

Influência da Adição de Lodo de ETA em Solo Laterítico por Meio de Ensaio de Adensamento Unidimensional

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 lodo de ETA é classificado como um resíduo sólido não perigoso e sua destinação mais comum é o lançamento em aterros sanitários. Há estudos analisando misturas de solo e lodo para aplicação em aterros sanitários. Conforme aumenta a quantidade de pesquisas relacionadas à utilização do resíduo em obras, observa-se a necessidade de compreender a tendência de deformação, principalmente quando ele se encontra integrado ao solo. O objetivo do presente trabalho é apresentar resultados de ensaios de adensamento unidimensional para entender a influência da incorporação de lodo na deformabilidade das misturas. Foram realizados os ensaios conforme a NBR 16853 com amostras de solo, de lodo e misturas solo-lodo em quatro porcentagens distintas (2,5%, 5%, 7,5% e 10% de substituição de solo por lodo) preparadas nas condições ótimas de compactação. Observou-se que o lodo apresentou um índice de compressão (C_c) 30 vezes maior do que o solo puro e índice de recompressão (C_r) 15 vezes maior, característica indesejada para camadas que precisam conservar suas espessuras para garantia de outras características geotécnicas, como estanqueidade e resistência, quando submetidas a sobrecargas progressivas em aterros sanitários. As misturas solo-lodo exibiram valores de C_c mais próximos do valor do solo, sendo que o maior valor não ultrapassou 5 vezes o obtido no solo puro. A incorporação do lodo nos teores avaliados aponta para a possível utilização em camadas de aterro do ponto de vista da compressibilidade, uma vez que os valores de C_c e C_r das misturas se apresentaram mais aderentes ao valor do solo puro.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de ETA, Misturas Solo-Lodo, Adensamento unidimensional.

ABSTRACT: ETA sludge is classified as a non-hazardous solid waste and its most common destination is disposal in landfills. There are studies analyzing mixtures of soil and sludge for application in landfills. As the amount of research related to the use of waste in construction increases, there is a need to understand the deformation tendency, especially when it is integrated with the soil. The objective of the present work is to present the results of one-dimensional consolidation tests to understand the influence of incorporating sludge on the deformability of the mixtures. The tests were conducted according to NBR 16853 with samples of soil, sludge, and soil-sludge mixtures in four different percentages (2.5%, 5%, 7.5%, and 10% of soil substitution by sludge) prepared under optimal compaction conditions. It was observed that the sludge presented a compression index (C_c) 30 times greater than pure soil and a recompression index (C_r) 15 times greater, an undesirable characteristic for layers that need to maintain their thickness to ensure other geotechnical

characteristics, such as impermeability and strength, when subjected to progressive overloads in landfills. The soil-sludge mixtures exhibited C_c values closer to that of the soil, with the highest value not exceeding 5 times that obtained in pure soil. The incorporation of sludge at the evaluated levels points to its possible use in landfill layers from the compressibility standpoint, as the C_c and C_r values of the mixtures were closer to the values of pure soil.

KEYWORDS: WTP Sludge, Soil-Sludge Mixtures, One-Dimensional Consolidation.

1 INTRODUÇÃO

Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA) é o resíduo proveniente da transformação da água bruta em potável e ele é composto de água e sólidos suspensos, tendo suas características variáveis dependendo da origem da água não tratada e do tratamento utilizado na estação (Roque *et al.*, 2021). O lodo pode ser classificado de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004) como um resíduo sólido da classe II-B, ou seja, não perigoso e inerte. Seu descarte recomendado seria o direcionamento para aterros sanitários, porém a prática mais usual é o descarte inadequado em corpos d'água como lagoas e rios (Knierim *et al.*, 2023).

Observa-se o aumento no número de pesquisas voltadas à reutilização do lodo de ETA para que refrear o descarte inadequado. A utilização do lodo em misturas com solo natural para aplicação em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários é um dos exemplos de pesquisas com o foco no lodo (Prim, 2011; Gonçalves *et al.*, 2016; Santos, 2018; Knierim *et al.*, 2023; Marchiori *et al.*, 2021).

