



Avaliação da viabilidade técnica do uso de lodo de estação de tratamento de água em camadas de cobertura de aterros sanitários

Evaluation of the technical feasibility of using water treatment plant sludge in landfill cover layers

E. A. F. L. Lima; D. A. S. Filho; P. S. Scalize; F. W. A. Rodrigues;
L. R. G. Oliveira; M. M. A. Mascarenha

Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, 74605-220, Goiânia-Goiás, Brasil

**marciamascarenha@ufg.br*

(Recebido em 31 de julho de 2025; aceito em 03 de novembro de 2025)

O manejo inadequado do lodo de estação de tratamento de água (LETA) gera impactos ambientais, exige grandes áreas para armazenamento e eleva os custos de transporte e disposição final. A sua aplicação como material de cobertura em aterros sanitários surge como alternativa para promover a gestão sustentável de resíduos sólidos. Este trabalho verifica a viabilidade técnica de uso de misturas de solo com 20% e 40% de LETA em camadas de coberturas de aterros sanitários. A ETA Meia Ponte, gerenciada pela SANEAGO, no estado de Goiás, foi utilizada como estudo de caso. Foram executados levantamento da produção de LETA por meio do método da Association Française pour l'Étude des Eaux (AFEE), ensaios de caracterização geotécnica e de permeabilidade, de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e os resultados obtidos foram comparados aos parâmetros estabelecidos por agências ambientais. A geração de LETA foi estimada em cerca de 4.500 toneladas de lodo, entre 2021 e 2022, apenas na ETA Meia Ponte. Esse volume sem mistura com o solo é suficiente para construir em torno de 1.000 m² de uma camada de cobertura. O solo e as misturas apresentaram características físicas e hidráulicas compatíveis com os requisitos técnicos para aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários. A proposta representa uma alternativa sustentável para o aproveitamento de resíduos gerados em estações de tratamento de água, contribuindo para a redução de impactos ambientais e a promoção da economia circular na gestão de resíduos sólidos.

Palavras-chave: reutilização de resíduos, cobertura de aterro, impermeabilidade.

Inadequate management of water treatment plant sludge (WTS) generates environmental impacts, requires large areas for storage and increases transportation and final disposal costs. Its application as a cover material in landfills has emerged as an alternative to promote sustainable solid waste management. The aim of this study is to verify the technical feasibility of using soil mixtures with 20% and 40% LETA in landfill cover layers. The Meia Ponte WTP, managed by SANEAGO in the state of Goiás, was used as a case study. WTS production was estimated using the method of the Association Française pour l'Étude des Eaux (AFEE). geotechnical characterization and permeability tests, in accordance with the standards of the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). The results were analyzed according to the parameters required by technical standards and criteria established by environmental agencies. The generation of WTS was estimated at around 4,500 tons of sludge between 2021 and 2022 at the Meia Ponte WTP. This volume is enough to build around 1,000 m² of cover layer. The mixtures of soil and WTS, in proportions of 20% and 40%, have physical and hydraulic characteristics compatible with the technical requirements for application in landfill cover layers. The proposal is a sustainable alternative for the use of waste generated in water treatment plants, contributing to the reduction of environmental impacts and the promotion of the circular economy in solid waste management

Keywords: waste reuse, landfill cover, impermeability.

1. INTRODUÇÃO

A camada de cobertura final dos aterros sanitários constitui um elemento essencial de proteção ambiental, pois atua como uma barreira física que reduz a entrada de água da chuva no maciço de resíduos e, simultaneamente, controla a saída de gases gerados pela decomposição da matéria orgânica. Essa função é fundamental para minimizar a geração de lixiviado, que pode provocar a

contaminação do solo e das águas subterrâneas, além de mitigar a emissão de gases de efeito estufa, como o metano, que comprometem a qualidade do ar e a estabilidade da cobertura. Esse contexto evidencia a importância de se analisar a eficiência do material em restringir a percolação de líquidos e, consequentemente, em reduzir a produção de lixiviado, condição especialmente crítica em regiões semiáridas, onde a variação de umidade pode comprometer a durabilidade das barreiras [1]. No Brasil, utiliza-se comumente o solo compactado como material de cobertura. No entanto, sua eficiência pode ser comprometida por fatores climáticos, favorecendo o escape de biogás e reduzindo sua função como barreira impermeabilizante [2, 3].

Diante dessa limitação, diversas pesquisas vêm explorando o uso de materiais alternativos na composição dessas camadas, com destaque para resíduos oriundos de outros processos produtivos [4]. Entre os materiais já investigados encontram-se o fosfogesso [5, 6], resíduos de construção e demolição – RCD [7-9] e o lodo de estação de tratamento de água (LETA) [10]. O LETA tem se mostrado promissor por sua composição predominantemente inorgânica, com frações de argila, silte e areia fina, semelhante à dos solos [11]. Estudos apontam sua aplicação em camadas impermeabilizantes de aterros, bases e sub-bases [12] de pavimentos rodoviários [13] e em estabilização de solos moles [14, 15].

