XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/87

Estabilidade de Aterro Sanitário com RSU em Diferentes Idades por Método Determinístico e Probabilístico

Fernanda Camarota Barbeitos
Discente, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, nandacb.jes@gmail.com

Jonathan do Amaral Braz
Discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, jonathan.amaral@estudante.ufjf.br

Júlia Righi de Almeida
Docente do Departamento de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, julia.righi@ufjf.br

RESUMO: A estabilidade de taludes em aterros sanitários representa um aspecto essencial tanto na etapa de implantação quanto durante a operação dessas estruturas, de modo que está diretamente relacionada à segurança e confiabilidade do empreendimento. De modo geral, resíduos sólidos apresentam composição gravimétrica heterogênea, o que acarreta variações em seus parâmetros de resistência, influenciando na análise de estabilidade. Ademais, a degradação dos resíduos ao longo dos anos de disposição também atua diretamente na variação desses parâmetros. Assim, o objetivo deste trabalho é realizar análises de estabilidade para um talude de aterro sanitário com resíduos de diferentes idades, a fim de verificar a influência do tempo de disposição e da variabilidade do material aterrado na estabilidade do aterro. Para isso, são utilizados dados da literatura referentes aos parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos, os quais são aplicados na análise de estabilidade de taludes determinística e probabilística, por meio do Método de Monte Carlo, que consiste na geração de amostras aleatórias dos parâmetros de resistência, implementado em algoritmo em Python. Os resultados demonstram que ambas as análises indicam um aumento do fator de segurança com a decomposição dos resíduos. Porém, no cálculo probabilístico há um elevado risco de falha, apesar do estágio de decomposição do material. Assim, evidencia-se a importância da avaliação determinística juntamente com a probabilística para que os riscos sejam analisados corretamente e para que haja maior segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Aterro Sanitário, Método de Monte Carlo.

ABSTRACT: Slope stability in sanitary landfills represents an essential aspect during the construction phase and the operation of these structures, as it is directly related to the safety and reliability of the facility. In general, solid waste presents a highly heterogeneous gravimetric composition, which results in variations in its strength parameters and influences the slope stability analysis process. In addition, the degradation of waste over the years of disposal also directly affects the variation of these parameters. Thus, the objective of this study is to perform stability analyses of a sanitary landfill slope with different ages, in order to evaluate the influence of disposal time and waste variability on landfill stability. For this purpose, literature data related to the strength parameters of municipal solid waste are used and applied in both deterministic and probabilistic slope stability analyses, through the Monte Carlo Method, which consists of generating random samples of the shear strength parameters, implemented in a Python algorithm. The results show that both analyses indicate an increase in the factor of safety with the decomposition of the waste. However, in the probabilistic analysis, a high risk of failure is observed despite the waste decomposition. Therefore, the importance of combining deterministic and probabilistic evaluations is highlighted in order to properly investigate risks and ensure greater safety.

KEYWORDS: Slope Stability, Sanitary Landfill, Monte Carlo Method.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), nos últimos anos, o crescimento do PIB (Produto Interno Bruto) e do comércio no Brasil levou a um grande aumento no consumo, o que implica na maior geração de resíduos pela população e na demanda de estruturas adequadas para sua disposição. A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS, 2010), estabelece uma ordem de prioridade para a gestão de resíduos, baseada na não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e, por fim, disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Assim, os aterros sanitários tornam-se a forma mais adequada para a destinação final dos resíduos, de maneira que englobam práticas como a divisão de células, compactação e cobertura dos resíduos, sistema de impermeabilização, sistemas de drenagem e tratamento para gases e lixiviado, além de monitoramento geotécnico e ambiental (Boscov, 2008). Portanto, a partir da necessidade de construção dessas estruturas, observa-se a ocorrência de acidentes relacionados à instabilidade de taludes em aterros sanitários, os quais podem provocar impactos ambientais expressivos e riscos à segurança da população (G1, 2022; Revista Limpeza Pública, 2019).