Quando o aterro sanitário e os materiais utilizados para sua construção se tornam objetos de estudo, é necessário compreender certos parâmetros de comportamento do material, tal como seu desempenho diante esforços que possam causar uma tendência de deformação. Nesse contexto, compreende-se como necessário estudar a influência da adição do lodo de ETA em amostras solo-lodo diante de ensaio de adensamento unidimensional.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O lodo utilizado foi coletado na Estação de Tratamento de Água de Iraí, localizada em Pinhais – PR à 130 km da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Campus Uvaranas, Ponta Grossa – PR, onde é determinado como um solo laterítico (Tonus *et al.*, 2022).

De acordo com Fiedler (2023) e Almeida *et al.* (2023), o lodo *in natura* pode ser classificado como argila orgânica (OH) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e sua granulometria pode ser observado na Figura 1 em suas versões *in natura* e lodo seco. Os mesmos estudos apontaram que o resíduo possui 342,87% de teor de umidade quando seco à $60 \pm 5^\circ\text{C}$ e foi a partir desse valor que foi realizada a preparação das misturas solo-lodo para os ensaios realizados.

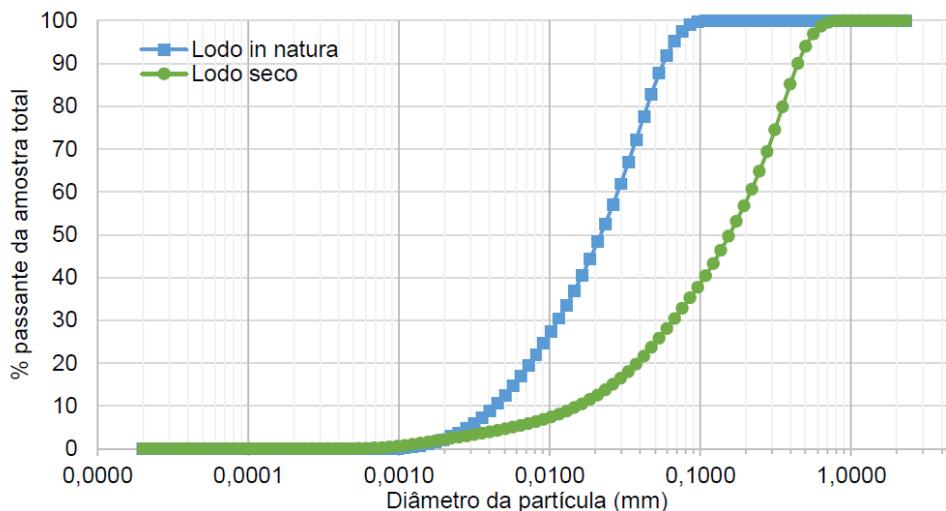


Figura 1. Granulometria do lodo de ETA.

O solo empregado no estudo foi coletado no Campo Experimental para Estudos Geotécnicos (CEEG-PG) (Figura 2) localizado no Campus Uvaranas da UEPG, onde está localizado o Laboratório de Mecânica dos Solos e Rochas, local onde os ensaios foram realizados. Além disso, de acordo com Bloinski *et al.* (2020), o solo do CEEG-PG pode ser caracterizado pelo SUCS como um silte de baixa plasticidade.