Além da viabilidade técnica, a reutilização do LETA está alinhada à Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) [16], principalmente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 e 11. O ODS 6 trata da gestão sustentável da água e do saneamento, destacando que o reaproveitamento do lodo reduz o volume de descarte em corpos hídricos ou áreas sensíveis. Já o ODS 11 promove a criação de cidades mais sustentáveis, ao incentivar a valorização de resíduos e práticas de economia circular.

Nesse contexto, a Companhia de Saneamento de Goiás (SANEAGO), responsável pelo abastecimento de água de grande parte do estado de Goiás, opera em 223 municípios goianos. Na ETA Meia Ponte, que possui capacidade de 2.000 L/s [17], estima-se que o volume de lodo gerado corresponda a aproximadamente 2,8% da água tratada, valor compatível com a faixa de 0,2% a 5,0% encontrada na literatura [18].

Além das vantagens ambientais e da semelhança composicional do LETA com solos argilosos, destaca-se que sua aplicação em camadas de cobertura ou impermeabilizantes de aterros exige atenção a parâmetros técnicos específicos. A propriedade fundamental nesse contexto é o coeficiente de permeabilidade (k), por influenciar diretamente na eficiência da barreira física. Conforme discutido por Morselli et al. (2022) [10], a norma ABNT NBR 13.896:1997 estabelece que, para planos de encerramento ou cobertura de aterros de resíduos não perigosos, o material empregado deve apresentar k inferior ao do solo natural da área, sendo o limite de 5×10^{-5} cm/s indicado para camadas impermeabilizantes. No entanto, ainda não existem normas brasileiras específicas que definam padrões geotécnicos obrigatórios para a cobertura de aterros, reforçando a importância de pesquisas que avaliem alternativas como o uso de resíduos com propriedades compatíveis com as exigências técnicas desse tipo de aplicação.

Este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica da incorporação do LETA a um solo utilizado como cobertura de um aterro sanitário, buscando reduzir a quantidade de solo utilizado e aumentar o aproveitamento de um material residual com potencial de aplicação. A pesquisa aborda a caracterização geotécnica de misturas contendo 20% e 40% de LETA, com foco na análise de suas propriedades físicas e hidráulica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Levantamento da produção de lodo de estação de tratamento de água (LETA)

A primeira etapa da pesquisa consistiu na estimativa de produção de lodo em uma das principais estações de tratamento de água (ETA) do município de Goiânia, utilizando o método AFEE [19], que consiste em uma equação empírica desenvolvida a partir de dados operacionais de estações de tratamento de água, cujo objetivo é estimar a geração de lodo com base em parâmetros como turbidez da água bruta e dosagem de coagulante aplicada. No estudo de Motta et al. (2019) [20] os autores também aplicaram diferentes modelos de estimativa de produção de lodo em ETAs e verificaram que o AFEE apresentou os resultados mais consistentes, com menor

dispersão em relação à média quando comparado aos demais métodos avaliados. Essa característica conferiu ao modelo maior confiabilidade, pois reduziu as variações e incertezas associadas às estimativas. Os dados foram obtidos por meio de boletins informativos disponibilizados pela SANEAGO, contendo as seguintes informações como vazão de água, dosagem de coagulante, turbidez e cor da água tratada. Essas informações foram organizadas em planilhas eletrônicas, possibilitando a construção de gráficos comparativos entre os métodos de medição e a produção mensal de lodo.

2.2 Coleta dos materiais

O solo utilizado na pesquisa foi coletado no aterro sanitário “Resíduo Zero Ambiental”, localizado na Rodovia GO-219, km 12, Fazenda Serrinha, no município de Guapó – GO, a aproximadamente 36 km de Goiânia. O lodo foi obtido diretamente da lagoa de secagem da ETA Meia Ponte (Figura 1), situada no bairro Floresta, em Goiânia, cuja capacidade de tratamento é de 2.000 L/s, responsável pelo abastecimento das regiões Norte, Noroeste, Oeste e Sudoeste da cidade. Ambos os materiais foram acondicionados e transportados ao Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Goiás (UFG) para posterior caracterização.