A estabilidade de um aterro sanitário depende de diversos fatores, entre eles o comportamento dos resíduos, influenciado por sua composição gravimétrica, grau de degradação, peso específico, poropressão, teor de umidade, compressibilidade entre outros. A ampla variação na composição gravimétrica reflete em um comportamento geomecânico igualmente heterogêneo, afetando diretamente a resistência dos resíduos e tornando mais complexa a definição de parâmetros que representem adequadamente o material ao longo do maciço. Além disso, o envelhecimento dos resíduos e a decomposição causa alterações nas características do aterro sanitário, de forma que é difícil a previsão do seu comportamento. Dessa forma, a avaliação adequada do comportamento mecânico dos resíduos torna-se essencial para a análise de estabilidade de taludes e para a prevenção de falhas geotécnicas em aterros sanitários (Boscov, 2008).

De acordo com Gerscovich (2016), a análise de estabilidade tem como finalidade a avaliação da possibilidade de escorregamento de massa de um talude natural ou construído. Assim, é feita uma comparação entre as tensões de cisalhamento atuantes com a resistência ao cisalhamento, através do Fator de Segurança (FS). A NBR 11682 da ABNT (2009) determina que um maior valor de FS equivale a um maior nível de segurança com relação à ruptura. Assim, a partir da determinação do risco enquadrado para a situação em análise, é determinado um FS mínimo a ser considerado, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Fatores de segurança mínimos (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

Segundo o critério de ruptura de Mohr–Coulomb, a resistência ao cisalhamento pode ser representada por uma envoltória linear no plano tensão cisalhante versus tensão normal. O ângulo de atrito (ϕ) representa a inclinação da envoltória de ruptura e indica o aumento da resistência ao cisalhamento com o acréscimo da tensão normal aplicada. Já a coesão (c) corresponde ao intercepto da envoltória no eixo das tensões cisalhantes, representando a parcela da resistência independente da tensão normal (Das, 2007; Pinto, 2006). Para resíduos sólidos urbanos, esses parâmetros podem ser obtidos por ensaios de campo, laboratoriais e retroanálises.

A grande parte dos métodos de análise de estabilidade para o cálculo do FS foram elaborados por meio da Teoria do Equilíbrio Limite, na qual há uma hipótese de que a massa de solo é considerada um corpo

rígido que desliza sobre uma linha de escorregamento conhecida, seja plana, circular ou mista, respeitando o critério de Mohr-Coulomb (Pinto, 2006). Assim, as equações de Mecânica dos Solos são empregadas diretamente para a verificação do equilíbrio da superfície em estudo, por meio do cálculo direto do FS, de modo que é uma análise determinística (Bueno; Vilar, 1985; Gerscovich, 2016).

Para o contexto de aterro de resíduos, a análise puramente determinística apresenta limitações devido à grande variabilidade dos parâmetros e pelo número limitado de amostras. A análise probabilística é uma alternativa que inclui um tratamento estatístico que incorpore as incertezas intrínsecas ao FS determinado pelos métodos tradicionais. Dessa maneira, os métodos probabilísticos possibilitam uma representação mais realista da variabilidade dos resíduos e dos parâmetros geotécnicos, de maneira que contribuem para a tomada de decisões mais seguras no projeto e operação dos aterros. Para isso, abordam os conceitos de probabilidade de falha ou índice de confiabilidade para indicar a estabilidade de maciços (Barbeitos; Righi; Braz, 2025; Gerscovich, 2016; Mehdizadeh et al., 2020).

2 METODOLOGIA

2.1 Coleta de dados

A coleta de dados para as simulações foi estruturada de modo a garantir representatividade geométrica e realismo nos parâmetros de entrada. Adotou-se a geometria de aterro apresentada por Gerscovich (2016), por se tratar de uma configuração consolidada na literatura e com dimensões típicas de projetos de engenharia. Essa escolha fornece base confiável para a modelagem numérica e permite a comparação dos resultados com estudos previamente publicados. A geometria adotada é apresentada na Figura 1.

