é o conteúdo volumétrico de água para a umidade de interesse;
 θ_r = é o conteúdo volumétrico residual, obtido no ajuste da CCSA;
 θ_s = é o conteúdo volumétrico saturado, numericamente igual a porosidade.

- **Permeabilidade relativa da fase gasosa** – A permeabilidade relativa do ar ($k_{r,ar}$) foi determinada segundo a equação proposta por Brooks & Corey (1964) para a fase não molhante (Equação 2):

$$k_{r,ar}(S_e) = (1 - S_e)^2 \times \left(1 - S_e^{\frac{2+\lambda}{\lambda}}\right) \quad \text{equação (2)}$$

em que:

λ = índice de distribuição de poros, sendo a inclinação da CCSA.

- **Permeabilidade intrínseca** – A permeabilidade intrínseca (k_0) do material foi calculada a partir da condutividade hidráulica saturada da água (k_{sat}) pela Equação (3):

$$k_0 = \frac{k_{sat} \times \mu_w}{\rho_w \times g} \quad \text{equação (3)}$$

em que:

k_{sat} = condutividade hidráulica saturada (m/s);
 $\mu_w = 1,0 \times 10^{-3}$ Pa·s é a viscosidade dinâmica da água;
 $\rho_w = 1000$ kg/m³ é a densidade da água;
 $g = 9,81$ m/s² é a aceleração da gravidade.

Esses valores correspondem a condições de referência de laboratório em torno de 20–25 °C e 1 atm.

- **Permeabilidade efetiva ao metano** – A permeabilidade efetiva da fase gasosa (k_{ar}), representando o fluxo de metano, foi obtida multiplicando-se a permeabilidade intrínseca pelo fator de permeabilidade relativa (Equação 4):

$$k_{ar} = k_{r,ar}(S_e) \times k_0 \quad \text{equação (4)}$$

- **Conversão para condutividade hidráulica do metano** – Quando se deseja expressar o resultado em termos de condutividade hidráulica (m/s), a permeabilidade efetiva ao metano pode ser convertida pela Equação (5):

$$k_{CH_4} = \frac{k_{ar} \times \rho_{CH_4} \times g}{\mu_{CH_4}} \quad \text{equação (5)}$$

onde:

$\rho_{CH_4} = 0,65$ kg/m³ é a densidade do metano;
 $\mu_{CH_4} = 1,1 \times 10^{-5}$ Pa·s é a viscosidade dinâmica do metano.

Esses valores correspondem a condições de referência de laboratório em torno de 20–25 °C e 1 atm.

Dessa forma, foi possível avaliar a capacidade de fluxo gasoso do solo e das misturas, informação essencial para a compreensão do transporte de metano em camadas de cobertura de aterros sanitários e para verificar a influência do LETA na modificação das propriedades hidráulicas e gasosas do material utilizado como cobertura.

RESULTADOS

Os resultados obtidos permitiram avaliar o potencial dessas misturas em reduzir a migração de metano para a atmosfera e compará-las com camada de cobertura convencional (apenas solo compactado), contribuindo para o desenvolvimento de técnicas mais eficientes e ambientalmente adequadas de cobertura de aterros. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o resultado dos ensaios geotécnicos em comparação com os ensaios já realizados por outros autores.

Tabela 1. Resultados dos ensaios geotécnicos. Fonte: Autoras do Trabalho.

Material	Solo		SL20		SL40	
Autores	Rodrigues (2024)	Pesquisa atual	Lima (2025)	Pesquisa atual	Lima (2025)	Pesquisa atual
Peso específico dos grãos - γ_s (g/cm³)	2,59	2,59	2,49	2,55	2,32	2,51
Coefficiente de permeabilidade - k_{sat} (cm/s)	$1,36 \times 10^{-7}$	-	$4,06 \times 10^{-9}$	-	$3,84 \times 10^{-9}$	-
Umidade ótima - $w_{ótimo}$ (%)	21,5	20,3	26,0	26,0	31,0	31,5
Peso específico aparente seco máximo - γ_d (g/cm³)	1,56	1,59	1,45	1,44	1,35	1,34

Os valores obtidos para as misturas apresentaram variações em relação ao solo natural, sendo observada uma redução progressiva da massa específica dos grãos com o aumento do teor de LETA. Essa tendência é compatível com a menor densidade do lodo quando comparado ao solo de origem. A adição de LETA resultou em alterações nas curvas de compactação. As misturas apresentaram valores inferiores de peso específico seco máximo em comparação ao solo puro, além de um deslocamento da umidade ótima para valores superiores.

Os resultados obtidos são semelhantes aos valores apresentados por Rodrigues (2024) e Lima (2025) para materiais da mesma jazida e proporções de mistura, indicando consistência nas propriedades físicas do material e confirmando o potencial uso do LETA como componente de camadas de cobertura. As Figuras 3a, 3b e 3c apresentam as curvas características solo-água do solo natural, da mistura SL20 e da SL40, enquanto a Figura 3d reúne as três curvas para comparação direta.