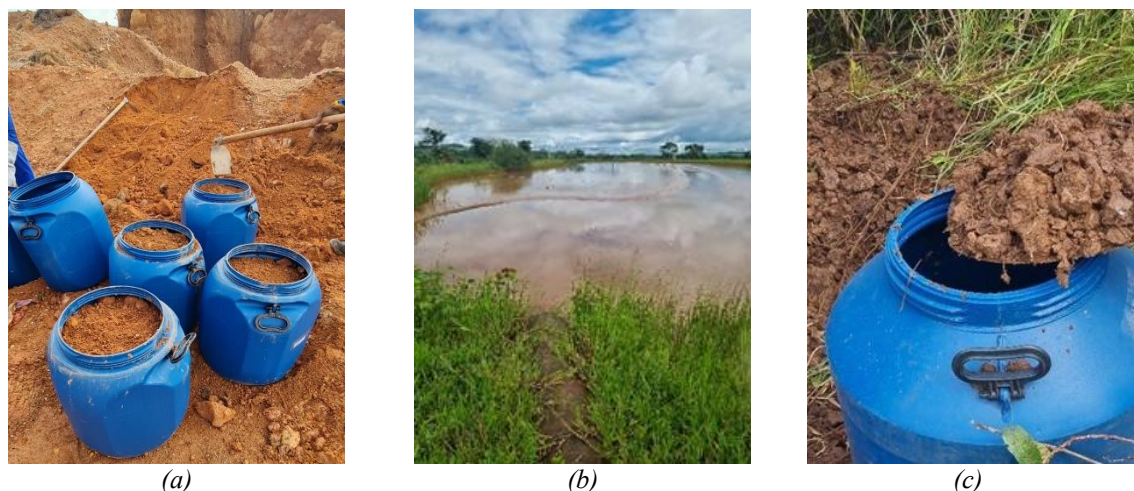


Figura 1: Coleta do solo no aterro sanitário “Resíduo Zero Ambiental” a), lagoa de armazenamento de lodo na ETA Meia Ponte (b), coleta do lodo em lagoa encerrada com material em estado mais sólido (c).

2.3 Caracterização do solo, do lodo e da mistura

A preparação, caracterização e estudo do comportamento hidráulico do solo e das misturas com 20% e 40% de LETA foram realizadas de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), listadas a seguir. Na Figura 2 constam algumas etapas da execução dos ensaios.

- i. NBR 6457: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização [21].
- ii. NBR 6408: Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água [22].
- iii. NBR 6459: Determinação do limite de liquidez [23].
- iv. NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade [24].
- v. NBR 7181: Análise granulométrica [25].
- vi. NBR 7182: Ensaio de compactação [26].
- vii. NBR 14545: Determinação do coeficiente de permeabilidade [27].



Figura 2: Preparação do LETA para ensaios de caracterização (a), secagem do material para atingir a umidade higroscópica (b), ensaio de determinação da massa específica (c), peneiramento fino para ensaio de análise granulométrica (d), ensaio de compactação (e) e determinação do coeficiente de permeabilidade (f).

2.4 Parâmetros técnicos para avaliação da camada de cobertura

Para avaliar a viabilidade do uso do LETA como material de cobertura de aterros sanitários, os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais foram comparados aos parâmetros exigidos por normas técnicas e critérios estabelecidos por agências ambientais, sistematizados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros requeridos para avaliação da camada de cobertura.

Norma reguladora	Permeabilidade à água (m/s)	Limites de consistência (%)	Percentual de Finos (%)	Espessura (m)	Classificação (SUCS ¹)
CETESB [28]	$\leq 10^{-9}$	IP ≥ 15 LP ≥ 30	> 30	0,6	CL, CH, SC e OH
ABNT [29]	$\leq 10^{-8}$	-	-	-	-
Diretiva do Conselho da UE [30]	$\leq 10^{-9}$	IP: 20 ~ 30	> 30	$\geq 0,50$	-
USEPA [31]	$\leq 10^{-9}$	IP: 7 ~ 15	30 ~ 50	0,30 ~ 0,60	-

¹Sistema Unificado de Classificação de Solos.

Nota: IP = Índice de Plasticidade; LP = Limite de Plasticidade; CL = argila de baixa compressibilidade; CH = argila de alta compressibilidade; SC = areia com argila; OH = orgânicos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Levantamento da produção de lodo de estação de tratamento de água (LETA)

Com base nos dados dos boletins informativos da SANEAGO e na aplicação do método AFEE, estimou-se que a ETA Meia Ponte produziu 4.010 toneladas de lodo em 2021 e 4.705 toneladas em 2022, e os valores mensais obtidos estão apresentados respectivamente nas Figuras 3 e 4. Esses valores evidenciam a geração contínua e variável sazonalmente de resíduos na ETA Meia Ponte. Destaca-se a importância de estratégias alternativas para sua destinação adequada, como o uso em camadas de cobertura de aterros sanitários.

