

Estudo de Sensibilidade da Estabilidade de Aterro Sanitário em Função de Parâmetros Geotécnicos e Altura de Lixiviado

Fernanda Camarota Barbeitos

Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, fernanda.camarota@estudante.ufjf.br

Júlia Righi de Almeida

Docente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, julia.righi@ufjf.br

Jonathan do Amaral Braz

Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, jonathan.amaral@estudante.ufjf.br

RESUMO: A estabilidade de taludes em aterros sanitários é um fator crítico na construção e operação desse tipo de obra. Assim, há diversas condições que influenciam nesse aspecto, o que pode levar à instabilidade e incidentes. De maneira geral, resíduos sólidos são heterogêneos em sua composição gravimétrica, o que implica na variabilidade do seu peso específico, parâmetros de resistência, intercepto coesivo e ângulo de atrito. Além disso, o lixiviado atua diretamente nas poropressões do aterro, de modo que sua altura é um fator que demanda atenção durante a operação. Dessa maneira, o objetivo deste trabalho é analisar a sensibilidade da estabilidade de um aterro sanitário a partir da variação dos parâmetros geotécnicos e da altura do lixiviado. Para isso, são coletados dados experimentais que são usados como entrada no software Slope/W em análises de estabilidade sequenciais. Tais análises são feitas variando os valores de um parâmetro por vez, de modo a investigar a influência individual de cada parâmetro no fator de segurança. Além disso, são consideradas diferentes configurações de altura do lixiviado. Após as análises, verificou-se que o parâmetro geotécnico dos resíduos que mais influencia de maneira positiva o fator de segurança é o ângulo de atrito, seguido pelo intercepto coesivo e peso específico. Além disso, observou-se que os resultados não atingiram o mínimo exigido para valores de ângulo de atrito iguais a 10° , e que as alturas de lixiviado de 3,2 e 4,75 metros resultaram nos fatores de segurança mais elevados.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de aterro de resíduos, resistência ao cisalhamento, lixiviado.

ABSTRACT: The slope stability in sanitary landfills is a critical factor in the construction and operation of this type of structure. In this context, there are many conditions that influence this aspect, which can lead to instability and incidents. In general, solid waste is heterogeneous in its gravimetric composition, which implies variability in its specific weight, strength parameters, cohesive intercept, and friction angle. Furthermore, leachate directly affects the pore pressures of the landfill, so its height is a factor that demands attention during operation. Thus, the objective of this work is to analyze the sensitivity of the stability of a sanitary landfill based on variations in geotechnical parameters and leachate height. For this purpose, experimental data are collected and used as input in the Slope/W software for sequential stability analyses. These analyses are performed by varying one parameter at a time, in order to investigate the individual influence of each parameter on the safety factor. Additionally, different leachate height configurations are considered. After the analyses, it was found that the geotechnical parameter of the solid waste that most positively influences the safety factor is the friction angle, followed by the cohesive intercept and specific weight. Additionally, it was observed that the results did not reach the required minimum for friction angle values equal to 10° , and that leachate heights of 3,2 and 4,75 meters resulted in the highest safety factors.

KEYWORDS: Landfill stability, shear strength, leachate.

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da geração de resíduos pela população mundial, há uma necessidade de otimização dos aterros sanitários a partir do aprimoramento das práticas de projeto, operação e monitoramento, com foco na ampliação da sua vida útil, já que são o principal meio de deposição de resíduos. De acordo com o “Global Waste Management Outlook 2024” – Relatório do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) em conjunto com a ISWA – até 2050, é previsto que a produção anual de resíduos sólidos urbanos cresça para 3,8 bilhões de toneladas. Dessa maneira, torna-se evidente que esses empreendimentos devem ser construídos de forma segura, a fim de evitar possíveis incidentes que afetem tanto a população, quanto o meio ambiente. Nos últimos anos, foram registrados diversos acidentes fatais envolvendo deslizamentos de taludes em aterros de resíduos. Segundo o G1 (2019), duas pessoas morreram vítimas de soterramento no município de Indiana (SP). Ainda de acordo com o mesmo site, um trabalhador morreu após a movimentação do solo do aterro na região metropolitana de Curitiba (G1, 2022). Nesse sentido, a análise de estabilidade dos aterros sanitários é um aspecto de extrema relevância na construção desses empreendimentos.

