



Artigo Original

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v19n12025p161-171

Submetido em: 16 mai. 2025

Aceito em: 13 out. 2025

.....

Aplicabilidade de lodo ETA para composição de barreiras selantes em aterros sanitários

Applicability of WTP sludge for sealing barriers in landfills

Aplicabilidad de los lodos de PTAP para la composición de barreras de sellado en vertederos sanitarios

Lívia Cristina Lopes Sousa  <https://orcid.org/0009-0001-3053-0518>

Universidade Federal do Ceará

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará.

E-mail: liacristina2002@alu.ufc.br

Nicolas Stênio Freire Dias  <https://orcid.org/0009-0005-1362-751X>

Universidade Federal do Ceará

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará.

E-mail: steniodias@alu.ufc.br

Thiago de Sá Sena  <https://orcid.org/0000-0003-1593-3439>

Universidade Federal do Ceará

Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande. Técnico Administrativo da Universidade Federal do Ceará.

E-mail: thiagosena@ufc.br

Daniela Machado Lima da Silva  <https://orcid.org/0000-0001-8994-9631>

Universidade Federal do Ceará

Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande.

E-mail: danielalms@ufc.br

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, o 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. Com os resultados experimentais, observou-se melhora nas propriedades do solo com a mistura do lodo quando comparado com a amostra de solo sem o lodo, visto que houve melhora no comportamento plástico do material.

Palavras-chave: Reaproveitamento de Resíduos. Resíduos Sólidos. Caracterização Geotécnica. Permeabilidade.

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. The experimental results showed an improvement in the properties of the soil with the sludge mixture when compared to the unmixed soil sample, since there was an improvement in the plastic behavior of the material.

Keywords: Reuse of Waste. Solid Waste. Geotechnical Characterization. Permeability

Resumen: Los lodos de las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) son un residuo generado durante el proceso de tratamiento del agua y están compuestos por una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos que, cuando su disposición de forma inadecuada, perjudican la calidad del agua y del suelo. A pesar de su nocividad, los lodos de PTAP pueden reutilizarse, lo que reduce los impactos ambientales negativos inherentes a su disposición final. Las mezclas de tierra y lodos de PTAP pueden utilizarse en diversas fases de la construcción y explotación de vertederos sanitarios, como las barreras de impermeabilización. Estas barreras consisten en sistemas de revestimiento e impermeabilización e impiden la migración de los lixiviados generados por la descomposición de los residuos sólidos depositados en los vertederos. El objetivo de esta investigación fue analizar la aplicación de mezclas de suelo y lodos (10% y 20%, en masa) como alternativa en la composición de barreras de sellado en un vertedero mediante ensayos geotécnicos del suelo y de las mezclas suelo-lodos con el fin de analizar sus propiedades y viabilidad. Los resultados experimentales mostraron una mejora en las propiedades del suelo con la mezcla de lodos en comparación con la muestra de suelo sin el lodo, ya que se produjo una mejora en el comportamiento plástico del material.

Palabras clave: Reutilización de residuos. Residuos sólidos. Caracterización geotécnica. Permeabilidad.

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 o comportamento destes, assim como causar a mortandade de peixes 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 à 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. 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 melhorou a qualidade das misturas e reduziu o custo 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 agronômico do lodo de ETA e seu potencial para adsorção de metais pesados, e possibilidade de uso em camada impermeabilizante e cobertura de aterros sanitários, e observaram que o lodo apresenta capacidade como adsorvente de metais pesados na remediação de solos degradados, e apresentou matéria orgânica, macro e micronutrientes necessários ao desenvolvimento dos vegetais, além de apresentar viabilidade na aplicação de camadas de aterro sanitário desde que seja misturado a outros materiais com menores coeficientes de permeabilidade. Silva et al. 2022 analisaram a viabilidade econômica do lodo aplicado em aterros sanitários e no aproveitamento em solos cujos resultados apontaram uma atrativa viabilidade econômica, principalmente no aproveitamento em 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. 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 águas subterrâneas. Por exemplo, Gonçalves *et al.* (2016), De Andrade *et al.* (2018) e Batista *et al.* (2021) mostraram em suas pesquisas as vantagens do uso do lodo em aterros sanitários, nas quais 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 por Junior *et al.* (2011) e Morselli *et al.* (2022), por exemplo, em que apresentaram consequências positivas na utilização do lodo nas camadas de cobertura.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar a aplicação de misturas de solo e lodo (10 e 20%, em massa) como alternativa na composição de barreiras selantes de aterros sanitários, bem como realizar a caracterização geotécnica dos solo e das misturas de solo e lodo, de modo a investigar a adequação desses materiais aos critérios técnicos para uso de solo em camada de base e de cobertura (barreiras selantes), além de avaliar a influência da adição do lodo de ETA nos parâmetros geotécnicos do solo.