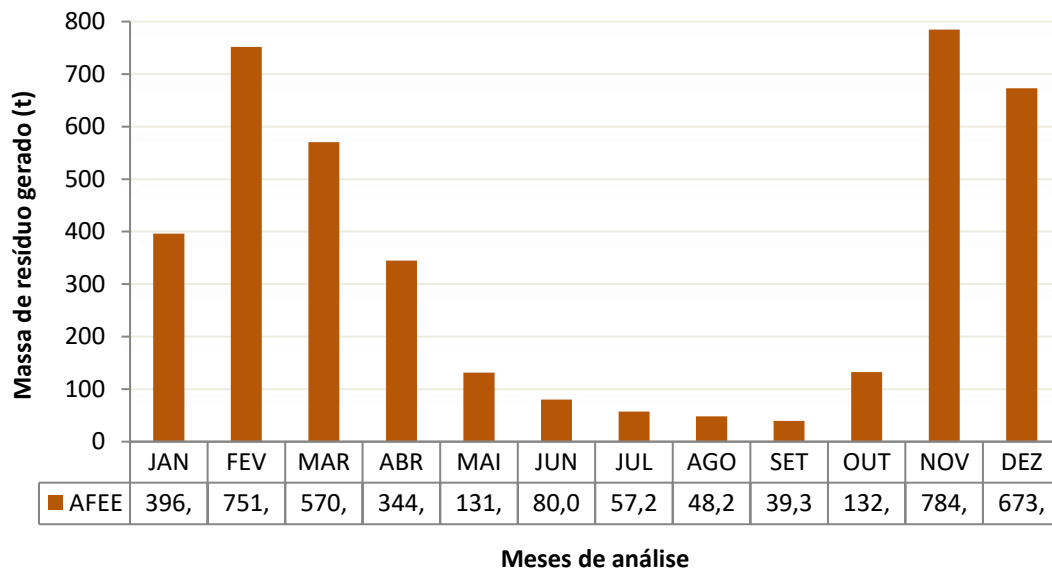


Figura 3: Quantificação de LETA gerado pelo método AFEE no ano de 2021.

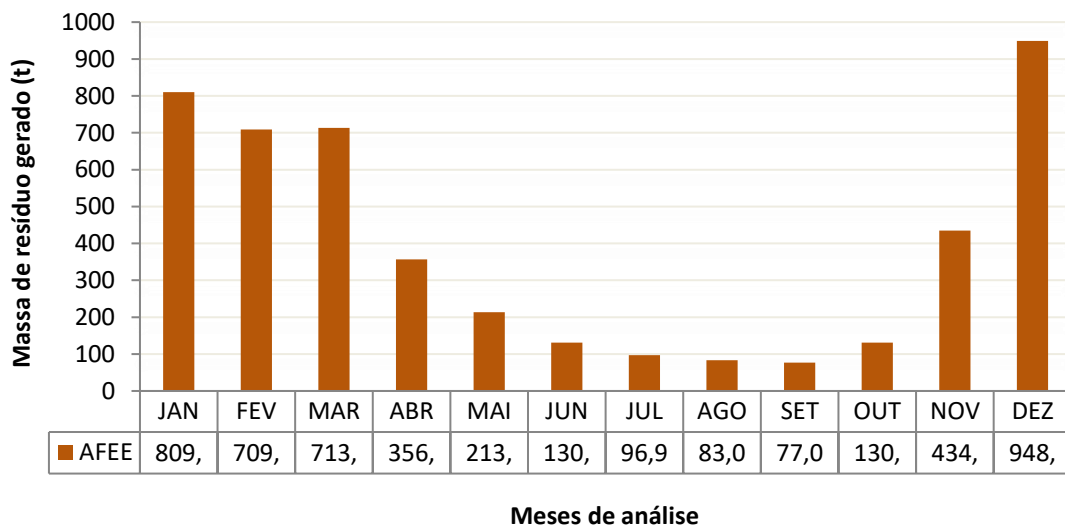


Figura 4: Quantificação de LETA gerado pelo método AFEE no ano de 2022.

Como pode-se observar, a quantidade de LETA gerada está em função das características da água bruta ao longo do ano, sendo que no período chuvoso a quantidade de sólidos é maior que em períodos de estiagem, o que requer maior quantidade de produto químicos, refletindo em maior geração de LETA.

A título de comparação, a ETA de Campo Mourão, localizada no estado do Paraná que apresenta capacidade de tratamento de 180 L/s, ou seja, cerca de onze vezes menor que a da ETA Meia Ponte (2.000 L/s), de Almeida (2010) [32] verificou que a produção de lodo também variou significativamente em função da sazonalidade. As diferenças em relação à quantificação indicam que a produção de lodo na ETA Meia Ponte é proporcionalmente mais elevada, resultado que pode estar associado a fatores como maior turbidez e concentração de sólidos suspensos na água bruta do Ribeirão Meia Ponte, além de diferenças operacionais, como a frequência de descargas de fundo dos decantadores e as rotinas de lavagem de filtros.

Já tratando-se de escalas globais, o valor analisado de 11 a 13 t/dia representa cerca de 0,1% da taxa global estimada de 10.000 t/dia mensurada por Caniani et al. (2013) [33], em comparativo com o sistema de abastecimento do sul da Itália que, apesar de diferentes contextos operacionais e escalas de produção, a ordem de grandeza da geração de lodo por volume tratado mantém-se consistente, reforçando a validade dos resultados obtidos na presente pesquisa.