Diversos são os fatores que influenciam na estabilidade de talude de um aterro, entre eles os parâmetros geotécnicos dos resíduos, como a coesão, peso específico e ângulo de atrito, além da altura do lixiviado formado no aterro, que interfere nas poropressões (RIGHI, 2017). Contudo, segundo Boscov (2008), os aterros sanitários possuem uma grande heterogeneidade dos materiais que são dispostos, de modo que há uma grande variabilidade nos parâmetros dos resíduos, o que dificulta a análise de estabilidade.

Na literatura recente, há alguns trabalhos que citam a relação entre estabilidade de taludes com os parâmetros geotécnicos e a presença de fluidos, que interferem na dinâmica de tensões dos materiais. Braz *et al.* (2020) concluíram que análises de estabilidade feitas em talude de solo não saturados apresentaram menor fator de segurança levando em consideração a elevação do nível freático por conta da infiltração de água proveniente de precipitações. Além disso, Santana (2023), ao analisar a influência da percolação de lixiviado na estabilidade de um aterro industrial, constatou que taludes com a presença de fluxo de lixiviado tendem a ser mais instáveis, com a redução dos fatores de segurança.

Dessa maneira, o objetivo deste trabalho é investigar a sensibilidade da estabilidade de um aterro a partir da variação da altura do lixiviado e dos parâmetros geotécnicos, analisando quais fatores possuem maior influência no fator de segurança.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estabilidade de aterros

Um talude torna-se instável quando as tensões cisalhantes atuantes se igualam à resistência ao cisalhamento, podendo haver ruptura (GERSCOVICH, 2012). Em aterros sanitários, isso pode ocorrer devido ao aumento das pressões internas, causado pelo acúmulo de gases e de lixiviado ou por falha na drenagem desses fluidos no aterro (SANTANA, 2022).

Dessa maneira, durante a construção de um aterro, é preciso levar em consideração o Fator de Segurança (FS), definido pela NBR 11682 da ABNT (2009) como a relação entre as resistências disponíveis ao cisalhamento ao longo de uma superfície de ruptura e as solicitações cisalhantes atuantes sobre essa mesma superfície. Segundo a norma, o FS deve possuir os valores mínimos indicados na Tabela 1 a depender do nível de segurança. Dessa forma, para níveis de segurança mais elevados é necessário FS mínimo de 1,5.

Tabela 1: Fatores de Segurança mínimos (Modificado da ABNT, 2009)

Nível de segurança contra danos a vidas humanas			
Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

2.2 Parâmetros geotécnicos

Para realizar a análise de estabilidade, primeiramente é preciso caracterizar o material que compõe o aterro sanitário. Para isso, os resíduos são tratados como uma nova unidade geotécnica, incorporando a definição de Mecânica dos Solos de alguns parâmetros (BOSCOV, 2008).

O peso específico natural, representado por γ_n , e muitas vezes considerado como “peso específico”, é a relação entre o peso total do solo e seu volume total (PINTO, 2006). Para os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o peso específico está relacionado com a composição gravimétrica, distribuição granulométrica, grau de compactação, espessura da camada de cobertura, além do grau de degradação (BOSCOV, 2008).

O ângulo de atrito, representado por ϕ , é o ângulo máximo que a força transmitida pelo corpo à superfície pode fazer com a normal ao plano, sem que ocorra deslizamento causado pelo cisalhamento (PINTO, 2006). Juntamente da coesão, determinam a resistência ao cisalhamento do material. Segundo Pinto (2006), a atração química entre as partículas de solos pode gerar uma resistência independente da tensão normal que atua no plano e constitui uma coesão real (c'). No caso dos RSU, os valores de ângulo de atrito e coesão são obtidos através de estimativas baseadas em análises bibliográficas, retroanálises de ruptura e ensaios de campo e laboratório. Além disso, os resíduos não apresentam coesão no estado inicial, de modo que o intercepto coesivo é resultado do chamado “efeito-fibra”, em que os componentes fibrosos dos resíduos oferecem um mecanismo de reforço (BOSCOV, 2008).