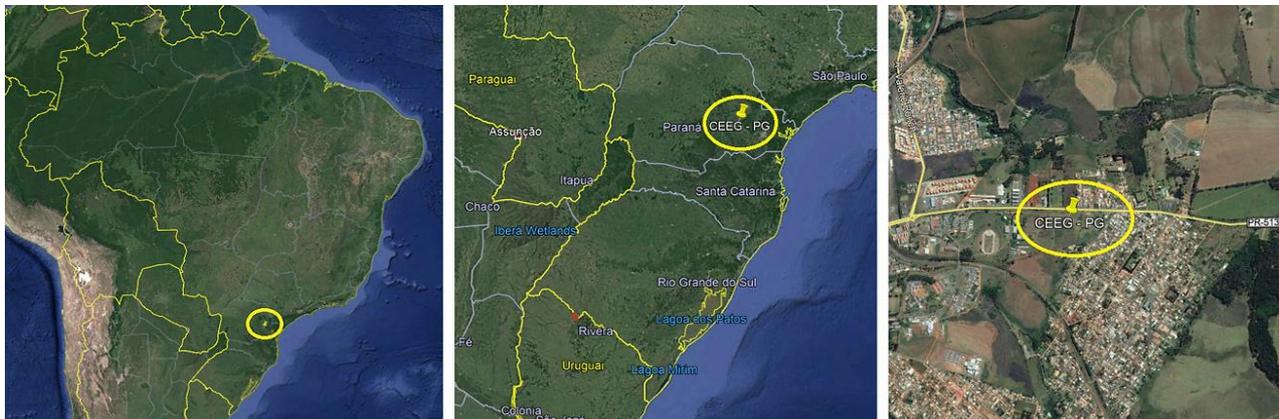


Figura 2. Indicação da localização do CEEG-PG.

As amostras utilizadas neste estudo consistiram em solo, lodo e suas combinações em quatro proporções diferentes (2,5%, 5%, 7,5% e 10% de substituição de solo por lodo), resultando em um total de seis tipos de amostras preparadas sob as condições ideais de compactação Proctor Normal, conforme detalhado na Tabela 1. As misturas solo-lodo foram preparadas com solo seco destorroado e lodo *in natura*, ou seja, o resíduo não passou por nenhum tratamento prévio.

Tabela 1. Condições de compactação ótima para preparação das amostras.

Amostra	Peso específico aparente seco máximo (gf/cm ³)	Umidade ótima (%)
Solo	1,498	24,55
Solo-Lodo 2,5%	1,428	28,20
Solo-Lodo 5%	1,305	34,20
Solo-Lodo 7,5%	1,221	39,80
Solo-Lodo 10%	1,079	46,30
Lodo <i>in natura</i>	-	-

Devido ao estado semissólido e ao alto teor de umidade da amostra de lodo *in natura*, não foi possível realizar o ensaio de compactação de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2020), assumindo-se o estado natural como a condição de ensaio. Assim, a preparação dessa amostra para o ensaio de adensamento unidimensional foi realizada manualmente, garantindo que a maior quantidade possível de material pudesse ser aplicada no molde.

As amostras foram confeccionadas em um molde circular de 50,5 mm de diâmetro com 20 mm de altura. O molde foi aplicado em uma célula de adensamento e a célula posicionada no centro da base para a execução do ensaio. Foram realizados ensaios de adensamento unidimensional conforme descrito na NBR 16853 (ABNT, 2020) e eles ocorreram em um equipamento mecanizado MS102 – Cisalhamento Automático da empresa Owntec. Ambos o equipamento e a disposição dos componentes podem ser observados na Figura 3.

