



## Avanços em Estudos de Estabilidade de Taludes em Aterros Sanitários

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:** Com o aumento da geração de resíduos sólidos pela população, observou-se um crescimento no número de aterros sanitários no Brasil, uma vez que é a única forma de destinação final ambientalmente adequada dos rejeitos. Nesse contexto, um aspecto imprescindível a ser considerado no planejamento, construção e operação dos aterros é a estabilidade. Fatores como a variabilidade dos parâmetros de resistência dos resíduos, bem como a altura de lixiviado presente no aterro, podem influenciar neste aspecto, podendo, em alguns casos, serem responsáveis por instabilidade e acidentes. Dada a importância deste tipo de estudo, entende-se que há respaldo para produção acadêmica acerca do tema, como estudos de caso e simulações a partir de dados experimentais. Assim, o objetivo deste trabalho é realizar um mapeamento da literatura recente relacionada a análises de estabilidade de aterros sanitários. Para isso, foram realizadas buscas em bases de dados de publicações feitas nos últimos anos relacionadas a este assunto. Os trabalhos encontrados foram agrupados em três temáticas (Influência no tempo de deposição dos resíduos na estabilidade, Influência do lixiviado na estabilidade e Métodos estatísticos e probabilísticos na análise de estabilidade) e apresentados neste artigo de forma sucinta, destacando seus objetivos e suas principais contribuições. Assim, foi possível identificar tendências nas publicações recentes, assim como reconhecer lacunas e oportunidades de novas abordagens.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aterro sanitário, estabilidade de talude, resíduos urbanos.

**ABSTRACT:** With the rise of solid waste generation by the population, there has been a growth in the number of landfills in Brazil, since it is the only environmentally appropriate method for final disposal of waste. In this context, an essential aspect to be considered in the planning, construction, and operation of landfills is stability. Factors such as the variability of waste strength parameters, as well as the height of leachate in the landfill, can influence this aspect and, in some cases, may be responsible for instability and accidents. Given the importance of this type of study, there is support for academic production on the subject, including case studies and simulations based on experimental data. Thus, the objective of this work is to perform a mapping of recent literature related to stability analyses of landfills. For this purpose, searches were conducted in publication databases over the past years related to this topic. The works found were grouped into three themes (Influence of waste deposition time on stability, Influence of leachate on stability, and Statistical and probabilistic methods in stability analysis) and are presented in this article in a concise manner, highlighting their objectives and main contributions. Thus, it was possible to identify trends in recent publications, as well as recognize gaps and opportunities for new approaches.

**KEYWORDS:** Sanitary landfill, slope stability, urban waste.



## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o IBGE (2025), o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro cresceu 3,4% no ano anterior, de modo que o comércio teve crescimento de 3,8%. Isso evidencia o crescimento cada vez maior do consumo pela população, causando a geração de mais resíduos que devem ser depositados de forma correta. Dessa maneira os aterros sanitários tornam-se o principal meio de deposição dos resíduos, e devem ser construídos levando em consideração não só a eficiência, mas também a segurança, de modo a evitar acidentes. Nesse contexto, a estabilidade dos taludes desses aterros deve ser levada em consideração, visto que muitos acidentes decorrem de deslizamentos.

Um dos primeiros acidentes registrados envolvendo aterros de resíduos de grande porte foi o do Aterro Bandeirantes em São Paulo no ano de 1991. Nessa ocasião, cerca de 65 mil metros cúbicos de resíduos se desprenderam do maciço e grande parte atingiu a beira de uma estrada. A partir desse deslizamento, os estudos, técnicas e cuidados relacionados com a construção e operação de aterros sanitários cresceram significativamente, principalmente com relação à estabilidade (Revista Limpeza Pública, 2019).

