



## Aplicabilidade de Lodo ETA para composição de barreiras selantes em aterros sanitários

Lívia Cristina Lopes Sousa<sup>1</sup>

Nicolas Stênio Freire Dias<sup>2</sup>

Thiago de Sá Sena<sup>3</sup>

Daniela Lima Machado da Silva<sup>4</sup>

### Resumo

O lodo da Estação de Tratamento de Água (ETA) é um resíduo gerado durante o processo de tratamento da água, sendo composto por uma mistura de materiais orgânicos e inorgânicos, no qual, quando descartado de forma inadequada prejudica a qualidade das águas e do solo. Apesar da sua nocividade, o lodo de ETA pode ser reaproveitado, o que reduz os impactos ambientais negativos inerentes à sua disposição final. Misturas de solo e lodo de ETA podem ser utilizadas em diversas etapas da construção e operação dos aterros sanitários, como em barreiras selantes. Essas barreiras consistem em sistemas de revestimento e impermeabilização e impedem a migração do lixiviado gerado pela decomposição dos resíduos sólidos dispostos em aterros. Dessa forma, o objetivo da pesquisa foi analisar a aplicação de misturas de solo e lodo (10% e 20%, em massa) como alternativa na composição de barreiras selantes em um aterro sanitário através de ensaios geotécnicos do solo e das misturas solo-lodo a fim de analisar suas propriedades e sua viabilidade. Para isso, as misturas foram submetidas a ensaios para aferição da massa específica dos grãos, de sua granulometria, dos limites de Atterberg, da massa específica aparente seca e umidade ótima, de sua permeabilidade e sua composição elementar. Com os resultados experimentais, observou-se melhora nas propriedades do solo com a mistura do lodo, deixando-o mais plástico, com maior umidade ótima e menos denso, tendo propriedades mais indicadas para uso em aterro sanitário.

**Palavras-chave:** Reaproveitamento de Resíduos; Resíduos Sólidos; Caracterização Geotécnica.

<sup>1</sup> Graduada em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará (UFC); Brasil, Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFC/Russas; liacristina2002@alu.ufc.br; <https://orcid.org/0009-0001-3053-0518>; <http://lattes.cnpq.br/6551653389175633>

<sup>2</sup> Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará (UFC); steniodias@alu.ufc.br; <https://orcid.org/0009-0005-1362-751X>; <http://lattes.cnpq.br/5898454483671509>

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG); Brasil, Universidade Federal do Ceará, técnico de laboratório; thiagosena@ufc.br; <https://orcid.org/0000-0003-1593-3439>; <http://lattes.cnpq.br/7172038975336416>

<sup>4</sup> Doutora em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG); Brasil, Universidade Federal do Ceará, professora; danielalms@ufc.br; <https://orcid.org/0000-0001-8994-9631>; <http://lattes.cnpq.br/5802255460003015>

*Revista Gestão & Sustentabilidade está licenciada sob a licença Creative Commons Attribution 4.0 International License*

Recebido: 05/07/2025 Última versão recebida: 13/09/2025 Aceite: 13/09/2025 Publicado: 15/10/2025

DOI: <https://doi.org/10.36661/2596-142X.2025v7n1.15159>

## Applicability of WTP Sludge for Sealing Barriers in Landfills

### Abstract

Water treatment plant (WTP) sludge is a waste product generated during the water treatment process and is made up of a mixture of organic and inorganic materials, which, when disposed of inappropriately, harms water and soil quality. Despite its harmfulness, WTP sludge can be reused, which reduces the negative environmental impacts inherent in its final disposal. Mixtures of soil and WTP sludge can be used in various stages of landfill construction and operation, such as sealing barriers. These barriers consist of lining and waterproofing systems and prevent the migration of leachate generated by the decomposition of solid waste disposed of in landfills. The aim of this research was to analyze the application of soil-sludge mixtures (10% and 20%, by weight) as an alternative in the composition of sealing barriers in a landfill through geotechnical tests of the soil and soil-sludge mixtures in order to analyze their properties and feasibility. For this purpose, the mixtures were subjected to tests to determine the specific gravity of the particles, particle size distribution, Atterberg limits, maximum dry density and optimum moisture content, permeability, and elemental composition. The experimental results showed an improvement in the soil properties with the incorporation of sludge, making it more plastic, with greater optimal moisture and lower density, thus having properties more suitable for use in a sanitary landfill.