3.2 Ensaios de caracterização

Foi realizada a caracterização inicial do LETA, que revelou um teor médio de umidade de 111%, valor elevado que indica alta capacidade de retenção hídrica, atribuída à predominância de partículas finas e elevada área superficial específica. Devido a essa característica, foi necessário realizar a secagem do material conforme a NBR 6457 [21], antes da execução dos ensaios laboratoriais. Após homogeneização e destorroamento, o lodo apresentou comportamento físico similar ao de solos argilosos (Tabela 2).

Tabela 2: Caracterização geotécnica do solo e das misturas solo e LETA em diferentes proporções.

Propriedades	Solo	20% LETA	40% LETA
Massa específica dos grãos (g/cm^3)	2,59	2,49	2,32
Limite de liquidez (%)	44	43	47
Limite de plasticidade (%)	27	33	40
Índice de plasticidade (%)	17	10	7
Classificação SUCS	ML-CL	ML	ML-CL

Nota: ML-CL = solo fino, misto entre silte e argila com baixa plasticidade; ML = solo siltoso com baixa plasticidade.

A massa específica dos grãos do lodo *in natura* foi de $2,06 \text{ g/cm}^3$, inferior à do solo do aterro ($2,59 \text{ g/cm}^3$), o que causou reduções na massa específica proporcional às adições do LETA ao material, comportamento semelhante ao encontrado por Mazzutti et al. (2023) [34] onde a massa específica do solo, inicialmente de $3,01 \text{ g/cm}^3$, apresentou reduções de 2,13% com 15% de lodo, 10,47% com 30% e 13,92% com 50%. De forma semelhante, no presente estudo, o solo com massa específica de $2,59 \text{ g/cm}^3$ apresentou redução de 3,86% quando incorporado 20% de lodo e de 10,42% com 40% de lodo (Tabela 2). Apesar das diferenças nos valores absolutos, ambos os trabalhos confirmam a mesma tendência de diminuição progressiva da massa específica dos grãos conforme aumenta o teor de lodo, evidenciando a coerência com a presença de minerais de baixa densidade e elevada porosidade no resíduo. A adição de LETA também resulta em incremento do limite de plasticidade do solo, e consequente redução do índice de plasticidade. Estes dados são coerentes com as porcentagens granulométricas apresentadas na Tabela 3, onde percebe-se que a adição de LETA incrementa a porcentagem de silte, que é um solo fino com baixa plasticidade, corroborando também com a mudança de classificação, passando de um solo transicional entre silte e argila de baixa plasticidade para silte de baixa plasticidade.

No estudo desenvolvido por Prim (2011) [35], em que se avaliou a utilização conjunta de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterros sanitários, foi observado que a incorporação do resíduo ao solo resultou na redução do índice de plasticidade (IP) em aproximadamente 50%, efeito atribuído ao aumento da fração arenosa e à presença de maior quantidade de matéria orgânica e minerais no lodo. De forma semelhante, nesta pesquisa, utilizando-se apenas o lodo de ETA, constatou-se também a diminuição do IP, com redução de

41% ao se adicionar 20% de lodo e 59% com 40% de lodo, embora o efeito seja levemente menos acentuado, possivelmente devido à menor presença de matéria orgânica e minerais presentes no lodo de ETA em comparação ao lodo de ETE. Além disso, em ambas as pesquisas, verificou-se que a massa específica dos grãos diminuiu com a adição do lodo, refletindo a composição menos densa do resíduo, essa redução, associada ao decréscimo da plasticidade, sugere benefícios em aplicações geotécnicas, conferindo maior estabilidade e menor susceptibilidade a variações volumétricas.

Tabela 3: Frações granulométricas do solo e das misturas solo e LETA em diferentes proporções.

Frações	Solo		20% LETA		40% LETA	
	CD	SD	CD	SD	CD	SD
Pedregulho: grãos maiores que 2 mm (%)	7,8	7,8	1,5	1,5	16,0	16,0
Areia: grãos entre 2 mm e 0,06 mm (%)	36,1	34,1	32,4	36,4	25,0	31,0
Silte: grãos entre 0,06 mm e 0,02 mm (%)	3,1	18,3	4,1	11,49	17,0	17,0
Argila: grãos menores que 0,02 mm (%)	53,0	39,8	62,1	50,57	42,0	37,0

Nota: CD = com defloculante; SD = sem defloculante.

3.2 Avaliação do comportamento mecânico e hidráulico

Os ensaios de compactação permitiram determinar a massa específica seca máxima e a umidade ótima de cada material (Tabela 4), parâmetros fundamentais para avaliar o comportamento do solo e das misturas em campo, especialmente no que se refere à sua densidade e necessidade de água para compactação eficiente.