A estabilidade dos aterros sanitários pode ser afetada por vários fatores e a depender dos tipos de resíduos depositados e da sua heterogeneidade, os valores dos parâmetros geotécnicos (ângulo de atrito, peso específico e coesão) podem variar (BOSCOV, 2008). Além disso, segundo a autora, o tempo de deposição dos resíduos também pode influenciar, de modo que o lixo sofre decomposição ao longo dos anos, o que causa a alteração dos parâmetros e o recalque do aterro. Outro aspecto importante é a altura do lixiviado. Caso a drenagem do aterro não seja feita de maneira adequada e eficiente, o líquido produzido pelos resíduos pode atingir alturas que afetem a estabilidade e a segurança do maciço. (SANTANA, 2022).

Assim, o objetivo deste trabalho é realizar um mapeamento da literatura recente relacionada a estudos de caso de análises de estabilidade de aterros sanitários, além de identificar tendências nas publicações recentes e reconhecer lacunas e oportunidades de novas abordagens.

## 2 ESTABILIDADE DE TALUDES

Segundo Gerscovich (2012), a finalidade da análise de estabilidade é analisar a possibilidade de ocorrer um escorregamento de massa de solo presente em talude natural ou construído. Normalmente, as análises são realizadas por meio da comparação entre as tensões cisalhantes atuantes e a resistência ao cisalhamento, dando origem ao Fator de Segurança (FS). A NBR 11682 da ABNT (2009) define os valores mínimos de FS a serem considerados, a depender do nível de segurança escolhido, como mostra a Tabela 1.

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

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

No caso de aterros sanitários, a estabilidade é afetada pela degradação dos resíduos, que altera as propriedades geomecânicas dos materiais, influenciando no peso específico, ângulo de atrito e intercepto coesivo (BOSCOV, 2008). Além disso, a degradação também gera a formação de lixiviado, o que exige um sistema de drenagem eficiente para evitar seu acúmulo. Caso contrário, a estabilidade também pode ser afetada a depender da altura alcançada pelo percolado (SANTANA, 2022). Outro aspecto importante a ser considerado é a variabilidade dos resíduos encontrados nos aterros, que pode aumentar a probabilidade de ruptura e falhas devido à dificuldade de determinação dos parâmetros (DAMASCENO *et al.*, 2020).



### 3 EXEMPLOS DE ESTUDOS DE ESTABILIDADE EM ATERROS SANITÁRIOS

#### 3.1 Métodos para seleção das publicações

A seleção das publicações utilizadas para o mapeamento da literatura foi feita a partir da pesquisa das palavras chaves: “análise de estabilidade”, “aterro sanitário”, “resistência ao cisalhamento” e “resíduos sólidos”. Também foram utilizados os termos na língua inglesa “slope stability”, “solid waste landfill” e “shear strength”, com o objetivo de ampliar a busca. As bases de dados consultadas foram ScienceDirect, ResearchGate, além dos anais do Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG) e Congresso Brasileiro de Geotecnologia Ambiental (REGE). Foram considerados estudos de casos publicados entre os anos de 2019 e 2025.

#### 3.2 Influência no tempo de deposição dos resíduos na estabilidade

As propriedades geomecânicas dos resíduos influenciam diretamente na estabilidade dos taludes de aterros sanitários. Contudo, quantificá-las é uma tarefa difícil devido à heterogeneidade, complexidade de obtenção de amostras e alteração drásticas das propriedades ao longo do tempo (BOSCOV, 2008). Dessa maneira, é importante determinar a relação entre o tempo de deposição dos resíduos e os parâmetros de estabilidade, a fim de que haja um melhor entendimento sobre esse aspecto na elaboração e construção desses empreendimentos.

Pulat e Yukselen-Aksoy (2019) realizaram um estudo acerca dos parâmetros de resíduos representativos de regiões da Europa, Turquia e Estados Unidos e, por meio de ensaios de cisalhamento direto, determinaram a influência do tempo de deposição na resistência. A partir das análises, percebeu-se que as amostras mais envelhecidas apresentaram valores de ângulo de atrito maiores em comparação com amostras de deposição mais recente. Além disso, ao se comparar valores de coesão, quanto mais envelhecidas a amostras, menor a coesão encontrada nos ensaios.