**Keywords:** Reuse of Waste; Solid Waste; Geotechnical Characterization.

### 1 Introdução

O lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) é um resíduo gerado durante o processo de tratamento da água, especificamente na etapa de decantação. O lodo de ETA é composto por uma mistura de materiais orgânicos e inorgânicos, como areia, argila, matéria orgânica e metais pesados, e quando é descartado de forma inadequada, seja diretamente no solo ou em corpos hídricos, pode ocorrer uma contaminação do meio ambiente e prejudicar a qualidade das águas (superficiais e subterrâneas) e do solo. Um dos aspectos danosos do lodo de ETA é a contaminação com alumínio, relacionada a bioacumulação deste metal em peixes, podendo alterar seu comportamento, assim como causar a mortandade e deficiência nas brânquias, já em seres humanos, a bioacumulação pode ocasionar doenças neurológicas, tais como Alzheimer e insuficiência renal (Muisa *et al.*, 2011).

Apesar da sua nocividade, o lodo de ETA é passível de reaproveitamento, o que pode reduzir os impactos ambientais negativos inerentes da sua deposição final. Ademais, esse reaproveitamento tem o potencial de reduzir o volume de resíduos que seriam descartados no interior do aterro sanitário. Desse modo, o aproveitamento desses resíduos acarreta benefícios

econômicos e uma contribuição direta à implantação da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010.

Existem regulamentações específicas para o manejo e descarte adequado do lodo de ETA, como a Resolução CONAMA nº 375/2006, que estabelece critérios e procedimentos para a disposição final de resíduos sólidos. Essa resolução prevê que o lodo de ETA deve ser tratado e disposto em aterros sanitários licenciados, que possuam sistemas de controle ambiental e segurança operacional. Diante disso, misturas de solo e lodo de ETA têm sido utilizadas em aterros sanitários como uma alternativa para a impermeabilização da base e cobertura desses empreendimentos. Essa aplicação tem como objetivo aumentar a eficiência da impermeabilização, reduzir a quantidade de resíduos dispostos em aterros e minimizar os impactos ambientais associados a essa atividade.

Há diversas pesquisas que mostram a viabilidade e eficácia dessas aplicações. Castilhos Junior *et al.* (2011) realizaram um estudo em que a mistura de solo e lodo de ETA foi utilizada na camada de cobertura de um aterro sanitário, onde os resultados indicaram que o material possui potencial de utilização em coberturas de aterros. Gonçalves *et al.* (2016) realizaram testes em laboratório e concluíram que a mistura de solo-lodo de ETA é uma alternativa viável para a impermeabilização de solos. De Andrade *et al.* (2018) utilizaram misturas de solo e lodo de ETA na construção da camada de base e de cobertura de um aterro sanitário, e observaram que a adição de lodo pode ser considerada uma alternativa viável e sustentável para uso no setor da construção. Batista *et al.* (2021) realizaram testes em laboratório e concluíram que a mistura de solo e lodo de ETA pode ser utilizada na construção de células de disposição final de aterros sanitários, reduzindo a quantidade de material necessário para a construção e aumentando a eficiência da impermeabilização.

Morselli *et al.* (2022) analisaram o potencial agrônomo do lodo de ETA e seu potencial para adsorção de metais pesados, e possibilidade de uso em camada impermeabilizante e cobertura de aterros sanitários, onde verificaram que o lodo de ETA pode adsorver metais pesados, fornecer nutrientes para plantas e ser usado em camadas de aterro sanitário, desde que misturado a materiais de menor permeabilidade. Silva *et al.* (2022) analisaram a viabilidade econômica do lodo aplicado em aterros sanitários e na correção das propriedades físicas, químicas ou biológicas dos solos cujos resultados apontaram uma atrativa viabilidade econômica, principalmente no melhoramento de solos. Nos últimos anos, diversos outros estudos a respeito do lodo em aterros sanitários foram realizados, como por

exemplo: Bringhenti *et al.* (2018), Zhang *et al.* (2020), Pashaki *et al.* (2024), Zhang *et al.* (2024), Wdowczyk *et al.* (2025) e Xiang *et al.* (2025).

As misturas de solo e lodo de ETA podem ser utilizadas em diversas etapas da construção e operação dos aterros sanitários, tais como na execução das barreiras selantes. Essas barreiras são subdivididas em camada de base e cobertura, as quais consistem em sistemas de revestimento e impermeabilização, e devem impedir a migração do lixiviado gerado pela decomposição dos resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários e infiltração da precipitação pluviométrica. As camadas de base e cobertura nestes aterros são camadas compostas por diferentes materiais, tais como argila compactada, geomembranas, geotêxteis ou misturas de solos (Silva *et al.*, 2005).

A adição de lodo de ETA ao solo pode melhorar suas propriedades mecânicas e químicas, além de promover a redução do impacto ambiental. Em camadas de base de aterros sanitários, a mistura de solo e lodo de ETA pode ser utilizada na camada de base do aterro sanitário, substituindo materiais convencionais, como argila ou geomembrana. Nessa aplicação, a mistura tem a função de aumentar a eficiência da impermeabilização da base, reduzindo o risco de contaminação do solo e das águas subterrâneas. Por exemplo, Gonçalves *et al.* (2016), De Andrade *et al.* (2019) e Batista *et al.* (2021) mostraram em suas pesquisas as vantagens do uso do lodo em aterros sanitários, em que concluíram que a aplicação do lodo, além de reduzir consumo de materiais e custos, melhorou significativamente as propriedades impermeabilizantes das misturas.