No que diz respeito à curva tensão x deformação, os RSU também apresentam diferenças em relação a de solos tradicionais, de modo que a tensão desviadora mantém o crescimento, mesmo para altos valores de deformação, podendo não atingir o estado de ruptura. Dessa maneira, é preciso determinar um nível de deformação admissível para o maciço sanitário para especificar os parâmetros de coesão e ângulo de atrito (BOSCOV, 2008).

2.3 Altura do lixiviado

O lixiviado, também chamado de chorume, é o líquido resultante dos diversos processos físicos, químicos e biológicos dos resíduos (RIGHI, 2017). Segundo a autora, nos aterros sanitários, o lixiviado é formado pela decomposição dos resíduos e pela infiltração da água da chuva que percola pelas camadas, acumulando-se na base.

A quantidade e a composição do lixiviado sofrem interferência de fatores como: condições climáticas e hidrogeológicas da região, tipo e composição dos resíduos que compõem o aterro, além da forma de operação do aterro de resíduos (RIGHI, 2017). Assim, a geração de grande volume de lixiviado exige um sistema de drenagem eficiente. Caso contrário, haverá acúmulo de chorume, o que pode interferir na estabilidade do aterro a depender da altura alcançada (SANTANA, 2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise de estabilidade do aterro de resíduos e obtenção dos fatores de segurança, foi utilizado o software GeoStudio na versão 2022.1, por meio da licença estudantil e análise SLOPE/W. Esse programa possibilita a obtenção dos FS a partir da entrada da geometria e dos parâmetros dos materiais (FAGUNDES *et al.*, 2020). O método de cálculo adotado foi o Equilíbrio Limite, por meio da formulação de Morgenstern-Price. Após isso, foi definido que a poropressão seria obtida através da linha piezométrica, e que a superfície de pesquisa seria feita da esquerda para a direita com os valores de entrada e saída.

Ademais, foi definida a geometria do aterro de resíduos a ser considerada para a análise. Assim, o trabalho de Santana (2022) foi usado como base, em que foi feita uma análise de um aterro industrial. Dessa maneira, os pontos da geometria foram inseridos no SLOPE/W, gerando a estrutura da Figura 1. A superfície do aterro foi dividida em duas regiões, de modo que a parte inferior refere-se ao solo de fundação e a parte superior aos resíduos.

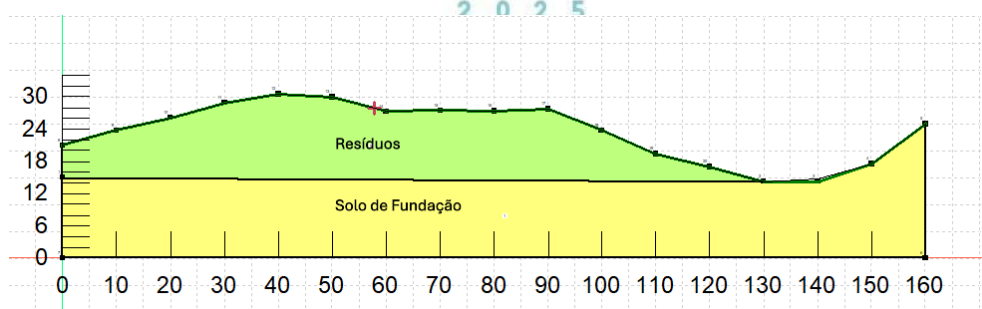


Figura 1: Geometria do aterro sanitário em metros (AUTORES, 2025)

Para a definição dos parâmetros de resistência de ambas as partes, a autora utilizou dados de um relatório técnico. Fayer *et al.* (2018) citam em seu trabalho alguns valores de referência de parâmetros de resíduos de aterros industriais. Dessa forma, para essa pesquisa, esses valores foram utilizados para as variações no peso específico, ângulo de atrito e intercepto coesivo dos resíduos, utilizando dos valores extremos, juntamente com os dados do aterro industrial (SANTANA *et al.*, 2023), resultando em três pontos para a análise de cada parâmetro, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Valores dos parâmetros geotécnicos (FAYER *et al.*, 2018; SANTANA *et al.*, 2023)