O solo *in natura* apresentou uma massa específica seca de 1,60 g/cm³ e uma umidade ótima de 21,5%, indicando boa capacidade de compactação com teor de umidade moderado. Enquanto a mistura com 20% de LETA apresentou redução da massa específica seca para 1,45 g/cm³ e aumento da umidade ótima para 26%. Essa mudança é esperada devido à introdução de partículas mais finas e leves no material, que exigem maior teor de água para obter boa compactação. Já na mistura com 40% de LETA, observou-se nova redução da massa específica seca para 1,35 g/cm³ e aumento da umidade ótima para 31%, o que reforça a tendência de aumento na demanda por água com o incremento do teor de LETA.

Tabela 4: Resultados obtidos dos ensaios de avaliação do comportamento mecânico e hidráulico.

Propriedades	Materiais		
	Solo	20% LETA	40% LETA
Massa esp. aparente seca (g/cm ³)	1,6	1,45	1,35
Umidade ótima (%)	21,5	26	31
Permeabilidade (m/s)	$1,4 \times 10^{-9}$	$4,6 \times 10^{-9}$	$3,8 \times 10^{-9}$

Um comportamento semelhante foi identificado nos estudos de Roque et al. (2022) [36], onde foram preparadas misturas nas proporções 5:1, 4:1 e 3:1 (solo:lodo), e realizados ensaios de caracterização ambiental e geotécnica. Os resultados indicaram que a adição de lodo ao solo não alterou significativamente a granulometria, mas provocou aumento da umidade ótima, enquanto a densidade seca máxima diminuiu à medida que o teor de lodo aumentava, assim como os resultados obtidos nesta pesquisa também mostraram incremento da umidade ótima e redução da densidade seca máxima com o aumento do teor de lodo (20% e 40%).

Tais características são típicas de materiais com elevada quantidade de finos e contribuem para a adequação do material como camada de cobertura, pois favorecem a coesão e a vedação. Os

coeficientes obtidos no ensaio de compactação, sendo eles, a massa específica aparente seca e a umidade ótima, assim como a permeabilidade dos materiais são apresentados na Tabela 4.

Os valores obtidos indicam que todos os materiais apresentam baixa permeabilidade, condição essencial para camadas de cobertura em aterros sanitários, pois limitam a infiltração da água da chuva e, conseqüentemente, reduzem a formação de chorume e a contaminação dos aquíferos. Mesmo com o aumento da fração de LETA, os coeficientes permaneceram dentro da faixa aceitável para barreiras hidráulicas, o que reforça o potencial técnico das misturas propostas, em relação ao grau de permeabilidade. Estes resultados corroboram com o coeficiente de permeabilidade (10^{-9} m/s) obtido em misturas de LETA com solo fino na proporção de 15, 30 e 50%, como apresentado por Mazzutti et al. (2023) [34].

3.3 Viabilidade do uso da utilização das misturas solo e LETA em camadas de cobertura

Na Tabela 5 é apresentado a síntese dos parâmetros físicos e geotécnicos do solo e das misturas comparados aos parâmetros exigidos por normas técnicas e critérios estabelecidos por agências ambientais.

Observa-se que o solo e as misturas atendem aos critérios técnicos da USEPA [31] e ABNT [29] e atendem a todas as normas quanto aos critérios de permeabilidade e porcentagem de finos. No entanto, não atendem aos critérios de limites de consistência estabelecido pela Diretiva do Conselho da EU [30] e pela CETESB [28], tal qual encontrado por Roque et al. (2022) [36] que obteve valores de índice de plasticidade abaixo de 30% tanto do solo *in natura* quanto das misturas. Vale ressaltar que esses critérios físicos são estabelecidos a partir do comportamento de solos típicos de regiões de clima temperado, que devido ao processo de formação de solos, são compostos por finos com mais afinidade à água do que os solos formados em regiões tropicais. E, por isso, os limites de consistência não são parâmetros físicos adequados para estimar o comportamento hidromecânico de solos tropicais [37].

Tabela 5: Verificação da viabilidade de uso das misturas em camadas de cobertura.

Norma reguladora	Permeabilidade à água (m/s)	Limites de consistência (%)	Percentual de Finos (%)	Espessura (m)	Classificação (SUCS)
Solo	$1,4 \times 10^{-9}$	IP = 17 LP = 44	CD = 56,1 SD = 58,1		ML-CL
Mistura 20% LETA	$4,6 \times 10^{-9}$	IP = 10 LP = 33	CD = 66,2 SD = 62,1	-	ML
Mistura 40% LETA	$3,8 \times 10^{-9}$	IP = 7 LP = 40	CD = 59,0 SD = 54,0	-	ML - CL
CETESB [26]	$\leq 10^{-9}$	IP ≥ 15 LP ≥ 30	> 30	0,6	CL, CH, SC e OH
ABNT [27]	$\leq 10^{-8}$	-	-	-	-
Diretiva do Conselho da UE [28]	$\leq 10^{-9}$	IP: 20 ~ 30	> 30	$\geq 0,50$	-
USEPA [29]	$\leq 10^{-9}$	IP: 7 ~ 15	30 ~ 50	0,30 ~ 0,60	-

