

Influência da Adição de Lodo de ETA em Solo Laterítico na Resposta de Compactação e no Comportamento Hidráulico

Maitê Milléo Almeida

Mestranda do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, maitemilleo12@gmail.com

Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger

Professor Doutor do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, carlos.emmanuel@gmail.com

Ingrid Leticia Andrusczak

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, 22012721@uepg.br

Bianca Penteado de Almeida Tonus

Professora Doutora do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, bpatonus@uepg.br

Daiana Tatiele Fiedler

Mestre pelo Programa de Pós-Graduação de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Brasil, daianatatielefiedler@gmail.com

RESUMO: O resíduo do tratamento de água é conhecido como lodo, composto de água e sólidos suspensos, e são realizadas diversas pesquisas com o foco na destinação do lodo, visando evitar o descarte incorreto. Nesse contexto, um encaminhamento possível seria a utilização em misturas com solos naturais para aplicação em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários, considerando a possível melhoria das características hidráulicas do solo para esta aplicação. O presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência da adição de lodo em solo laterítico em termos do seu comportamento em compactação e fluxo. Foram realizados ensaios de compactação e condutividade hidráulica com amostras de solo e misturas solo-lodo em quatro porcentagens distintas (2,5%, 5%, 7,5% e 10% de substituição em massa de solo por lodo). Observou-se decaimento dos valores de peso específico aparente seco máximo e aumento da umidade ótima conforme se aumentou a porcentagem de lodo na mistura. Também ocorreu a diminuição dos valores de coeficiente de condutividade hidráulica com o aumento dos teores de lodo, indicando uma menor permeabilidade do sistema, apontando para possibilidade da aplicação da mistura em camadas de aterro sanitário sob o ponto de vista hidráulico.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de ETA, Misturas Solo-Lodo, Compactação, Coeficiente de condutividade hidráulica.

ABSTRACT: The residue from water treatment is known as sludge, composed of water and suspended solids, and it possesses variable characteristics depending on the origin of the raw water and the treatment applied at the water treatment plant. Research is being conducted with a focus on the disposal of sludge, aiming to prevent incorrect disposal. In this context, one possible approach would be its use in mixtures with natural soils for application in landfill liner layers, considering the potential improvement of soil hydraulic characteristics for this purpose. This study aims to evaluate the influence of sludge addition on lateritic soil in terms of its compaction and flow behavior. Compaction and hydraulic conductivity tests were conducted on soil samples and soil-sludge mixtures at four different percentages (2.5%, 5%, 7.5%, and 10% mass replacement of soil by sludge). A decrease in maximum dry bulk density values and an increase in optimum moisture content were observed as the percentage of sludge in the mixture increased. Additionally, there was a decrease in hydraulic conductivity coefficient values with increasing sludge content, indicating lower system permeability and suggesting the potential application of the mixture in landfill liner layers from a hydraulic perspective.

KEYWORDS: WTP Sludge, Soil-Sludge Mixtures, Compaction, Hydraulic Conductivity Coefficient.

1 INTRODUÇÃO

O resíduo proveniente do tratamento de águas de abastecimento, conhecido como lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA), é composto de água e sólidos suspensos. Suas características podem variar de acordo com a origem da água bruta utilizada e o processo de tratamento aplicado na ETA em questão (Roque *et al.*, 2021).

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), o lodo é classificado como um resíduo sólido classe II-B (não perigoso e inerte); no entanto, é comum observar o descarte inadequado do lodo em corpos hídricos, o que ocasiona no aumento do grau de poluição e contaminação dos corpos receptores (Knierim *et al.*, 2023).

Tem-se observado o desenvolvimento de pesquisas que buscam a reutilização do lodo de ETA para evitar o descarte incorreto. Entre essas pesquisas, destaca-se a utilização do lodo em misturas com solo para camadas impermeabilizantes em aterros sanitários (Prim, 2011; Gonçalves *et al.*, 2016; Santos, 2018; Knierim, *et al.*, 2023; Marchiori *et al.*, 2021), na confecção de tijolos (Soares *et al.*, 2021), concretos e argamassas (Santos e Carneiro, 2021; Gheller *et al.*, 2021), base e sub-base de pavimentos (Delgado, 2016), e no preenchimento de valas e aterros em geral (Roque *et al.*, 2021).

Considerando as eventuais aplicações do lodo de ETA em conjunto com o solo natural, especificamente na utilização em camadas de aterro sanitário, e os potenciais esforços que o material pode sofrer, é necessário compreender sua resposta à compactação da mistura solo-lodo e a plausível variação da condutividade hidráulica da mistura conforme a porcentagem de lodo aplicado ao solo é alterada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Em relação aos materiais, o lodo utilizado para o desenvolvimento da pesquisa foi coletado na Estação de Tratamento de Água de Iraí, localizada em Pinhais, Paraná, Brasil. Esta estação é responsável pela produção de água tratada para cerca de 1 milhão de habitantes da cidade de Curitiba e região metropolitana (Oliveira, 2010). O resíduo coletado foi armazenado de forma hermética em recipientes apropriados, conforme demonstrado na Figura 1.