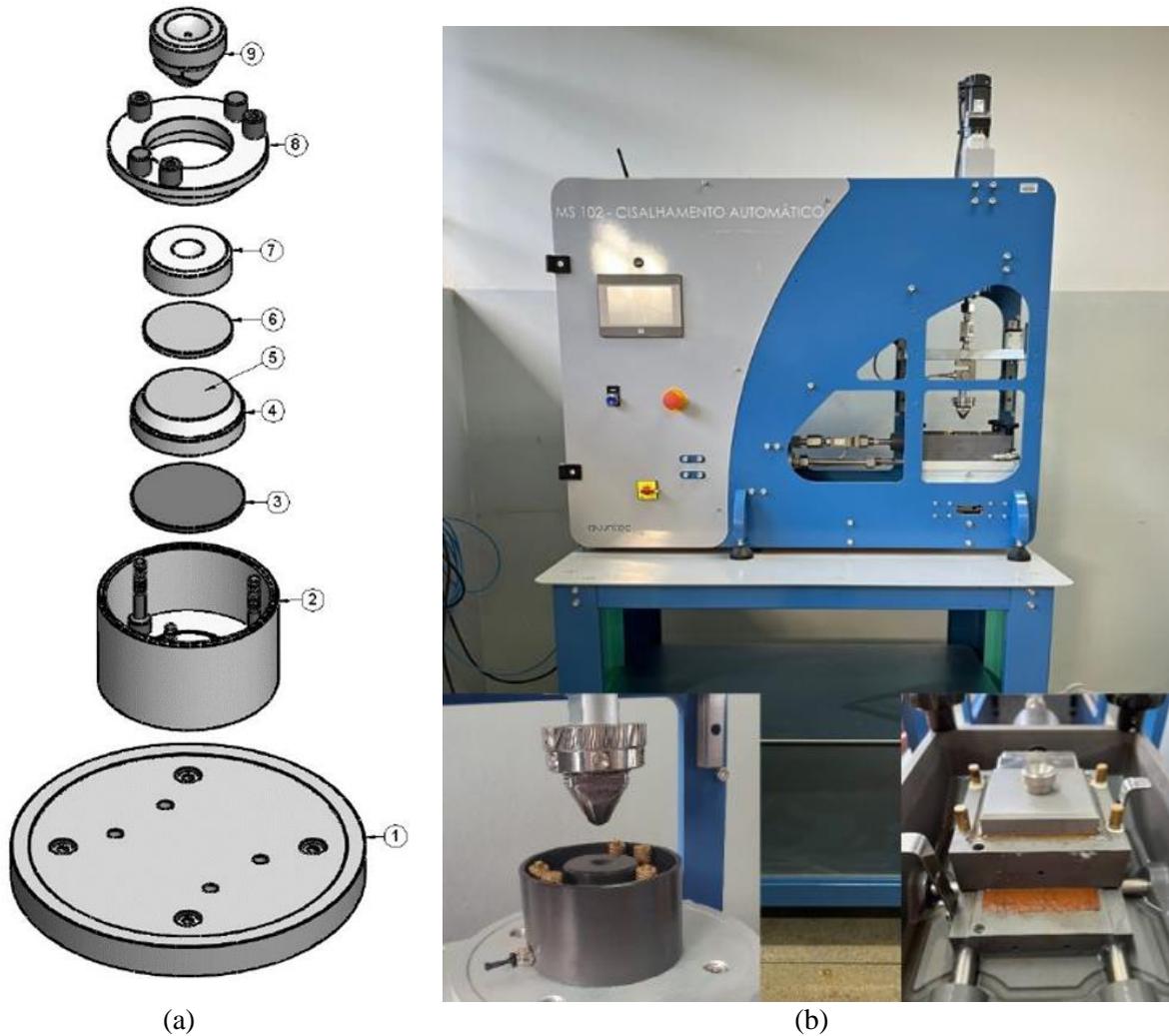


Figura 3. (a) Disposição da célula de adensamento; (b) MS-102 Cisalhamento Automático.

Cada ensaio de adensamento possuiu duas etapas de pré-carregamento, seis etapas de carregamento e três etapas de descarregamento, onde cada etapa possuiu a duração de 24 horas, visando a garantia da estabilização dos deslocamentos devido ao incremento de carga. As tensões aplicadas em cada estágio estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Cargas aplicadas nos estágios do ensaio de adensamentos.

Etapa	Estágio	Carga aplicada (kPa)
Pré-carregamento	1°	2
	2°	5
Carregamento	1°	12
	2°	25
	3°	50
	4°	100
	5°	200
	6°	400
Descarregamento	1°	200
	2°	50
	3°	12

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As curvas de adensamento do solo, do lodo e das misturas solo-lodo obtidas através dos ensaios de compressão edométrica estão demonstradas na Figura 4 e na Figura 5. A partir das curvas foi possível obter os resultados de índice de compressão (C_c) das amostras, que estão descritos na Tabela 3.