2 Material e Método

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.

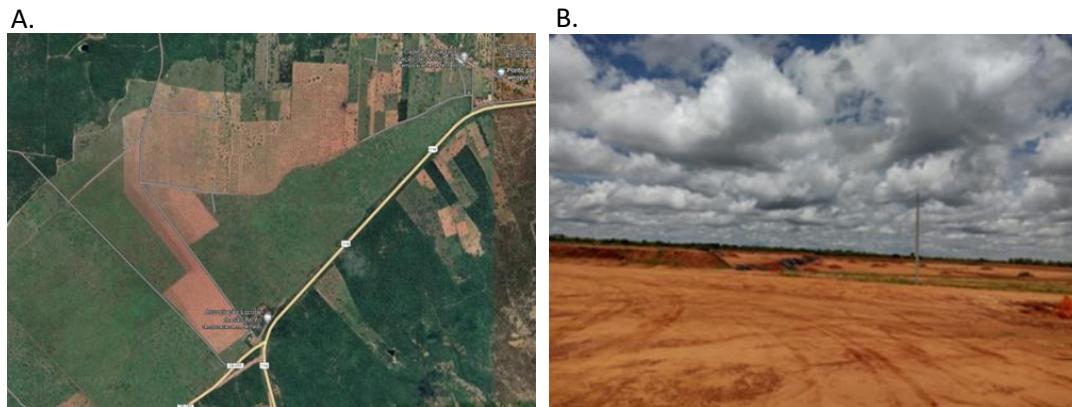
Figura 1. Coleta do Lodo de ETA.



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, no município de Limoeiro do Norte (Figura 2 – A). 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 cada solo seguiu para a etapa de preparação de amostras, segundo a NBR 6457 (ABNT, 2024).

Nos experimentos laboratoriais realizados, que se dividiram em caracterização geotécnica do solo e caracterização geotécnica da mistura solo-lodo de 10% e de 20% de lodo adicionado ao solo; foram realizados um total de três vezes, onde a primeira vez se voltou para a caracterização geotécnica do solo sem a mistura, e outras duas vezes para a caracterização geotécnica da mistura solo-lodo, com adição de 10% e 20% de lodo, para assim comparar as alterações nas propriedades e no comportamento do solo devido à adição do lodo, além de classificar, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), as amostras e entender a granulometria presente nelas.

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) e compactação NBR 7182 (ABNT, 2016e).

3 Resultados

Os resultados obtidos com a investigação experimental realizada com misturas de solo-lodo serão apresentados em função dos parâmetros analisados, ou seja, nos três seguintes tópicos: Caracterização geotécnica (massa específica dos grãos e granulometria), Limites de Atterberg e Parâmetros de compactação (massa específica aparente seca e umidade ótima).

3.1 Caracterização geotécnica (massa específica dos grãos e granulometria)

São apresentados na tabela 1 os valores obtidos de massa específica dos grãos e granulometria para a amostra de solo e para as misturas de 10 e 20%.

Tabela 1. Valores de massa específica dos grãos e granulometria

Parâmetros	Solo	MSL 10%	MSL 20%
Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,4	2,38	2,37
Granulometria (%)			
Areia grossa	43,14	38,1	39,89
Areia média	28,76	23,91	26,48
Areia fina	5,18	12,97	14,55
Silte	3,84	3,2	18,13
Argila	19,1	21,15	11,85

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 g/cm³ 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 g/cm³ e distribuição granulométrica com 38,1% de areia grossa, 23,91% de areia média, 12,97% 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 g/cm³, e sua granulometria com 39,89% de areia grossa, 26,48% de areia média, 14,55% de areia fina, 18,13% de silte e 11,85% de argila.

Foi possível notar a pouca influência no aumento do teor de lodo na massa específica dos grãos. Quando se compararam os resultados obtidos com a amostra de solo sem adição de lodo 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 compararam 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, o que acusa sua maior capacidade de retenção de água.