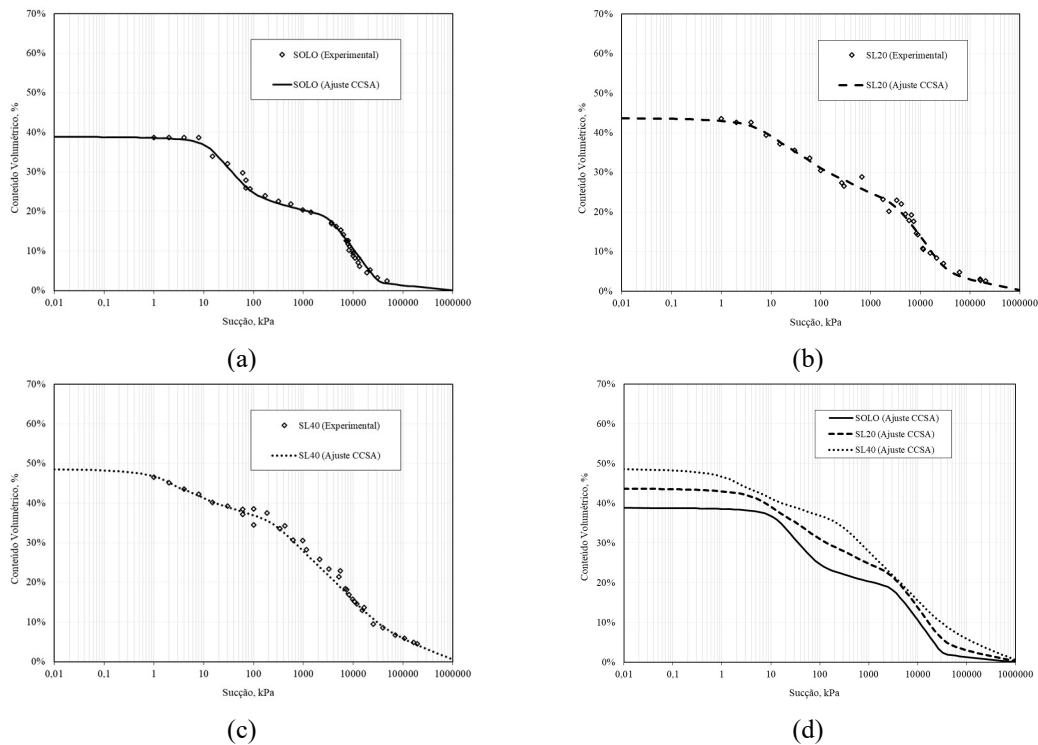


Figura 3: a) CCSA - SOLO; b) CCSA – SL20; c) CCSA – SL40; d) CCSA – SOLO + SL20 + SL40.

Fonte: Autoras do Trabalho.

O solo natural mostra uma clara bimodalidade, com dois pontos de inflexão: o primeiro, em baixas sucções, indica o início da dessaturação dos macroporos, e o segundo, em torno de 10^4 kPa, corresponde à drenagem dos microporos.

Com a adição de LETA observa-se redução progressiva da bimodalidade. Na mistura SL20, o primeiro ponto de inflexão ainda aparece, porém com menor destaque, e a transição para sucções intermediárias ocorre de forma mais contínua. O material fino do lodo tende a reduzir a continuidade e o tamanho dos macroporos, suavizando o contraste entre a drenagem inicial e a subsequente dos microporos.

Na mistura SL40, a curva apresenta comportamento unimodal. A perda de água ocorre de modo mais gradual e sem o patamar inicial típico da drenagem rápida de macroporos, indicando uma distribuição de poros mais uniforme. Essa mudança estrutural favorece a redução da permeabilidade ao ar em baixas sucções, contribuindo para o controle da emissão de metano em camadas de cobertura de aterros sanitários.

Na Tabela 2 constam os parâmetros geotécnicos e de retenção de água do solo e das misturas. Observa-se que o aumento do teor de LETA eleva a porosidade e o conteúdo volumétrico de água na umidade ótima, refletindo a menor densidade dos sólidos do LETA. O grau de saturação efetivo (S_e) cresce de forma progressiva, enquanto o índice de distribuição de poros (λ) diminui, indicando uma transição mais suave entre macro e microporos. Essa mudança estrutural explica a redução da permeabilidade relativa ao ar ($k_{r,ar}$) observada nas misturas.

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos e de retenção de água do solo e das misturas. Fonte: Autoras do Trabalho.

MATERIAL	γ_s (g/cm ³)	$w_{ótimo}$ (%)	γ_d (g/cm ³)	$n \approx \theta_s$	$\theta_{ótimo}$	θ_r	S_e	λ	$k_{r,ar}$
SOLO	2,59	20,3	1,59	0,386	0,323	0,019	0,826	0,229	0,026
SL20	2,55	26,0	1,44	0,431	0,375	0,035	0,849	0,139	0,021
SL40	2,51	31,5	1,34	0,466	0,423	0,062	0,895	0,134	0,009

A Tabela 3 mostra que a menor $k_{r,ar}$ das misturas, combinada com as respectivas permeabilidades intrínsecas, resulta em k_{ar} e em condutividades hidráulicas do metano significativamente inferiores às do solo natural. Isso confirma que a adição de LETA, apesar de aumentar a porosidade total, gera um estado de compactação mais saturado e menos favorável ao fluxo de gases, reforçando o potencial das misturas para atuarem como barreira à migração de metano em camadas de cobertura de aterros sanitários.