Portanto, o uso de leta em proporções de até 40% na mistura com solo do aterro é tecnicamente viável, apresentando características favoráveis à aplicação em camadas de cobertura. Semelhante ao que propõe Mazzutti et al. (2023) [34], onde foi sugerido um percentual de 30% na mistura com leta devido não apenas à permeabilidade, mas também por parâmetros adicionais analisados, pois essa proporção apresentou uma maior resistência à compressão simples. A proposta

representa uma alternativa sustentável para o aproveitamento de resíduos gerados em estações de tratamento de água, contribuindo para a redução de impactos ambientais e a promoção da economia circular na gestão de resíduos sólidos.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que o uso do lodo de estação de tratamento de água (LETA), misturado ao solo em proporções de 20% e 40%, apresenta características físicas e hidráulicas compatíveis com os requisitos técnicos para aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários.

A adição do resíduo alterou as propriedades do solo de forma controlada e previsível, com destaque para a redução da massa específica dos grãos, o acréscimo do teor de silte, o aumento da umidade ótima de compactação e a manutenção de baixos coeficientes de permeabilidade – um parâmetro essencial para minimizar a infiltração de água da chuva e a consequente geração de chorume.

A viabilidade técnica verificada reforça o potencial do LETA como um insumo complementar, e não como substituto integral do solo, permitindo a redução do volume de solo natural necessário e promovendo a valorização de um resíduo que, de outra forma, demandaria áreas específicas para disposição. A abordagem adotada contribui com os princípios da economia circular e está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos sólidos urbanos.

Além disso, a metodologia aplicada – envolvendo caracterização geotécnica, compactação e permeabilidade – mostrou-se eficaz para avaliação técnica do material, oferecendo base confiável para a tomada de decisões em futuros projetos de engenharia sanitária. A continuidade da pesquisa com teores mais elevados de LETA (acima de 40%) amplia as perspectivas de aproveitamento do resíduo, desde que mantidos os parâmetros adequados de desempenho.

Portanto, a utilização do LETA como componente de misturas para camadas de cobertura em aterros sanitários representa uma alternativa tecnicamente viável, ambientalmente segura e estrategicamente importante para a gestão de resíduos sólidos e valorização de subprodutos do tratamento de água.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores 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 pela bolsa de pós-doutorado do co-autor D. A. S. Filho, desenvolvido na Universidade Federal de Goiás. Os autores também agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de iniciação científica da primeira autora e das bolsas de produtividade em pesquisa dos coautores M.M.A. Mascarenha (Processo: 304529/2025-7) e P.S. Scalize (Processo: 310389/2025-9) e aos parceiros de pesquisa (Saneago e Resíduo Zero Ambiental) pelo fornecimento de materiais.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Silva TFD, Santos JJDN, Souza JCMD, Araújo PDS, Paiva WD. Comportamento da permeabilidade não saturada em camada de cobertura de aterro sanitário no semiárido brasileiro. *Eng Sanit Amb*. 2022;27(5):1049-57. doi: 10.1590/S1413-415220220108
2. Lopes RL, Jucá JFT, Mariano MOH, Maciel FJ. Camadas de cobertura metanotróficas como alternativas para gerenciamento de gases de efeito estufa em aterros sanitários. *Holos*. 2010;4(1):3-18. doi: 10.15628/holos.2010.461
3. Mariano MOH, Jucá JFT. Eficiência das camadas de cobertura na retenção de emissões de biogás em aterros sanitários: estudo de caso em Olinda, PE Brasil. *Rev Águas & Resíduos*. 2011;08731713.