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 29,95%, o que mostra que o aumento na quantidade de lodo em 20% elevou a quantidade de finos em 7,01%.

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 dos limites de Atterberg

Parâmetros	Solo	MSL 10%	MSL 20%
LL (%)	16,9	22,5	24,8
LP (%)	13,25	17,51	18,61
IP (%)	3,35	4,99	6,19

Nota: MSL = Mistura de solo e lodo.

Para o solo não misturada com o lodo, os limites de consistência de Atterberg foram de 16,9% para LL e 13,25% para LP. Com o índice de plasticidade (IP) de 3,35% e classificando-o como um silte de baixa compressibilidade (ML), através da classificação SUCS na carta de plasticidade. Quanto à mistura solo-lodo de 10%, obtiveram-se valores de limites de Atterberg de 22,5% para LL e 17,51% para LP. E um IP de 4,99% e consequentemente, pode-se classificar a amostra de solo-lodo como uma classificação dupla CL-ML, visto que o IP está entre 4 e 7%. Tal classificação determina que a mistura é uma argila siltosa de baixa compressibilidade. 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 6,19% e consequentemente, pode-se classificar a amostra de solo-lodo como uma classificação dupla CL-ML.

É possível notar que elevar o teor de lodo aumenta o índice de plasticidade do solo, em que houve um aumento de 2,84% 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)

São apresentados na tabela 3 os valores obtidos de peso específico aparente seco e umidade ótima para a amostra de solo e para as misturas de 10 e 20%.

Tabela 3. Valores de peso específico aparente seco e umidade ótima

Parâmetros	Solo	MSL 10%	MSL 20%
Peso específico aparente seco (kN/m ³)	21,72	21,09	19,42
Umidade ótima (%)	11	12	17

Para a amostra de solo não misturada com o lodo, obteve-se 11,0% de umidade ótima e 21,72 kN/m³ para o peso específico aparente seco. Quanto à mistura solo-lodo de 10%, foi aferida uma umidade ótima de 12% e peso específico aparente seco de 21,09 kN/m³. Por fim, para a mistura solo-lodo de 20% obteve-se 17% de umidade ótima e 19,42 kN/m³ para o peso específico aparente seco. 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 em 10,59%. Esse comportamento é atribuído à presença de partículas finas e matéria orgânica no lodo, que aumentam a retenção de água e dificultam a obtenção de uma densidade seca elevada, isso pode reduzir a permeabilidade do solo, o que é desejável para selar contaminantes.

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. Com a adição do percentual do lodo, foram obtidas as principais conclusões:

- A massa específica dos grãos apresentou baixa variação com o aumento no teor de lodo das misturas. Houve uma diminuição de 0,8 e 0,42% da massa específica dos grãos com a adição de 10% de lodo e de 10% para 20% de lodo, respectivamente. Para mistura de solo com 20% de lodo, a massa específica reduziu em 1,25%.
- O aumento de lodo aumentou a quantidade de finos da mistura. A amostra de solo apresentou 22,94% de finos (silte + argila), contudo as misturas com 10% e 20% de lodo apresentaram um percentual de finos de, respectivamente, 24,35 e 29,95%, o que mostra que o aumento na quantidade de lodo em 20% elevou a quantidade de finos em 7,01%.

- Em relação aos limites de Atterberg, foi observado que o aumento do teor de lodo aumentou a plasticidade das misturas, elevando o IP em 2,84% quando foi adicionado 20% de lodo. Esse aumento de finos devido a adição de lodo consequentemente melhora as propriedades plásticas.
- No que diz respeito aos parâmetros de compactação, o aumento do lodo em 20% elevou em 6% a umidade ótima das misturas, além de diminuir a massa específica aparente seca em 10,59%.

Os resultados mostram que a quantidade de lodo acrescentada influencia no comportamento e nas características do solo, deixando-o mais plástico, com maior retenção de umidade e menor densidade, tendo propriedades mais indicadas para uso em aterros sanitários, se comparadas com o solo sem nenhuma porcentagem de lodo, pois em aterros sanitários são recomendados solos que apresentam menos vazios e, consequentemente, que sejam menos permeáveis. 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 destinar o lodo de forma segura.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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.

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.

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>.

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>.

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 FeCl₃. **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 Geotecnologia**, 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)

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/10.1016/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>.

Agradecimentos

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