Tabela 3. Permeabilidade efetiva e condutividade hidráulica do metano. Fonte: Autoras do Trabalho.

MATERIAL	$k_{r,ar}$	k_0 (m ²)	k_{ar} (m ²)	k_{CH_4} (m/s)
SOLO	0,026	$1,39 \times 10^{-16}$	$3,6 \times 10^{-18}$	$2,1 \times 10^{-12}$
SL20	0,021	$4,14 \times 10^{-18}$	$8,7 \times 10^{-20}$	$5,1 \times 10^{-14}$
SL40	0,009	$3,91 \times 10^{-18}$	$3,5 \times 10^{-20}$	$2,1 \times 10^{-14}$

Nota: $\rho_{CH_4} \approx 0,65$ kg m⁻³ e $\mu_{CH_4} \approx 1,1 \times 10^{-5}$ Pa s.

CONCLUSÕES

A incorporação de lodo de estação de tratamento de água (LETA) ao solo de cobertura provocou redução da massa específica dos grãos e da densidade seca máxima, e um aumento da umidade ótima de compactação de 20,3 % no solo natural para 26,0 % na mistura SL20 e 31,5 % na SL40, efeito coerente com as características físicas do lodo. Os valores obtidos mantêm-se compatíveis com os reportados na literatura (Rodrigues, 2024; Lima, 2025), demonstrando que os materiais analisados apresentam comportamento reprodutível mesmo quando coletados em áreas distintas de uma mesma jazida.

Os resultados mostraram que a adição de LETA, em teores de 20 % e 40 % em massa seca, aumentou a porosidade total e o teor de água na umidade ótima de compactação, elevando os graus de saturação efetiva. Paralelamente, observou-se redução do índice de distribuição de poros (λ) e da permeabilidade relativa ao ar ($k_{r,ar}$). A combinação desses fatores levou a uma redução de duas a três ordens de grandeza na permeabilidade efetiva ao metano das misturas em comparação ao solo natural, evidenciando maior resistência ao fluxo gasoso mesmo com porosidade total mais elevada.

Conclui-se que a adição de LETA ao solo de cobertura potencializa a função de barreira à emissão de CH₄, configurando uma solução técnica ambientalmente adequada para coberturas finais de aterros sanitários, contribuindo de forma significativa para a mitigação de gases de efeito estufa.

As autoras gostariam de agradecer a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG/GO) pelo apoio recebido por meio do projeto “Avaliação da influência da adição de materiais alternativos nos parâmetros geotécnicos de um solo empregado como camada de cobertura de um aterro de resíduos sólidos” (n.º 202310267000214) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade em pesquisa da coautora MMA Mascarenha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Solo – Determinação da massa específica dos grãos**. Rio de Janeiro, 2025b.
2. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2025a.
3. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419:2019 – Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 2019.
4. BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**. Colorado: Colorado State University, 1964.
5. CASTILHOS JUNIOR, AB.; PRIM, E.C.C.; PIMENTEL, F.J.G.; Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário. **Estudos Tecnológicos**. Vol. 7, nº 2, p. 86-97, 2011.
6. FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
7. GITIRANA JÚNIOR., Gilson de F. N.; FREDLUND, Delwyn G. Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 130, n. 2, p. 209-212, fev. 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:2(209).
8. GONÇALVES, F.; SOUZA, C.H.U.; TAHIRA, F.S.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R.S.; Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. **Revista DAE**, 2016, p. 5-14.
9. IPCC – **Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
10. LIMA, E. A. F. L.; SANTOS FILHO, D. A. dos; MASCARENHA, M. M. dos A. Relatório Parcial de Iniciação Científica: **Avaliação geotécnica de solo e lodo (ETA) para uso em camada de cobertura alternativa de aterro de resíduos sólidos**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, 2025. 33 p. Relatório de Iniciação Científica (não publicado).
11. MAZZUTTI, E. A.; KLAMT, R. A.; FARO, V. P. Study of the hydro-mechanical behavior of a stabilized soil with water treatment plant sludge for application in sanitary landfills. **Soils and Rocks**, São Paulo, v. 46, n. 1, 2023.
12. MORSELLI, L. B.G.A.; CARMO, L.A.G.; QUADRO, M.S.; ANDREAZZA, R. Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo. **Scientia Plena**, v. 18, n. 5, p. 1-11, 2022.
13. PRIM, E.C. **Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário**. 2011. 279 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
14. RODRIGUES, F. W. A. **Caracterização geotécnica do solo empregado como camada de cobertura de um aterro sanitário**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Goiânia, 2024.