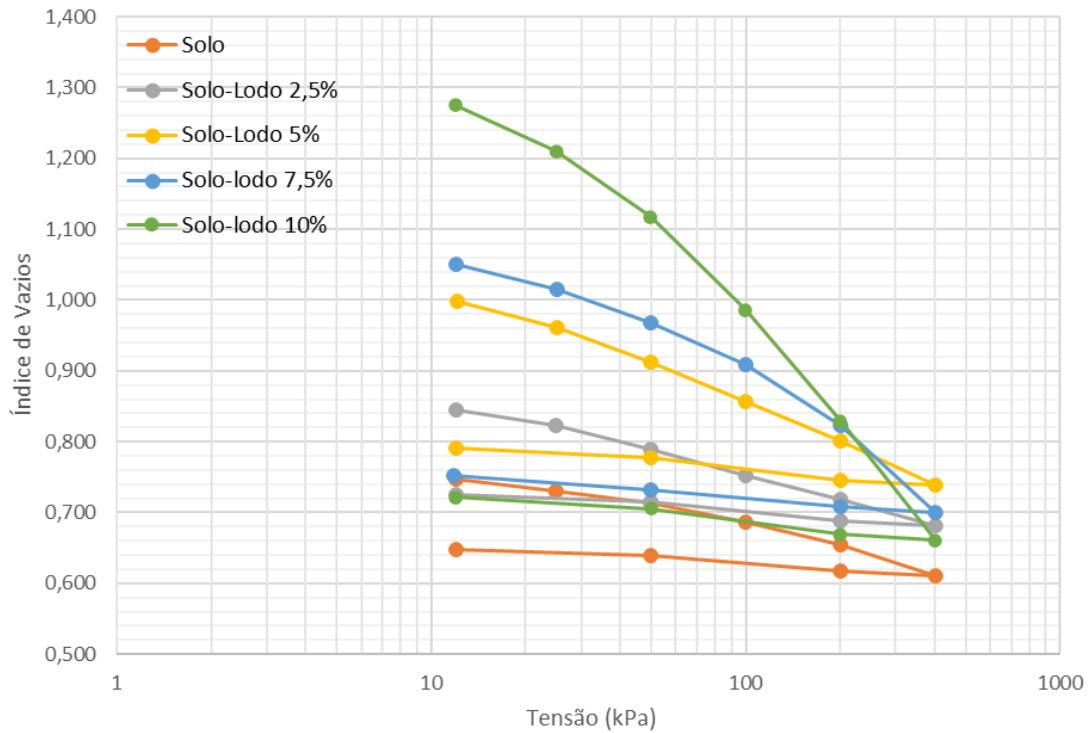


Figura 4. Curvas de compressibilidade do solo e das misturas solo-lodo.