Figura 1. Coleta de Lodo da ETA Iraí.

De acordo com Almeida *et al.* (2023) e Fiedler (2023), a caracterização geotécnica do lodo *in natura* da Estação de Tratamento de Água de Iraí pode ser considerada como uma argila orgânica (OH) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). O resíduo possui 342,87% de teor de umidade quando

seco à $60 \pm 5^\circ\text{C}$, valor este utilizado para preparação das misturas solo-lodo para os ensaios realizados no presente trabalho.

O solo utilizado é proveniente do Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG), localizado nas imediações da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), onde é determinado como um solo laterítico (Tonus *et al.*, 2022). De acordo com Bloinski *et al.* (2020), o material do CEEG-PG pode ser caracterizado como um silte de baixa plasticidade pelo SUCS.

Quanto às amostras, foram consideradas amostras de solo e de cada mistura de solo-lodo em diferentes porcentagens (2,5%, 5%, 7,5% e 10%), totalizando em cinco amostras para cada um dos ensaios realizados. No que se refere à metodologia aplicada na pesquisa, foi realizado o ensaio de compactação na energia Proctor Normal, segundo a NBR 7182 (ABNT, 2020), sem a secagem prévia do lodo de ETA.

Dessa forma foi possível observar a resposta à compactação de misturas solo-lodo sem processamento anterior do lodo além da própria coleta. A partir desse ensaio foi possível obter os valores de peso específico aparente seco máximo (γ_d) e de umidade ótima ($h_{ótima}$) de cada amostra.

O segundo ensaio realizado foi para determinação do coeficiente de permeabilidade, conforme descrito na NBR 14545 (ABNT, 2021), em um permeâmetro de parede rígida. A preparação das amostras seguiu-se a partir dos resultados de $h_{ótima}$ adquiridos nos ensaios de compactação e, para as misturas solo-lodo, foram utilizadas amostras de lodo *in natura* para observação do comportamento do resíduo quando incorporado com solo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ensaio de compactação foi realizado conforme descrito no item 2 e as curvas de compactação de cada amostra podem ser observadas na Figura 3. Destaca-se a curva para a amostra de solo-lodo 7,5% onde apresenta somente 4 pontos da curva de compactação visto que, durante a realização do ensaio, o 5º e último ponto apresentou valores de umidade inconsistentes quando comparados com o restante dos pontos.

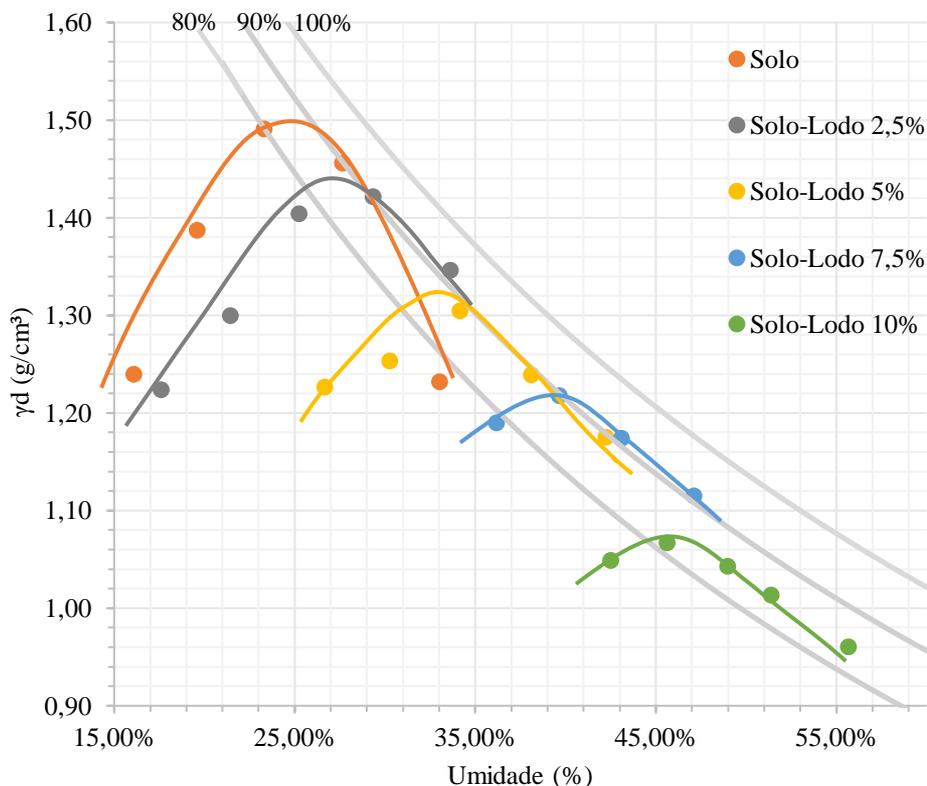


Figura 3. Curvas de compactação das amostras.