Parâmetro	Unidade	Valores
Peso específico (γ)	kN/m ³	9,3; 15; 20
Ângulo de atrito (ϕ)	°	10; 28,5; 40
Intercepto coesivo (c')	kPa	5; 8; 10,5

Santana (2022) realizou uma análise da percolação no aterro de resíduos e encontrou valores médios para a altura de percolado presente. Assim, para este trabalho, foram escolhidos três pontos para análise, considerando o valor mínimo, máximo e um intermediário de altura de lixiviado, a partir da parte superior do solo de fundação, conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Valores da variação de altura do lixiviado (SANTANA, 2022)

H (m)
3,2
4,75
6,5

A altura do lixiviado foi considerada constante até a distância horizontal de 102 metros do aterro, a partir da qual foi considerada a inclinação do talude, conforme a Figura 2.

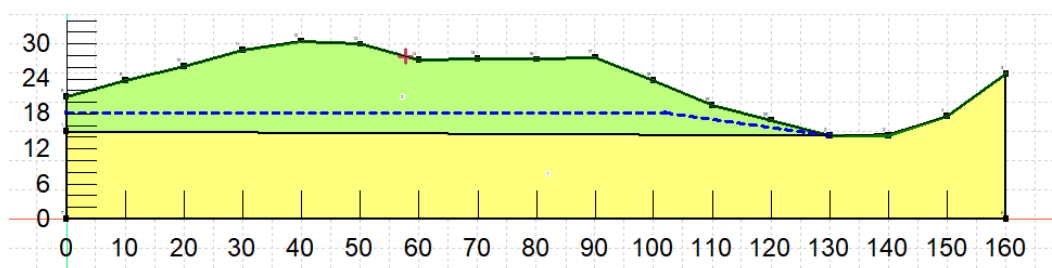


Figura 2: Altura do lixiviado do aterro sanitário (AUTORES, 2025)

A partir dos valores dos parâmetros e alturas de lixiviado escolhidos, iniciou-se as simulações de análise de estabilidade no SLOPE/W, de modo que os três pontos escolhidos para cada variável foram



testados. Assim, foram feitas 81 simulações no total, e os valores dos fatores de segurança encontrados foram analisados, visando encontrar qual variação tem mais influência na estabilidade do talude.

4 RESULTADOS

Com base nos valores de FS obtidos por meio das análises, verificou-se que o valor máximo encontrado foi de 2,538 e o mínimo foi 0,643. Além disso, a média dos valores foi de 1,547 com desvio padrão de 0,525. Do total de 81 análises, verificou-se que 47 ultrapassaram o valor mínimo exigido pela NBR 11682 da ABNT (2009).

A Tabela 4 apresenta os coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis de entrada das análises (peso específico, ângulo de atrito, intercepto coesivo e altura do lixiviado) e os valores de FS obtidos. Tais coeficientes quantificam a relação que o aumento ou a diminuição do valor de uma variável exerce no aumento ou na diminuição do fator de segurança, podendo variar de -1, sendo negativamente correlacionadas, a 1, sendo positivamente correlacionadas (Bruce e Bruce, 2019).

Tabela 4. Análise de correlação entre as variáveis e o fator de segurança (AUTORES, 2025).

Variável	Coeficiente de correlação de Pearson
Peso específico	0.01
Ângulo de atrito	0.82
Intercepto coesivo	0.23
Altura do lixiviado	-0.40

Pode-se perceber que, nessa análise, o peso específico não possui grande influência no resultado final, com índice de apenas 0,01. Essa constatação vai de encontro com os resultados esperados, visto que Fagundes *et al.* (2020) observou esse fator com a maior influência na variação do FS. Isso pode ter ocorrido pois os valores utilizados por esse autor para a variável foram menores, visto que não representam um aterro de resíduos industriais. Portanto, seria recomendado realizar outras análises com uma faixa maior de valores de peso específico, incluindo resultados inferiores para uma melhor análise da interferência desse aspecto.

Em contrapartida, o ângulo de atrito interfere significativamente no FS, apresentando um índice de 0,82 nesta análise, o que indica que seu aumento resulta em um incremento considerável no valor final do FS. A coesão, por sua vez, com índice de 0,23, representa uma influência positiva no FS, embora em menor magnitude.