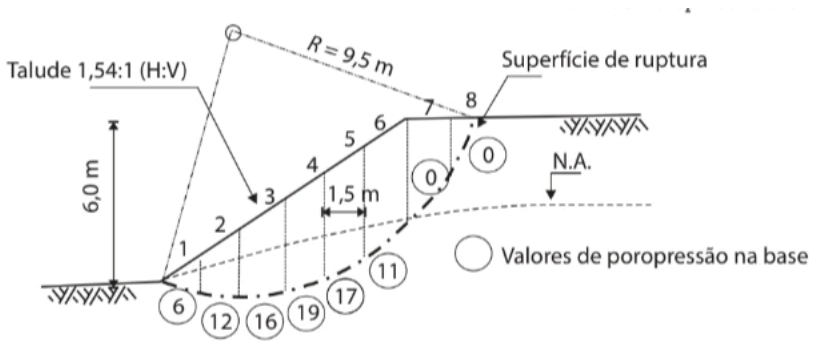


Figura 1. Exemplo de geometria adotada (Gerscovich, 2016)

Dessa forma, a partir do formato utilizado como base e dos dados fornecidos por Gerscovich (2016), é possível inferir os dados fixos das fatias que serão utilizadas posteriormente no modelo para a implementação do método, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Dados de cada fatia (Gerscovich, 2016)

Fatia	b (m)	h (m)	l (m)	α (°)	$u\ (kN/m^2)$
1	1,5	0,8	1,6	-14,6	6,0
2	1,5	1,8	1,5	0,0	12,0
3	1,5	2,8	1,6	14,6	16,0
4	1,5	3,5	1,6	20,4	19,0
5	1,5	3,9	1,7	28,0	17,0
6	1,5	4,0	2,0	40,0	11,0
7	1,5	3,0	2,4	50,3	0,0
8	1,0	1,2	2,2	63,6	0,0

Os parâmetros de intercepto coesivo e ângulo de atrito foram adotados a partir do estudo estatístico de Daciolo (2020), que avaliou a variabilidade da resistência dos RSU para análises probabilísticas. O autor diferenciou resíduos menos decompostos e mais degradados, representando a heterogeneidade vertical do maciço. Neste trabalho, essas condições são denominadas Resíduos Novos e Resíduos Antigos, permitindo comparar o comportamento em diferentes estágios de decomposição. Os dados adotados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros geotécnicos dos resíduos (Adaptado de Daciolo, 2020)

Material	Propriedade	Valor Médio	Desvio Padrão
Resíduos Novos	c'(kPa)	15,8	15,7
	$\phi'(°)$	22,2	9,6
Resíduos Antigos	c'(kPa)	19	15,7
	$\phi'(°)$	26,7	9,6

.

Para os valores de peso específico, Daciolo (2020) utilizou uma distribuição uniforme para os valores adotados, que foi mantida para esse estudo, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4. Valores de peso específico dos resíduos (Adaptado de Daciolo, 2020)

Material	Peso específico (KN/m^3)
Resíduos Novos	9
Resíduos Antigos	11

2.2 Análise de estabilidade

A análise de estabilidade foi realizada pelo método de Fellenius, escolhido por sua aplicabilidade a diferentes geometrias e por fornecer resultados conservativos de FS (Gerscovich, 2016). Inicialmente, foi conduzida uma análise determinística com valores médios dos parâmetros de resistência. Para considerar a variabilidade dos resíduos, empregou-se o método probabilístico de Monte Carlo, que consiste na geração de um grande número de amostras aleatórias de variáveis de entrada de um modelo matemático a partir de medidas estatísticas de tendência definidas (McClarren, 2018). Assim, foi possível avaliar o valor esperado do FS, a probabilidade de ruptura e o índice de confiabilidade para Resíduos Novos e Antigos, conforme o U.S. Army Corps of Engineers (1995).