Observa-se uma tendência de deslocamento das curvas à medida que aumenta a porcentagem de lodo nas misturas, resultando na diminuição do valor de peso específico aparente seco máximo (γ_d) e no aumento

do valor de umidade ótima, assim como visto no trabalho de Montalvan (2016). Esse comportamento é esperado para solos de característica mais argilosa (Pinto, 2006). A partir dessa tendência, espera-se que quanto maior for o teor de lodo na mistura, maior será o decréscimo do γ_d quando comparado ao de um solo residual.

O aumento da umidade é justificado pelo alto teor de umidade presente no lodo de ETA e, conforme o teor de lodo na mistura aumenta, eleva-se a umidade ótima do conjunto. Além disso, verifica-se que todas as curvas de compactação se encontraram abaixo da curva de 100% de saturação, mas acima ou no limiar da curva de 90% de saturação, exceto pela amostra de solo-lodo 10%.

Um ponto a ser ressaltado seria que foram realizados, anteriormente aos ensaios levantados nesse estudo, o ensaio para determinação do peso específico real dos grãos (γ_s), no qual os resultados obtidos foram considerados pequenos para o intervalo de incorporação de lodo utilizado.

Além disso o comportamento em compactação para essas adições foi refletido nos valores máximos de peso específico aparente e na umidade ótima. A partir da Tabela 1, podem-se observar os resultados individuais de γ_d e $h_{ótima}$, bem como os resultados para o ensaio para determinação da condutividade hidráulica das misturas e seus índices físicos.

Tabela 1. Resultados de peso específico aparente seco máximo e condutividade hidráulica das misturas.

Amostra	Peso específico aparente seco máximo (g/cm ³)	Umidade ótima (%)	Índice de vazios	Porosidade (%)	Condutividade hidráulica (m/s)
Solo	1,50	24,55	0,782	43,87%	8,493E-08
Solo-Lodo 2,5%	1,43	28,20	0,863	46,34%	2,760E-08
Solo-Lodo 5%	1,30	34,20	1,035	50,87%	4,889E-09
Solo-Lodo 7,5%	1,22	39,80	1,175	54,03%	3,743E-09
Solo-Lodo 10%	1,08	46,30	1,461	59,38%	8,618E-09

A variação de porcentagem de lodo aplicado nas misturas influenciou na condutividade hidráulica dos materiais, causando um decréscimo nos valores, visto que o lodo *in natura* utilizado pode apresentar uma alta porcentagem de finos como esperado de um resíduo classificado como argila orgânica (OH). A diminuição dos valores de condutividade hidráulica indica uma menor permeabilidade do sistema, apontando para possibilidade da aplicação da mistura solo-lodo em camadas de aterro sanitário, como camadas de base, quando se considera o ponto de vista hidráulico.

Essa parcela de resíduo na faixa coloidal pode ter auxiliado na diminuição do tamanho dos poros entre grãos da mistura e assim reduziu os coeficientes de condutividade hidráulica, permitindo que as misturas fossem menos permeáveis quando comparadas com o solo puro (Ferreira *et al.*, 2011). Apenas a amostra de solo-lodo 10% apresentou um leve acréscimo em relação à sua antecessora (solo-lodo 7,5%), porém como o resultado ainda se apresenta na mesma grandeza de 10^{-9} m/s, considera-se como resultados aproximados.

Nota-se que conforme aumentava o teor de lodo nas misturas, o índice de vazios e a porosidade aumentavam proporcionalmente. Cada uma das amostras apresentará um índice de vazios inicial diferente visto que cada um possuiu valores máximos de peso específico aparente e umidades ótimas distintas.

4 CONCLUSÕES

Em relação à resposta das misturas à comparação, entende-se que a decisão de utilizar o lodo *in natura* é considerada viável quando se leva em consideração uma aplicação em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários, visto que apresenta um encaminhamento direto do lodo da forma como é disponibilizado na ETA sem necessidade de realizar pré-tratamento.

A tendência de deslocamento das curvas de compactação das misturas solo-lodo indica a necessidade de compreender de forma mais aprofundada quais faixas de valores os parâmetros da mistura devem atingir para a aplicação desejada, visto que essa tendência de aumento do índice de vazios pode não ser desejável em certas situações.