Para a altura do lixiviado, o índice obtido foi de -0,40, que indica uma relação inversa dessa variável com o fator de segurança, corroborando com a análise de Santana (2022), que constatou a queda do FS com o acréscimo de líquido percolado.

Além disso, foi possível constatar que, para as análises com ângulo de atrito de 10°, em comparação com os ângulos de 28,5° e 40°, mesmo com a variação do peso específico, coesão e altura do lixiviado, os valores do FS permaneceram abaixo dos mínimos recomendados pela NBR 11682 da ABNT (2009). Ademais, apenas as avaliações com alturas de lixiviado de 3,2 e 4,75 metros indicaram um FS maior que 2, assegurando maior segurança ao empreendimento, em comparação com a altura de 6,5 metros, que não atingiu valores em tal grau. Isso ocorre pelo fato dos resíduos estarem saturados, o que influencia na estabilidade do talude. Essas constatações podem ser observadas nos gráficos de dispersão a seguir, apresentados nas Figuras 3 e 4, que demonstram, respectivamente, a dispersão dos valores de ângulo de atrito a partir do FS e intercepto coesivo e a dispersão da altura do lixiviado a partir do FS e intercepto coesivo.

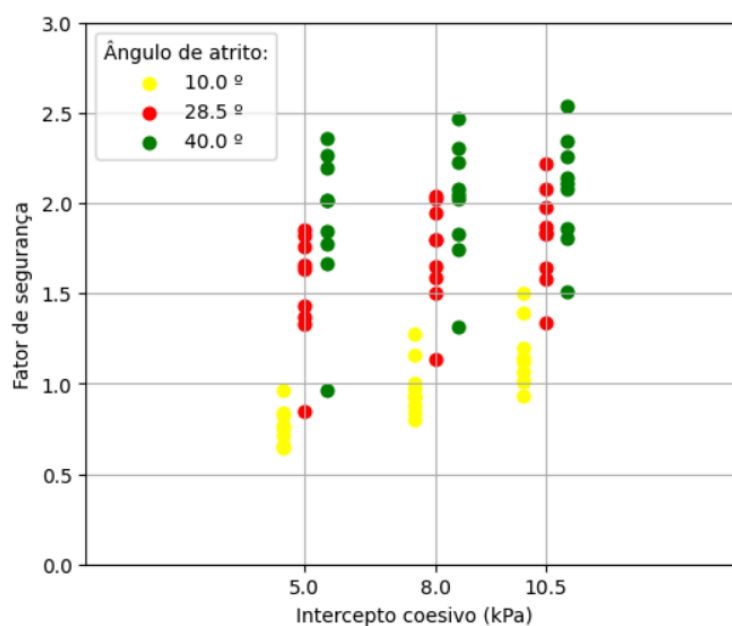


Figura 3: Gráfico de dispersão dos FS agrupados por intercepto coesivo e ângulo de atrito (AUTORES, 2025)

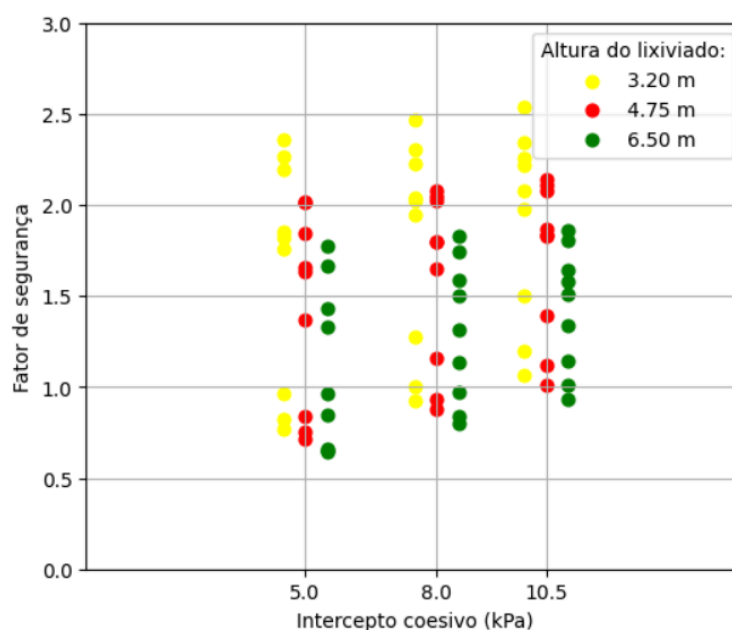


Figura 4: Gráfico de dispersão dos FS agrupados por intercepto coesivo e altura do lixiviado (AUTORES, 2025)