A implementação da análise de estabilidade foi realizada a partir do desenvolvimento de um algoritmo em Python que executasse as análises de estabilidade determinística e probabilística através do Método de Fellenius. Na etapa probabilística, utilizou-se o método de Monte Carlo com geração de amostras aleatórias de intercepto coesivo e ângulo de atrito, assumindo distribuição normal com as médias e desvios padrão apresentados na Tabela 3 e limites físicos compatíveis com resíduos sólidos urbanos. Foram realizadas simulações com diferentes tamanhos de amostra (100, 10000 e 100000) para avaliação da convergência, e calculados o valor esperado do FS e a probabilidade de ruptura (relação entre a quantidade de simulações com FS menores que 1 e o total de simulações), além da análise gráfica dos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir das simulações executadas para os Resíduos Novos e Resíduos Antigos podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultado das análises (Autores, 2026)

Material	Simulações	Valor esperado do FS	Probabilidade de Ruptura
Resíduos Novos	Determinística	1,747	-
	100	1,151	11%
	10000	1,985	13,87%
	100000	1,959	13,86%
	Convergência	1,77	13,9%
Resíduos Antigos	Determinística	1,851	-
	100	2,036	10%
	10000	1,930	10,97%
	100000	2,027	10,96%
	Convergência	1,86	10,9%

A análise de estabilidade pelo método determinístico, tanto para resíduos novos quanto para antigos, resultou em valores de FS acima de 1,5, indicando condições de estabilidade e um nível de segurança alto de acordo com a ABNT (2009). Além disso, a degradação dos resíduos causou um aumento do FS, o que aponta uma melhora na estabilidade. Esse resultado é esperado devido ao aumento dos valores absolutos dos parâmetros de resistência de ângulo de atrito e intercepto coesivo, além do aumento do peso específico, proporcionando um aumento da resistência ao cisalhamento a partir do aumento da idade dos materiais dispostos.

Na análise pelo método probabilístico, a execução de 100 simulações resultou em distribuições pouco representativas dos parâmetros geotécnicos e dos valores de FS, de maneira que a representação estatística das amostras ainda é insuficiente para representar a variabilidade real dos parâmetros. Assim, ao executar um maior número de simulações, observa-se uma distribuição melhor definida, até a convergência, indicando que o volume de amostras utilizado foi suficiente para representar a variabilidade. Para os resíduos novos, a convergência de valores ocorreu a partir de 40000 amostras, enquanto para os resíduos antigos ocorreu a partir de 20000, como pode ser observado nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

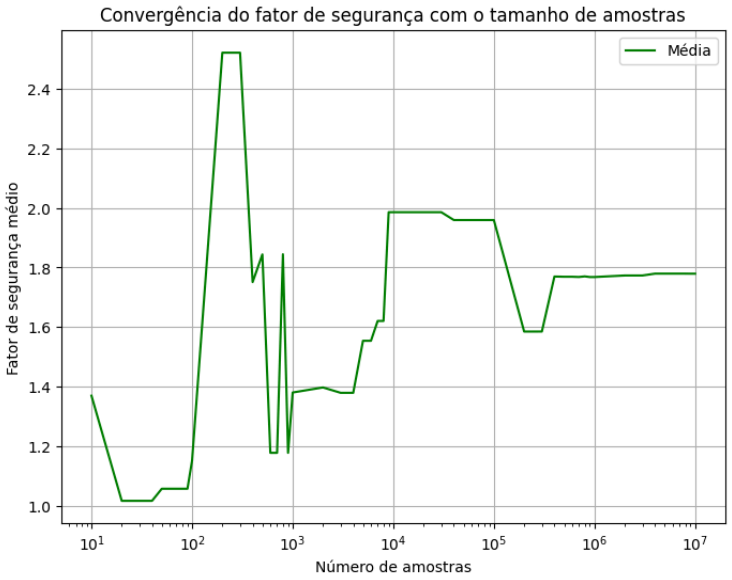


Figura 2. Convergência do FS para resíduos novos (Autores, 2026)