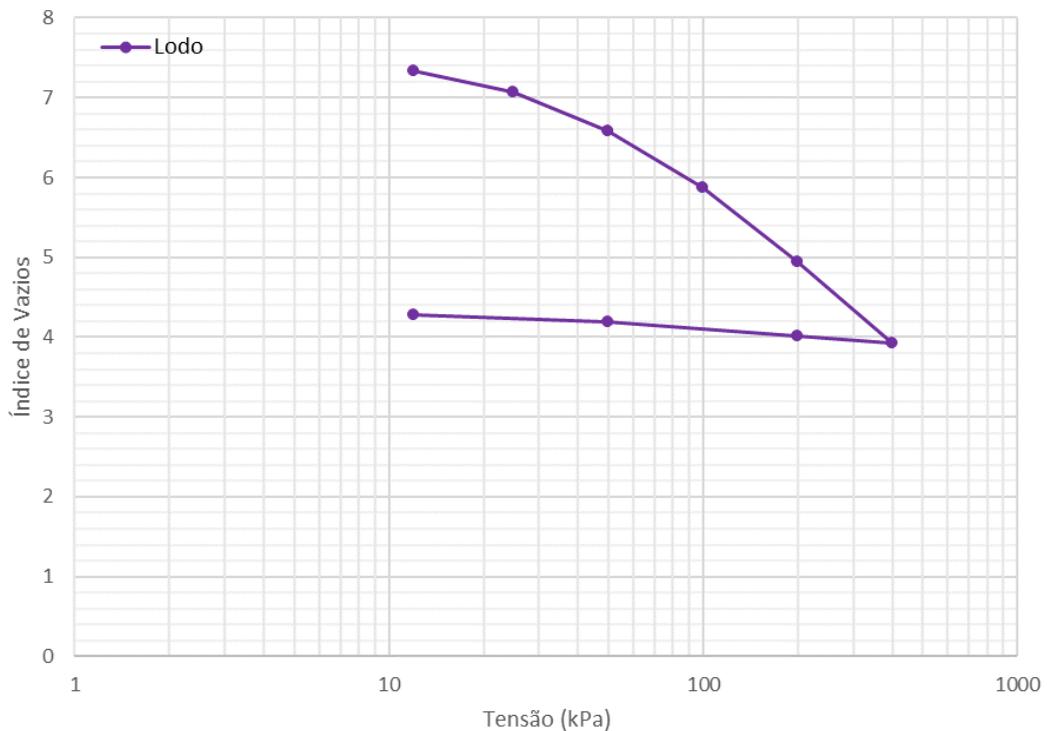


Figura 5. Curvas de compressibilidade do lodo.

Tabela 3. Índice de compressão dos amostras

Amostra	Índice de Compressão - C_c	Índice de Recompressão - C_r
Solo	0,046968	0,023314
Solo-Lodo 2,5%	0,051936	0,031602
Solo-Lodo 5%	0,080144	0,050664
Solo-Lodo 7,5%	0,124494	0,047376
Solo-Lodo 10%	0,234774	0,089122
Lodo	1,399130	0,370054

A partir dos resultados foi possível observar que o lodo apresentou um índice de compressão (C_c) aproximadamente 30 vezes maior do que o solo puro, sendo essa característica considerada indesejada para camadas de aterros sanitários que precisam conservar suas espessuras. Essa necessidade de manter a geometria é importante para a garantia de outras características geotécnicas para tal finalidade, como estanqueidade e resistência, quando submetidas a sobrecargas progressivas decorrentes dos alteamentos em aterros sanitários. Em relação ao índice de recompressão (C_r), o lodo apresentou um resultado 15 vezes maior que o solo residual, aproximadamente.

A alta compressibilidade do lodo *in natura* se justifica devido a impossibilidade de compactação do mesmo no anel de adensamento por causa de sua consistência, sendo o valor encontrado de 1,399 de índice de compressão compatível com os valores encontrados por (O’Kelly, 2016) em trabalhos semelhantes.

As misturas solo-lodo exibiram valores de C_c e C_r mais próximos do valor do solo e, mesmo identificando-se uma tendência linear de aumento dos coeficientes de compressão e recompressão conforme se aumentava a porcentagem de lodo da mistura, os maiores valores de C_c e C_r não ultrapassaram 5 vezes o obtido no solo puro.

Os resultados de índice de compressão foram inferiores aos obtidos por (Montalvan, 2016) em sua pesquisa com incorporação de 16,7%, 20% e 25% de lodo a um solo do tipo arenoso. Esse resultado indica que, em misturas com baixo percentual de adição de lodo de ETA, as características do solo são mais dominantes.

4 CONCLUSÕES

A incorporação do lodo no estado semissólido em mistura com o solo residual, nos teores avaliados, aponta para a possível utilização em camadas de aterro do ponto de vista da compressibilidade, uma vez que os valores de C_c e C_r das misturas se apresentaram mais próximos ao valor do solo puro. Entretanto, é necessário considerar sua maior deformabilidade quando comparada apenas com uso de solo.

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 (2020). NBR 16853: Solo – Ensaio de adensamento unidirecional, 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>.
- 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.
- 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.
- 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.
- O’Kelly, B. C. Geotechnics of municipal sludges and residues for landfilling. *Geotechnical Research*, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 148–179, 2016.
- 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.
- Tonus, B. et al. 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, 2022.