Já nas camadas de cobertura, a mistura de solo e lodo de ETA pode ser utilizada na substituição de materiais convencionais, como argila, solos orgânicos ou arenosos. Nessa aplicação, a mistura tem a função de reduzir a infiltração de água na massa de resíduos aterrada, minimizando a emissão de gases de efeito estufa, tais como, dióxido de carbono e metano. Essa potencialidade do uso do lodo em camadas de coberturas foi discutida anteriormente.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar a aplicação de misturas de solo local e lodo proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) situada nas proximidades do aterro sanitário em análise, localizado no município de Limoeiro do Norte (CE), considerando teores de 10% e 20% em massa. Além da caracterização geotécnica do solo e das misturas, busca-se investigar a adequação desses materiais aos critérios técnicos estabelecidos para uso em camadas de base e de cobertura (barreiras selantes) em aterros. O

ineditismo do trabalho reside na abordagem integrada entre o aproveitamento de um resíduo gerado regionalmente e o uso do próprio solo disponível na área do aterro, explorando uma alternativa sustentável e pouco investigada na literatura para o contexto do semiárido brasileiro.

## 2 Metodologia

O lodo utilizado para este estudo foi coletado nos fundos de um tanque de decantação, no turno matutino, com auxílio de um funcionário da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), bem como, dos técnicos de laboratório da Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus de Russas. A coleta foi realizada após um processo de secagem do tanque para realização de operações de manutenção, desse modo, foi possível obter um material com uma significativa densidade (Figura 1 – A). O lodo foi armazenado em recipientes hermeticamente fechados, para impedir a perda de umidade e entrada de impurezas (Figura 1 – B). Posteriormente, o material foi encaminhado para o Laboratório de Saneamento da UFC, Campus de Russas.

**Figura 1:** Coleta do Lodo de ETA.



Fonte: Autoral (2023)

O solo analisado nessa pesquisa foi coletado no aterro sanitário localizado no município de Limoeiro do Norte, nas proximidades das comunidades rurais Sitio Barrocão em Tabuleiro do Norte e Café Queimado (Figura 2). A área indicada situa-se fora do perímetro urbano e distante aproximadamente 13,5 km do centro urbano de Limoeiro do Norte no ponto de coordenadas planas aproximadas UTM 9.424.510 S e 585.615 E.

**Figura 2:** Área de Estudo.



Fonte: Autoral (2023)

Uma fração de aproximadamente quatro quilos de solo seguiu para a etapa de preparação de amostras, segundo a NBR 6457 (ABNT, 2024).

Nos experimentos laboratoriais foram realizadas três etapas: a primeira consistiu na caracterização geotécnica do solo puro, enquanto as duas seguintes avaliaram misturas de solo com 10% e 20% de lodo. O objetivo foi comparar as alterações nas propriedades e no comportamento do solo decorrentes da adição do lodo, além de analisar a variação na sua granulometria e nos limites de consistência, bem como classificar as amostras segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Para analisar a aplicação de misturas de solo e lodo (10 e 20%) como alternativa na composição de barreiras selantes de aterros sanitários, a amostra de solo coletada e as misturas solo-lodo (10% e 20%) foram submetidas aos seguintes ensaios geotécnicos: determinação da umidade pelo método da estufa de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2024), limite de liquidez (LL), NBR 6459 (ABNT, 2016a), limite de plasticidade (LP) NBR 7180 (ABNT, 2016b), granulometria NBR 7181 (ABNT, 2016c), massa específica dos grãos NBR 6458 (ABNT, 2016d), compactação NBR 7182 (ABNT, 2016e), permeabilidade à carga constante, NBR 13292 (ABNT, 2021a), e variável, NBR 14545 (ABNT, 2021b) e Fluorescência de Raios X (FRX). Para a determinação da fração constituinte dos materiais (areia, silte e argila) foi utilizada a NBR 6502 (ABNT, 2022).