5 CONCLUSÃO

Foi possível obter uma conclusão acerca da influência da altura do lixiviado e dos parâmetros geotécnicos no FS de taludes de aterros de resíduos, através de uma análise de estabilidade feita por meio do software SLOPE/W. Conclui-se que o parâmetro geotécnico dos resíduos que mais apresenta influência no resultado final de maneira positiva é o ângulo de atrito, seguido pelo intercepto coesivo e pelo peso específico, respectivamente, de modo que este apresentou influência quase nula ao serem analisados resíduos industriais.



Além disso, foi possível constatar que, para valores de ângulo de atrito iguais a 10° , o FS não atinge os padrões mínimos exigidos pela NBR 11682 da ABNT (2009), mesmo com a mudança das outras variáveis. Por fim, as alturas de percolado de 3,2 e 4,75 metros foram as que resultaram em fatores de segurança mais elevados, representando maior segurança e estabilidade.

Ressalta-se que este se trata de um estudo preliminar no processo de investigação da influência que a variabilidade dos parâmetros geotécnicos exerce na estabilidade de aterros. Dessa forma, sugere-se para trabalhos futuros que sejam feitas análises probabilísticas a partir dos dados apresentados, usando o Método das Estimativas Pontuais e o Método de Monte Carlo, a fim de apresentar resultados mais refinados das análises feitas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682: *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Boscov, M. E. G. (2008) *Geotecnia Ambiental*, 1a ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 248 p.
- Braz, J. A., Rodriguez, T. T., Penasso, S. M., Jeronymo, L. L. (2020) A influência da infiltração em solo não saturado na estabilidade de talude. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG. *Anais...* ABMS.
- Bruce, P., Bruce, A. (2019) *Estatística Prática para Cientistas de Dados – 50 Conceitos Essenciais*, 1a ed, Alta Books, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Fagundes, Y. L., Carvalho, A. S., Motta, E. F. B., Righi, J. A., Marangon, M. (2020) Análise dos parâmetros de resistência dos resíduos sólidos em geometria de aterro sanitário em Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG. *Anais...* ABMS.
- Fayer, S. K., Righi, J. A., Riccio, M. V. F., Souza, J. H., Santos, G. (2018) Análise de estabilidade de aterro de resíduos Classe I. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG. *Anais...* ABMS.
- Gerscovich, D. M. S. (2012) *Estabilidade de taludes*, 2a ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 192 p.
- G1. *Após deslizamento em aterro de Fazenda Rio Grande que matou operador, moradores reclamam de cheiro forte de lixo*. G1, Paraná, 2 jul. 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pr/parana/noticia/2022/07/02/apos-deslizamento-em-aterro-de-fazenda-rio-grande-que-matou-operador-moradores-reclamam-de-cheiro-forte-de-lixo.ghtml>>. Acesso em: 24 jun. 2025.
- G1. *Duas pessoas morrem vítimas de soterramento no aterro sanitário de Indiana*. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/presidente-prudente-regiao/noticia/2019/01/14/soterramento-em-indiana.ghtml>>. Acesso em: 24 jun. 2025.
- Pinto, C. S. (2006) *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*, 3a ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 367p.
- Righi, J. A. (2017) *Proposta de índice de avaliação de aterros de resíduos desativados a partir do potencial poluidor do lixiviado*. Tese de Doutorado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 190p.
- Santana, A. H. S., Righi, J. A., Araújo, A. C. S., Ribeiro, M. F. M., Martins, C. P. (2023) Análise da percolação de lixiviado e sua influência na estabilidade de um aterro industrial. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO. *Anais...* ABMS.
- Santana, A. H. S. (2025) *Análise da percolação de lixiviado e sua influência na estabilidade de um aterro industrial*. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, 96 p.
- United Nations Environment Programme; International Solid Waste Association. (2024) *Global Waste Management Outlook 2024*. Nairobi.