Nesse contexto apresentado, considera-se que o lodo, quando associado a um solo residual, pode auxiliar na diminuição da condutividade hidráulicas da mistura, porém compreende-se necessário observar se essa

tendência permanece em misturas com mais de 10% de incorporação de lodo. Entende-se como relevante expandir a pesquisa com maiores porcentagens de incorporação de lodo para compreender o limite de utilização do resíduo, assim como associar o lodo de ETA de Iraí à outros tipos de solo como, por exemplo, solos arenosos.

AGRADECIMENTOS

À Sanepar, à CAPES, ao técnico Nilson Bueno, ao estagiário do laboratório Gustavo do Prado e ao aluno de iniciação científica Rafael Julinhaque Beraldo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. M., Fiedler, D. T., Beraldo, R. J., Lautenschläger, C. E. R., Paz, E. C. Caracterização geotécnica do lodo da estação de tratamento de água Iraí com aplicação de ensaios de laboratório e ensaio MEV. *In: Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, 13, 2023, Ponta Grossa. Anais [...].* p. 292-295.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2020). NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação, Rio de Janeiro. 9p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2004). NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação, Rio de Janeiro. 71p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2021). NBR 14545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável, Rio de Janeiro. 16p.
- Bloinski, M., Tonus, B. P. A., Lautenschläger, C. E. R., Olavo, L. H. F., Faro, V. P (2020). Campo Experimental de Estudos Geotécnicos de Ponta Grossa (CEEG-PG): classificação do solo local e parâmetros de resistência ao cisalhamento. <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/cobramseg.2022.0484.pdf>.
- Delgado, J. V. C (2016). Avaliação da aplicação do lodo da ETA Guandu na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada. Rio de Janeiro, Brasil. 132 p.
- Ferreira, S. R. D. M., Oliveira, J. T. R., Messias, A. S., Silva, H. A., Nascimento, A. E., Feitosa, M. C. A (2011). Hydraulic conductivity and soil-sewage sludge interactions. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [s. l.], v. 35, n. 5, p. 1569–1577.
- Fiedler, D. T. Análise da incorporação do lodo de uma estação de tratamento de água (ETA) em solo para utilização em camadas impermeabilizantes de aterro sanitário. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2023.
- Gheller, M. B.; Sgorlon, J. G.; Gomes, M. C. S.; Oliveira, M. H. L (2021). Avaliação da substituição de cimento e areia por lodo de ETA na fabricação de matrizes de concreto. São Paulo, Brasil. 4 p.
- Gonçalves, F.; Souza, C. H. U.; Tahira, F. S.; Fernandes, F.; Teixeira, R. S (2016). Uso de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. Belo Horizonte, Brasil. 8 p.
- Knierim, L. S., Delongui, L., Pinheiro, R. J. B. (2023). Estudo do comportamento mecânico e hídrico do uso do lodo de estação de tratamento de água em misturas com solo argiloso laterítico. *Revista DAE*, [s. l.], v. 71, n. 240, p. 51–64, 2023
- Marchiori, L.; Studart, A.; Albuquerque, A.; Cavaleiro, V.; Silva, A. P (2021). Geotechnical Characterization of Water Treatment Sludge for Liner Material Production and Soft Soil Reinforcement. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1046.83>. 5 p.
- Montalvan, E.L.T (2016). Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubatão – SP. São Paulo, Brasil. 134 p.

- Oliveira, N. S. (2010). Estudo da secagem de lodo de estação de tratamento de água. 2010. 209 f. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Pinto, C. S (2011). Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. 3º edição. São Paulo, Brasil. 367 p.
- Prim, E. C. C. (2011). Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de cobertura de aterro sanitário. Florianópolis, Brasil. 279 p.
- Roque, A., Montalvan, E.L.T., Boscov, M.E.G (2021). Caracterização mineralógica, química e geotécnica do lodo da estação de tratamento de água Taiaçupeba. São Paulo, Brasil. 4 p.
- Santos, E. F.; Scapin, J.; Pinheiro, R. J. B (2018). Estudo de misturas de solo com adição de lodo de estação de tratamento de água para uso em aterro sanitário. Salvador, Brasil. 8 p.
- Santos, M. D.; Carneiro, A. M. P (2021). Estudo piloto do uso do lodo de ETA's em argamassas. São Paulo, Brasil. 4 p.
- Soares, R. V.; Jabur, A. S.; Luiz, A. M (2021). Confecção de tijolos ecológicos de solo-cimento com incorporação de lodo de estação de tratamento de água: estudo de caso na cidade de Apucarana-PR. São Paulo, Brasil. 3 p.
- Tonus, B. P. A., Lautenschläger, C. E. R., Visitin, A. F., Faro, V. P., Tsuha, C. H. C. (2022). Site characterization for a study on shallow geothermal energy exploitation in Southern Brazil. *Soils and Rocks*, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 1–13.