### 3 Resultados e Discussões

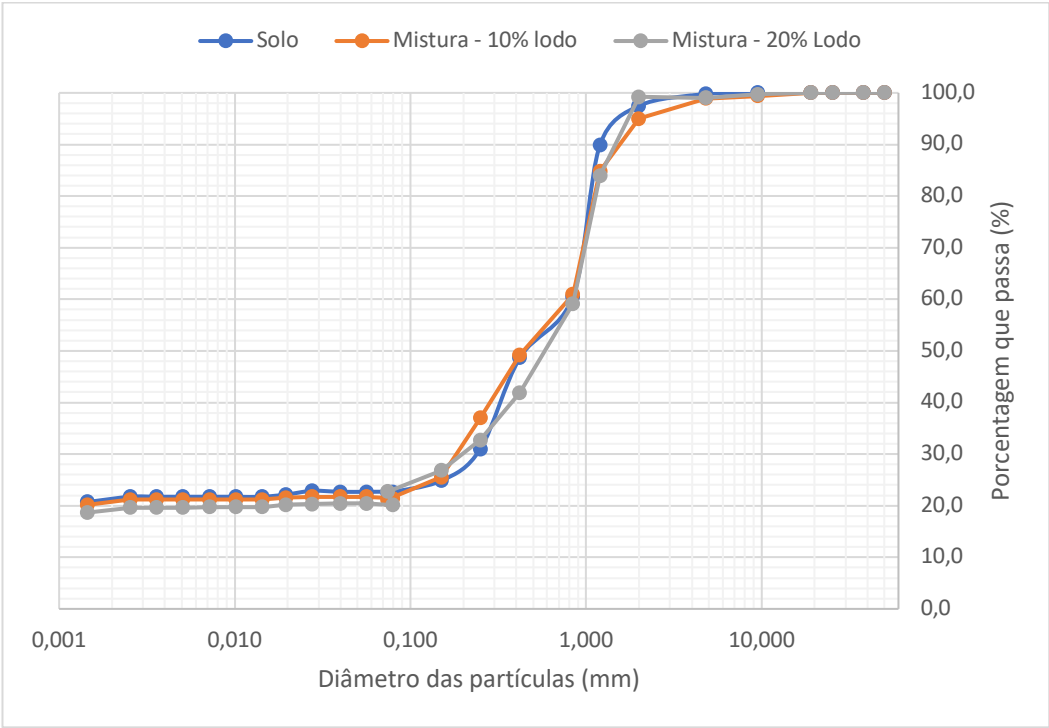
Os resultados obtidos com a investigação experimental realizada com misturas de solo-lodo serão apresentados em função dos parâmetros analisados, ou seja, nos seguintes

tópicos: Caracterização geotécnica (massa específica dos grãos e granulometria), Limites de Atterberg, Parâmetros de compactação (massa específica aparente seca e umidade ótima), Permeabilidade e Fluorescência de Raio-X.

3.1 Caracterização geotécnica (massa específica dos grãos e granulometria)

A Figura 3 e a Tabela 1 apresentam, respectivamente, as curvas granulométricas e os valores obtidos de massa específica dos grãos e as frações granulométricas para a amostra de solo e para as misturas de solo com 10 e 20% de lodo.

Figura 3: Curvas Granulométricas



Fonte: Autoral (2023)

Tabela 1: Valores de massa específica dos grãos e granulometria

Parâmetros		Solo	MSL 10%	MSL 20%
Massa específica dos grãos (g/cm³)		2,4	2,38	2,37
	Areia grossa	43,14	37,01	36,02
Granulometria (%)	Areia média	28,76	25,98	23,51
	Areia fina	5,18	10,83	12,49
	Silte	3,84	3,2	6,18
	Argila	19,1	21,15	21,8



Fonte: Autoral (2023)

Nota: MSL = Mistura de Solo e Lodo

Para a amostra de solo não misturada com o lodo, aferiu-se a massa específica dos grãos de  $2,4 \text{ g/cm}^3$  e no que diz respeito à granulometria, obteve-se 43,14% de areia grossa, 28,76% de areia média, 5,18% de areia fina, 3,84% silte e 19,1% de argila. Quanto à mistura solo-lodo de 10%, obteve-se uma massa específica dos grãos de  $2,38 \text{ g/cm}^3$  e distribuição granulométrica com 37,01% de areia grossa, 25,98% de areia média, 10,83% de areia fina, 3,2% de silte e 21,15% de argila. Por fim, a massa específica dos grãos da mistura solo-lodo de 20% foi de  $2,37 \text{ g/cm}^3$ , e sua granulometria com 36,02% de areia grossa, 23,51% de areia média, 12,49% de areia fina, 6,18% de silte e 21,8% de argila.