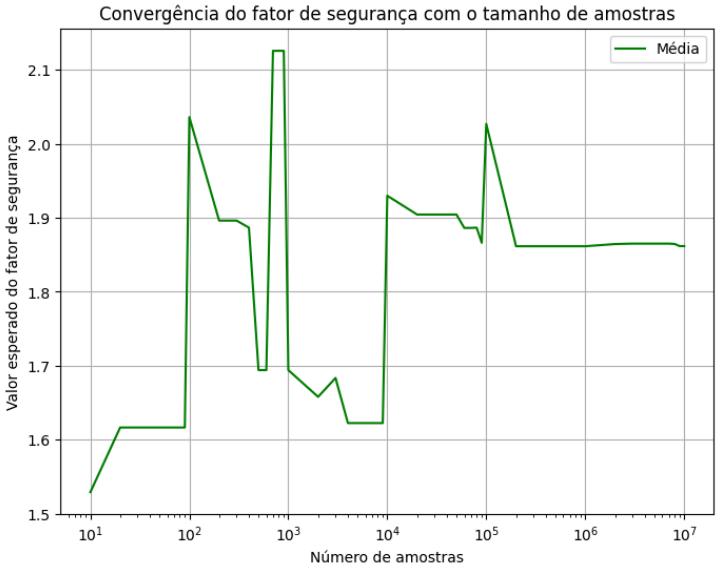


Figura 3. Convergência do FS para resíduos antigos (Autores, 2026)

A partir da convergência, os resultados do FS para resíduos novos tendem a 1,77, o que indicaria um nível adequado de segurança segundo a ABNT (2009). Contudo, a probabilidade de ruptura converge para 13,9%, o que representa um nível de desempenho entre Insatisfatório e Perigoso, de acordo com a classificação do U.S. Army Corps of Engineers (1995). Para os resíduos antigos, os valores de FS convergem para 1,86 e a probabilidade de ruptura para 10,9%, também indicando um nível adequado de segurança para a ABNT (2009), porém um nível de desempenho entre Insatisfatório e Perigoso, de acordo com a classificação do U.S. Army Corps of Engineers (1995).

Os resultados dos valores esperados de FS na análise probabilística confirmam os resultados obtidos na análise determinística, indicando que a decomposição dos resíduos contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento do maciço estudado. Ademais, embora o FS tenha apresentado um resultado satisfatório, a probabilidade de ruptura se manteve em um grau alto de risco, mesmo com a sua redução para resíduos mais degradados. Esse comportamento indica que, apesar da tendência central indicar condições estáveis, há uma parcela significativa das simulações em que o FS se iguala ou permanece inferior a 1,0. Isso ocorre devido à grande variabilidade dos parâmetros, de modo que a dispersão dos seus valores ainda interfere negativamente no FS, mesmo com o aumento da resistência.

Além disso, os valores utilizados para a poropressão podem ter influenciado os resultados. A pressão negativa foi fixada de acordo com o modelo proposto por Gerscovich (2016), não sofrendo modificações a partir do envelhecimento dos resíduos. Entretanto, é esperado que o volume total de lixiviado presente em um aterro sanitário reduza a partir da estabilização da decomposição dos resíduos, o que reduziria a poropressão. Dessa maneira, os valores obtidos para os resíduos mais antigos poderiam oferecer condições mais seguras em termos de estabilidade e ruptura do aterro, caso essa redução fosse considerada

Ademais, ao comparar as análises determinísticas e probabilísticas, observa-se que os resultados de FS possuem valores próximos, o que indica que o cálculo determinístico representou uma boa aproximação do valor real do FS. Porém, ao incluir a probabilidade de falha, a análise de estabilidade torna-se mais completa, de modo que se verifica o risco associado à segurança do maciço.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a estabilidade de um talude de aterro sanitário considerando resíduos com diferentes idades, por meio de abordagens determinística e probabilística, a fim de analisar a influência da decomposição e da variabilidade do material na estabilidade do aterro. Os resultados obtidos evidenciam que a análise determinística, embora amplamente utilizada na prática, pode não representar de forma adequada o risco associado à instabilidade, uma vez que não considera a heterogeneidade dos resíduos. Por outro lado, a análise probabilística permitiu uma avaliação mais realista do problema, ao considerar a variabilidade dos parâmetros de resistência e fornecer informações adicionais relacionadas à probabilidade de ruptura e ao nível de confiabilidade do talude.