4. Franqueto R, Martins EH, Cabral AR, Schimer WN. Monitoramento de emissões fugitivas a partir da camada de cobertura de aterro sanitário. *Rev UNINGÁ*. 2020;35(1):1-21.
5. Borges YIS, Oliveira BC, Boscov MEG, Mascarenha MMA. Technical feasibility analysis of using phosphogypsum, bentonite and lateritic soil mixtures in hydraulic barriers. *Soils Rocks*. 2023;46:e2023009622-10. doi: 10.28927/SR.2023.009622
6. Ribeiro MES, Mascarenha MMA, Santos TL. Estudo de viabilidade técnica do fosfogesso hemidratado para aplicação em sistema de cobertura de aterros sanitários. *Rev Eletr Eng Civ*. 2018;14:263-77. doi: 10.5216/reec.v14i2.51458
7. Nascimento EC, Lafayette KPV, Silva LCL, Bezerra JS, Portela MFA. Avaliação do uso do agregado reciclado da construção civil como barreira hidráulica em camadas de coberturas de aterros sanitários. *Res Soc Develop*. 2021;10(10):14. doi: 10.33448/rsd-v10i10.19158
8. Caetano MO, Schuck TES, Camacho DLD, Gomes LP. Liner para impermeabilização de aterros sanitários utilizando resíduos de construção e demolição. *Rev Aidis Ing y Cienc Amb*. 2022;15:86-109. doi: 10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.1.75468
9. Araújo FC, Scalize PS, Albuquerque A, Angelim RR. Caracterização física do resíduo de uma estação de tratamento de água para sua utilização em materiais de construção. *Cerâmica*. 2015;61:450-6. doi: 10.1590/0366-69132015613601931
10. Morselli LBG, Carmo LAG, Quadro MS, Andreazza R. Lodo de estação de tratamento de água: possibilidade de aplicação no solo. *Sci Plena*. 2022;18(5):051701. doi: 10.14808/sci.plena.2022.051701
11. Gonçalves F, Souza CHU, Tahira FS, Fernandes F, Teixeira RS. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. *Rev DAE*. 2017 65(205):5-14. doi: 10.4322/dae.2016.018
12. Silva ADS, Barboza E, Silva M. Uso alternativo de lodo de estação de tratamento de água em pavimentação: uma revisão. *Res Soc Develop*. 2020;9(7):1-18. doi: 10.33448/rsd-v9i7.4458
13. Coelho RV, Tahira FS, Fernandes F, Fontenele HB, Teixeira RS. Uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária. *REEC-Rev Eletr Eng Civil*. 2015;10(2):11-22. doi: 10.5216/reec.V10i2.33134
14. Marchiori JP, Modolo LT, Mazzutti TMS, Andreazza R. Influência do teor de lodo de ETA em misturas com solo para aplicação em solos moles. *Geotecnia Bras*. 2022;40(3):77-86.
15. Gonçalves F, Souza C, Tahira FS, Fernandes F, Teixeira RS. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. *Rev Dae*. 2017;65(205):5-14. doi: 10.4322/dae.2016.018
16. Organização das Nações Unidas (ONU) [Internet]. Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável; 15 set 2015 [citado em 14 jul 2025]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>.
17. Saneago [Internet]. Saiba como funcionam os sistemas de abastecimento de água em Goiânia; 02 jan 2023 [citado em 14 jul 2025]. Disponível em: https://www.saneago.com.br/#/noticia_interna/8913/3.
18. Richter C. Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. 1. ed. São Paulo (SP): Ed. Blucher; 2001.
19. Association Française pour l'Étude des Eaux. Traitement des boues de stations de production d'eau potable. Paris (FR): AFEE; 1993.
20. Motta MAD, Tavares RG, Arruda VCMD, Correa MM, Pereira LJR. Geração, tratamento e disposição final dos resíduos das estações de tratamento de água do estado de Pernambuco. *Eng Sanit Amb*. 2019;24(04):761-71. doi: 10.1590/S1413-41522019175810
21. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). ABNT NBR 6457: amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 2016.
22. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). ABNT NBR 6408: grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm: determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 2016.
23. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). ABNT NBR 6459: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 2016.
24. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). ABNT NBR 7180: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 2016.
25. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). ABNT NBR 7181: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 2016.
26. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). ABNT NBR 7182: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 2016.
27. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). ABNT NBR 14545: solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 2021.
28. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Norma técnica para camada de cobertura de solo em aterros sanitários. São Paulo (SP): CETESB; 1993.
29. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). ABNT NBR 13896: aterros de resíduos não perigosos: critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro (RJ): ABNT; 1997.

30. Conselho da União Europeia. Directiva 1999/31/CE. Jornal Oficial das Comunidades Europeias. 1999;182(10):1-19. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1999/31/oj>.
31. United States Environmental Protection Agency. Handbook: landfill cover system design. Washington (DC): EPA; 2004.
32. de Almeida APV, de Carvalho KQ, Passig FH. Caracterização quantitativa do lodo gerado na estação de tratamento de água de Campo Mourão PR. *Rev Técnico-Científica do IFSC*. 2010(1):36-40.
33. Caniani D, Masi S, Mancini IM, Trulli E. Innovative reuse of drinking water sludge in geo-environmental applications. *Waste Manag*. 2013 Jun;33(6):1461-8. doi: 10.1016/j.wasman.2013.02.007
34. Mazzutti, EA, Klamt RA, Faro VP. Study of the hydro-mechanical behavior of a stabilized soil with water treatment plant sludge for application in sanitary landfills. *Soils Rocks*. 2023;46(1):1-12. doi: 10.28927/SR.2023.011222
35. Prim ECC. Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário. *Est Tecnols Eng*. 2011;23(40):113-222. doi: 10.4013/ETE.2011.72.02
36. Roque A, Montalvan ELT, Boscov MEG. Reuse of water treatment plant sludge mixed with lateritic soil in geotechnical works. *Environm Challenges*. 2022;7:100465. doi: 10.1016/j.envc.2022.100465
37. Nogami S, Villibor O. A new methodology for the classification of tropical soils. *J Soil Mech*. 1981;10(2):123-40.