Foi possível notar a pouca influência no aumento do teor de lodo na massa específica dos grãos. Quando se compara os resultados obtidos com a amostra de solo sem adição de lodo e com a mistura de solo-lodo 10%, é possível notar que houve uma diferença de apenas 0,8% entre a massa específica dos grãos da amostra de solo e da amostra de solo-lodo de 10%. Ademais, com os resultados obtidos com a amostra de lodo com 20% de lodo em sua composição, foi possível notar uma diferença de 0,42% no valor de sua massa específica dos grãos. Quando se compara os resultados obtidos entre o solo sem lodo, e a mistura solo-lodo com 20%, nota-se uma diminuição de 1,25%, que apesar de baixa, é bem maior que a diferença percebida nas outras duas amostras, o que indica que, quanto maior a porcentagem de adição de lodo na mistura, menos denso o solo fica. Isso ocorre porque quando se adiciona lodo ao solo, parte dos sólidos minerais é substituída por partículas orgânicas e minerais mais leves presentes no lodo, o que reduz a massa específica dos grãos da mistura.

Apesar da insignificante influência no lodo na massa específica dos grãos, o aumento no teor de lodo aumentou a quantidade de finos das misturas. A amostra de solo apresentou 22,94% de finos (silte + argila), contudo as misturas com 10% e 20% de teor de lodo apresentaram um percentual de finos de, respectivamente, 24,35 e 27,98%, o que mostra que o aumento na quantidade de lodo em 20% elevou a quantidade de finos em 3,63%. É possível notar que a quantidade de silte aproximadamente dobrou na mistura de 20% quando se compara com o solo puro.

Diante do exposto, verificou-se que o aumento no teor de lodo reduziu, ainda que de forma sutil, a massa específica dos grãos e elevou significativamente o percentual de finos das misturas. Essas alterações podem indicar que a adição de lodo tende a aumentar a capacidade de retenção de água, pois parte dos sólidos minerais mais densos do solo é substituída por

partículas mais leves presentes no lodo. Além disso, a matéria orgânica do lodo apresenta alta afinidade por moléculas de água, potencializando essa retenção hídrica.

### 3.2 Limites de Atterberg

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) para a amostra de solo e para as misturas de solo e lodo com 10 e 20%.

**Tabela 2:** Valores do Limites de Atterberg

Parâmetros	Solo	MSL 10%	MSL 20%
LL (%)	16,9	22,5	24,8
LP (%)	13,25	17,51	16,81
IP (%)	3,65	4,99	7,99

Fonte: Autoral (2023)

Nota: MSL = Mistura de Solo e Lodo

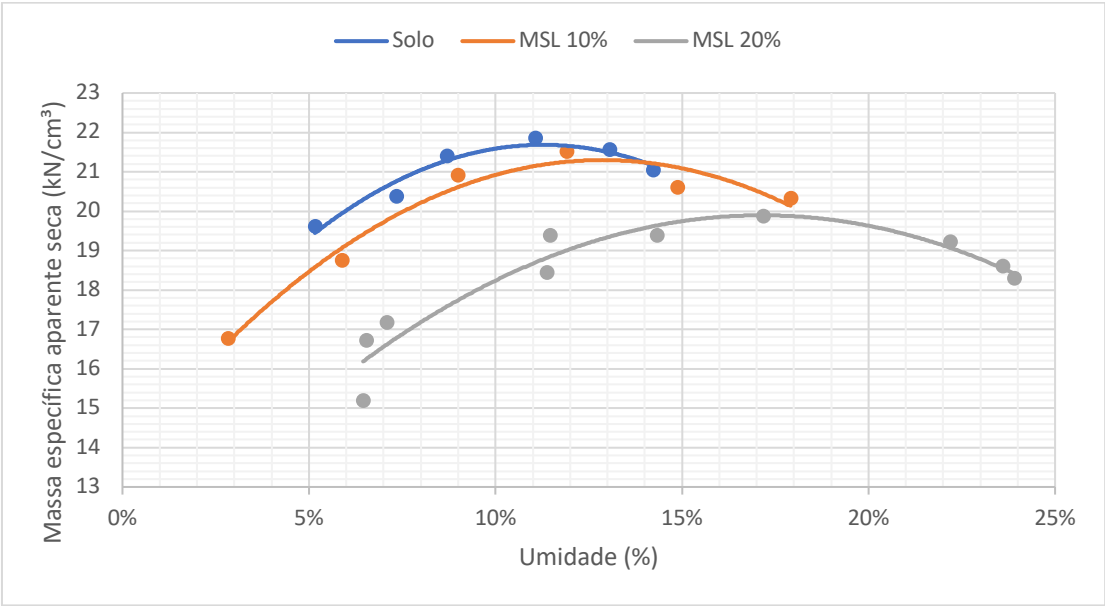
Para o solo, os limites de consistência de Atterberg foram de 16,9% para LL e 13,25% para LP. Com o índice de plasticidade (IP) de 3,65% e classificando-o como uma areia siltosa (SM), através da classificação SUCS. Quanto à mistura solo-lodo de 10%, obteve-se valores de limites de Atterberg de 22,5% para LL e 17,51% para LP, um IP de 4,99% e consequentemente, pode-se classificar a amostra de solo-lodo como uma areia siltosa (SM). Quanto à mistura solo-lodo de 20%, foram aferidos limites de Atterberg de 24,8% para LL e 18,61% para LP. E um IP de 7,99% e consequentemente, pode-se classificar a amostra de solo-lodo como uma areia siltosa (SM).