Os valores esperados do FS obtidos na análise probabilística confirmam a tendência identificada na análise determinística, reforçando que o processo de decomposição e envelhecimento dos resíduos promove um aumento da resistência ao cisalhamento do maciço em estudo. Contudo, apesar de os fatores de segurança apresentarem valores satisfatórios, a probabilidade de ruptura permaneceu em um nível considerado elevado de risco, mesmo após a sua redução para resíduos mais degradados.

Ademais, a avaliação da convergência dos resultados obtidos por meio do Método de Monte Carlo mostrou-se essencial para a validação das análises probabilísticas realizadas. A estabilização dos resultados ocorreu para quantidades distintas de simulações para resíduos novos (400000 amostras) e para resíduos antigos (200000 amostras).

Dessa forma, conclui-se que a utilização de análises probabilísticas constitui uma ferramenta relevante e complementar às abordagens tradicionais, contribuindo para uma avaliação mais consistente da estabilidade de taludes em aterros sanitários e para a tomada de decisões mais seguras no projeto e na operação dessas estruturas.

Com base nos resultados e nas limitações identificadas neste estudo, sugere-se a execução de análises considerando a influência da dissipação de poropressões, bem como a variação do nível de lixiviado ao longo do tempo. Além disso, realizar a comparação de diferentes métodos probabilísticos além do Método de Monte Carlo, avaliando a aplicabilidade e sensibilidade no contexto de aterros sanitários. Por fim, analisar estudos de casos de falhas em aterros sanitários para verificar a aplicabilidade do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682: *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente – ABREMA. (2024) *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024*. São Paulo. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/>. Acesso em: 15 set. 2025.

Barbeitos, F. C.; Righi, J. A.; Braz, J. A. Avanços em Estudos de Estabilidade de Taludes em Aterros Sanitários. (2025) In: IX Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas - COBRAE, Garibaldi. *Anais*… ABMS, p. 313-318.

Boscov, M. E. G. (2008) *Geotecnia Ambiental*, 1a ed., Oficina de Textos, São Paulo, SP, Brasil, 248 p.

Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). PIB cresce 3,4% em 2024 e fecha o ano em R$ 11,7 trilhões. *Agência de Notícias IBGE*, Brasília, 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/42774-pib-cresce-3-4-em-2024-e-fecha-o-ano-em-r-11-7-trilhoes>. Acesso em: 20 ago. 2025.

Bueno, B. S.;Vilar, O. M. (1985) *Mecânica dos Solos Volume II*, São Carlos, 219 p.

Daciolo, L. V. P.; Correia, N. S.; Boscov, M. E. G.; Kamiji, T. S. M. M. (2020) *Abordagem probabilística em análises de estabilidade de aterros sanitários: caso da ruptura do aterro Sítio São João*. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, São Paulo. *Anais*... ABMS.

Das, B. M. (2007) *Fundamentos de engenharia geotécnica.* Tradução All Tasks. Tradução da 6. ed. norte-americana. São Paulo: Thomson Learning, 562p.

G1. *Operador de retroescavadeira cai em barranco e é soterrado em aterro sanitário de Fazenda Rio Grande.* Disponível em:

<https://g1.globo.com/pr/parana/noticia/2022/06/26/operador-de-retroescavadeira-cai-em-barranco-e-e-so terrado-em-aterro-sanitario-de-fazenda-rio-grande.ghtml>. Acesso em: 07 nov. 2025.

Gerscovich, D. M. S. (2016) *Estabilidade de taludes*. 2 ª Edição, São Paulo, Oficina de Textos, 192 p.

McClarren, R. G. (2018) *Uncertainty quantification and predictive computational science*. Cham: Springer Nature Switzerland.

Mehdizadeh, M. J.; Shariamadari, N.; Karimpour-Fard, M. (2020) *Probabilistic slope stability analysis in Kahrizak landfill: effect of spatial variation of MSW's geotechnical properties*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 79, n. 5, p. 2679–2695, ISSN 14359537.

Pinto, C. d. S. (2006) *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 367 p.

Revista Limpeza Pública, São Paulo, n. 101, jul./set. 2019. *Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública* – ABLP.

USACE. (1985) *Introduction to Probability and Reliability Methods for Use in Geotechnical Engineering, Engineering and Design* - Rep. No. 20314–1000. Washington, USA.