É possível notar que elevar o teor de lodo aumenta o índice de plasticidade do solo, em que houve um aumento de 4,34% de IP com um teor de 20% de lodo a mais. Diante disso, a utilização de lodo em solos arenosos pode deixá-los próximo de atender o requisito para uso em camadas de impermeabilização em aterros sanitários, como o da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – USEPA (2004), que recomenda um IP mínimo de 7-15%.

3.3 Parâmetros de compactação (massa específica aparente seca e umidade ótima)

A Figura 4 e a Tabela 3 apresentam, respectivamente, as curvas de compactação e os valores obtidos de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima para a amostra de solo e para as misturas de solo com 10 e 20% de lodo.

Figura 4: Curvas de compactação.



Fonte: Autoral (2023)

Tabela 3: Valores do peso específico aparente seco máximo e umidade ótima

Parâmetros	Solo	MSL 10%	MSL 20%
Peso específico aparente seco máximo (kN/m³)	21,72	21,09	19,42
Umidade ótima (%)	11	12	17

Fonte: Autoral (2023)

Nota: MLS = Mistura de Solo e Lodo

Para a amostra de solo, obteve-se 11,0% de umidade ótima e 21,72 kN/m³ para o peso específico aparente seco máximo. Quanto à MSL10%, foi aferida uma umidade ótima de 12% e peso específico aparente seco máximo de 21,09 kN/m³. Por fim, para a MSL20% obtiveram-se 17% de umidade ótima e 19,42 kN/m³ para o peso específico aparente seco máximo. Diante disso, é possível notar um aumento de 6% na umidade ótima quando o teor de lodo aumentou em 20%, bem como houve uma diminuição do peso específico aparente seco máximo em 10,59%.



A Tabela 4 apresenta os valores de índice de vazios e porosidade correspondentes as condições de máxima compactação para energia Proctor normal e umidade ótima para cada material.

**Tabela 4:** Valores de índice de vazios e porosidade

Parâmetros	Solo	MSL 10%	MSL 20%
Índice de vazios (v/v)	0,083	0,107	0,197
Porosidade (%)	7,75	9,67	16,47

Fonte: Autoral (2023)

Apesar do aumento no índice de vazios e na porosidade, o maior teor de lodo nas misturas resultou em maior capacidade de retenção de água, evidenciada pela redução do peso específico aparente seco e pelo aumento significativo da umidade ótima. Esse comportamento está associado à presença de partículas finas e matéria orgânica no lodo, que aumentam o volume de poros, mas reduzem a conectividade entre eles, ou seja, a porosidade efetiva. Assim, mesmo havendo mais poros, a passagem da água é dificultada, diminuindo a permeabilidade. Esse efeito é desejável em aplicações de selagem, como em aterros sanitários, pois contribui para reter contaminantes.

### 3.4 Permeabilidade

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos de permeabilidade para a amostra de solo e para as misturas de solo com 10 e 20% de lodo.

**Tabela 5:** Valores de permeabilidade

Parâmetros	Solo	MSL 10%	MSL 20%
Permeabilidade (m/s)	$7,13 \times 10^{-7}$	$1,04 \times 10^{-6}$	$8,20 \times 10^{-7}$

Fonte: Autoral (2023)

Para a amostra de solo, obteve-se  $7,13 \times 10^{-7}$  m/s de permeabilidade. Quanto à MSL10%, foi aferida uma permeabilidade de  $1,04 \times 10^{-6}$  m/s. Por fim, para a MSL20% obteve-se  $8,20 \times 10^{-7}$  m/s de permeabilidade. Diante disso, é possível notar um aumento em  $1,07 \times 10^{-7}$  m/s na permeabilidade quando o teor de lodo aumentou em 20%, o que mostra que a adição de lodo pouco influenciou na permeabilidade do solo não misturado com lodo, o que é vantajoso, pois permite incorporar o resíduo sem comprometer a função de barreira hidráulica

do material, mantendo a baixa capacidade de condução de água e ainda utilizar um material que seria descartado dentro do próprio aterro sanitário.

A NBR 13896 (ABNT, 1997) não diferencia o solo para base e cobertura, e exige que aterros sejam implantados em áreas cujo subsolo apresente coeficiente de permeabilidade inferior a  $5 \times 10^{-7}$  m/s. Dentre os valores obtidos, o solo e a MSL 20% são os que mais se aproximam em atender o limite preconizado. Contudo, tais materiais não atendem a manuais mais exigentes como a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 1993) e a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2004), que estabelecem que as permeabilidades de camada de base e de cobertura, respectivamente, devem ser inferiores a  $10^{-9}$  m/s. Vale ressaltar que, em situações com valores até  $10^{-6}$  m/s, a aceitação fica a critério do órgão de controle ambiental, considerando o tipo de resíduo e as condições hidrogeológicas.

A lei de aterros sanitários alemã, *Deponieverordnung* – DepV (Alemanha, 2009) distingue parâmetros para base e cobertura para aterro sanitário, adotando limites variáveis conforme a classe do aterro e natureza dos resíduos. Para a cobertura, apenas orienta a execução de uma camada funcional de recultivo, sem fixar valores de permeabilidade. Logo, pode-se notar que o solo e as misturas MSL 10% e MSL 20% têm viabilidade para uso em camada de cobertura em aterros sanitários Classe 0, de resíduos inertes.

### 3.5 Fluorescência de Raios X (FRX)

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados obtidos no ensaio de FRX para o solo e o lodo estudados, respectivamente.

**Tabela 6:** Caracterização química do solo estudado

Óxidos (%)										
SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MnO	SrO	ZnO
46,666	15,104	13,025	10,952	8,876	2,531	1,940	0,330	0,237	0,213	0,123

Fonte: Autoral (2023)

**Tabela 7:** Caracterização química do lodo de ETA estudado

Óxidos (%)											
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>2</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	MgO	BrO	ZnO
36,134	16,138	14,216	9,352	8,676	5,509	4,518	1,907	1,838	1,195	0,361	0,154

Fonte: Autoral (2023)

Conforme a Tabela 6, o solo natural do aterro sanitário apresenta predominância de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), com 46,666%, indicando caráter majoritariamente silicoso, possivelmente de origem quartzosa. Em seguida, aparecem teores expressivos de  $\text{CaO}$  (15,104%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (13,025%),  $\text{K}_2\text{O}$  (10,952%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (8,876%), que podem estar associados à presença de minerais como feldspatos, argilominerais e óxidos/hidróxidos de ferro. Os demais óxidos, como  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{SrO}$  e  $\text{ZnO}$ , estão presentes em menores proporções ( $\leq 2,531\%$ ), atuando como componentes acessórios.

No que diz respeito ao lodo, apresentado na Tabela 7, tem como óxido mais abundante o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (36,134%), seguido por  $\text{SiO}_2$  (16,138%) e  $\text{MnO}$  (14,216%). A elevada concentração de alumina e manganês pode estar associada a processos de tratamento de água que utilizam coagulantes à base de sais de alumínio e manganês. O teor significativo de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (5,509%) e  $\text{SO}_2$  (4,518%) também pode refletir insumos químicos empregados no tratamento. O alto teor de  $\text{SiO}_2$  no lodo está associado principalmente à etapa de decantação, quando partículas minerais em suspensão na água bruta, como areia fina, silte e argilas quartzosas, são removidas junto com os flocos formados pelo coagulante.

A partir dos resultados de FRX pode-se justificar o aumento do índice de plasticidade (LL, PL), do comportamento plástico em geral e da retenção de água das misturas quando comparadas com o solo, pois o lodo de ETA tipicamente contém fração fina mineral (altos teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ ) e hidróxi-óxidos de alumínio/ferro formados na coagulação, que são materiais com grande área específica e afinidade por água, comportando-se de modo semelhante a argilas finas. Além disso, devido o lodo arenoso, o efeito na permeabilidade foi pequeno, como foi apresentado anteriormente.

#### 4 Considerações finais

O presente trabalho estudou, através de ensaios geotécnicos, a eficiência da mistura solo-lodo como barreiras selantes de aterro sanitário, a fim de propor uma disposição sustentável para esse tipo de resíduo sólido. Para isso, as misturas foram submetidas a ensaios para determinação da massa específica dos grãos, de suas frações granulométricas, dos limites de Atterberg, da massa específica aparente seca e umidade ótima, de sua permeabilidade e sua composição elementar.

Com a adição do lodo, notou-se uma redução na massa específica dos grãos e pouca influencia na permeabilidade, contudo os resultados mostram que a quantidade de lodo

acrescentada influencia no comportamento e nas características do solo, deixando-o mais plástico, sugerindo maior retenção de umidade e menor densidade, tendo propriedades mais indicadas para uso em aterro sanitário, se comparadas com o solo sem nenhuma porcentagem de lodo de ETA, pois em aterros sanitários são recomendados solos com maior capacidade de retenção de umidade. Diante disso, pode-se confirmar que o uso de lodo de ETA para camada selante de aterros sanitários é uma ótima alternativa para melhorar o comportamento plástico do solo e uma opção de destinação para o lodo de ETA, visto que atendem aos critérios técnicos menos restritivos estabelecidos para uso em camadas de base e de cobertura (barreiras selantes) em aterros sanitários.

## 5 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## Referências bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 2021a.
- \_\_\_\_\_. **NBR 14545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2021b.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6457**: Amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2024.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016a.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016b.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016c.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm. Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016d.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016e.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante. Rio de Janeiro, 2021a.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997. 12p.
- \_\_\_\_\_. **NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos a carga variável. Rio de Janeiro, 2021b.

- ALEMANHA. **Deponieverordnung – DepV**: Ordinance on Landfills and Long-Term Storage. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2009.
- BATISTA, I. F.; MICHELAN, D. C. De G. S.; JESUS, É. P. S.; NILIN, J. Potential contribution of water treatment plant (WTP) sludge to river pollution. **Scientia Plena**, v. 17, n. 10, 2021. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2021.101701>.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 148, p. 3-7, 3 ago. 2010.
- BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 167, p. 141-146, 30 ago. 2006.
- BRINGHENTI, J. R.; BOSCOV, M. E. G.; PIVELI, R. P.; GÜNTHER W. M. R. Codisposição de lodos de tratamento de esgotos em aterros sanitários brasileiros: aspectos técnicos e critérios mínimos de aplicação. **Eng Sanit Ambient**, v.23, n.5, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018124980>.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resíduos Sólidos Industriais**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233p.
- DE ANDRADE, J.J.O.; WENZEL, M.C.; ROCHA, G.H.Da.; SILVA, S.R. da. Performance of rendering mortars containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 192, p. 159-168, ago. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.246>.
- GONÇALVES, F.; DE 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. <https://doi.org/10.4322/dae.2016.018>.
- CASTILHOS JUNIOR, A. B. C.; 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**, v. 7, n. 2, p. 86-97, 2011. <https://doi.org/10.4013/ete.2011.72.02>.
- MORSELLI, L. B. G. A.; CARMO, L. A. G. Do; QUADRO, M. S.; ANDREAZZA, R. Lodo De estação De Tratamento De água: Possibilidade De aplicação No Solo. **Scientia Plena**, v. 18, n. 5, 2022. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2022.051701>.
- MUISA, N.; HOKO, Z.; CHIFAMBA, P. Impacts of alum residues from Morton Jaffray Water Works on water quality and fish, Harare, Zimbabwe. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 36, n. 14–15, p. 853–864, 2011.
- PASHAKI, S. G. A.; KHOJASTEHPOUR, M.; MOKHTARANI, N.; TEDESCO, S.; EBRAHIMI-NIK, M. Improvement of COD removal and biogas production from landfill leachate using bio-synthesized iron nanoparticles, sludge and FeCl<sub>3</sub>. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 3, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113116>.
- SILVA, F. A.; MELFI, A. J.; BARROS, M. A. S. Utilização de lodo de estação de tratamento de água em misturas solo-lodo. **Revista Brasileira de Geotecnia**, v. 25, n. 2, p. 173-181, 2005.

SILVA, L. A. .C; FARIA, B. R.; LOPES, W. F. A. Avaliação econômica do potencial de uso de lodo de esgoto em solos após higienização via estabilização alcalina. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v. 11, n. 03, p. 822-843, 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Design, construction, and evaluation of clay liners for waste management facilities**. Washington, D.C.: USEPA, 1988. (EPA/530-SW-86-007-F).

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers**. Office of solid waste an emergency response. EPA-540-R-04-007. Washington DC. USEPA, 2004. 421p.

WDOWCZYK, A.; KOC-JURCZYK, J.; JURCZYK, L.; SZYMAŃSKA–PULIKOWSKA, A.; GAŁKA, B. Removal of selected pollutants from landfill leachate in the vegetation-activated sludge process. **Waste Management**, v.195, p. 209-219, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.02.007>.

XIANG, Q.; FAN, D.; ZHU, L.; ZHANG, T.; SHEN, D.; WNAG, H.; DONG, B. Weighted comprehensive risk assessment and pollution analysis of long-term printing and dyeing sludge landfills in an industrialized Chinese city. **Environmental Pollution**, v. 367, 2025. <https://doi.org/0.1016/j.envpol.2025.125665>.

ZHANG, F.; REN, S.; LIANG, H.; WANG, Z.; YAN, Y.; WNAG, J.; PENG, Y. Organics Recovery from Waste Activated Sludge In-Situ Driving Efficient Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate: An Innovative Biotechnology with Energy Superiority. **Engineering**, v.34, p. 120-132, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.03.005>.

ZHANG, X.; LU, Y.; YAO, J.; WU, Y.; TRAN, Q. C. Insight into conditioning landfill sludge with ferric chloride and a Fenton reagent: Effects on the consolidation properties and advanced dewatering. **Chemosphere**. v. 252, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126528>.