Huang *et al.* (2023) também fizeram um estudo sobre as propriedades de resistência dos resíduos com diferentes idades em um aterro sanitário em Xian, na China. No estudo, foram retiradas várias amostras com variação de 1 a 23 anos de deposição, por meio de sondagens diretas. Essas amostras foram submetidas a ensaios para determinação dos parâmetros, de modo que concluiu-se que a coesão diminuiu com o aumento do tempo, variando de 18,69 kPa a 6,04 kPa. Além disso, foi observado um aumento no ângulo de atrito, com valores de 10,78° até 18,26°. Também concluiu-se que o aumento da idade geralmente aponta aumento da resistência ao cisalhamento, contribuindo para a estabilidade do aterro.

Outro estudo feito por Chen *et al.* (2024) analisou a influência do teor de plástico nas propriedades mecânicas dos resíduos. Como esse teor aumenta à medida que o material se degrada, os resultados podem ser relacionados com o tempo de disposição. Observou-se que com o aumento da porcentagem de plástico, a coesão e o ângulo de atrito interno tiveram um aumento inicial e posteriormente diminuíram. Isso vai de encontro com os resultados obtidos nos estudos anteriormente citados, que indicam uma diminuição da coesão e aumento do ângulo de atrito.

#### 3.3 Influência do lixiviado na estabilidade

Segundo Boscov (2008), chorume, percolado ou lixiviado refere-se ao efluente da massa de resíduos originado da percolação de água de precipitação e da decomposição dos resíduos. Dessa maneira, a depender do tipo de resíduo descartado, das condições climáticas, da impermeabilização e do sistema de drenagem, a altura de lixiviado presente no aterro pode atingir níveis que afetem a estabilidade, influenciando também na segurança (RIGHI, 2017).

Medeiros *et al.* (2023) realizaram uma análise hipotética da estabilidade de taludes de um aterro sanitário considerando a eficiência ou não do sistema de drenagem, e obteve os FS para cada caso considerado através do software SLOPE/W. Para o caso de drenagem efetiva, foi considerada uma altura de  $\frac{1}{3}$  de lixiviado, enquanto para um sistema de drenagem falho foi utilizado  $\frac{2}{3}$  de altura. Assim, os resultados obtidos foram de FS significativamente menor para a altura de  $\frac{2}{3}$ , chegando a até 29% de redução. Além disso, levando em consideração o sistema de drenagem obstruído, a cunha de ruptura movimenta uma maior quantidade de resíduos.



Santana *et al.* (2023) realizaram uma pesquisa acerca da influência da percolação de lixiviado na estabilidade de um aterro de resíduos industriais, por meio dos softwares SLOPE/W e SEEP/W. A autora concluiu que os fluxos mais intensos de percolado geram valores de FS reduzidos, tornando a construção mais instável.

Outro exemplo de análise de percolado é o estudo feito por Braz *et al.* (2020), em que os autores analisam a influência da infiltração em solo não saturado na estabilidade de talude, por meio dos softwares SLOPE/W e SEEP/W. Embora não cite especificamente aterros sanitários, o estudo concluiu que há uma grande redução no valor de FS com a inserção de nível freático no talude. Além disso, ao considerar chuvas e infiltrações, o FS sofreu quedas cada vez maiores com o aumento da intensidade das precipitações.

Jucá *et al.* (2021) identificaram fatores críticos que contribuem para a instabilidade do Aterro Sanitário Municipal de Resíduos Sólidos de Brasília, de maneira que a principal causa para os movimentos excessivos observados foram os altos níveis de lixiviado presentes. Dessa maneira, foi feita uma análise retroativa para avaliar o valor do FS nas condições em que se encontrava o aterro. Considerando um sistema de drenagem desobstruído, os valores de FS atingiram valores abaixo de 1,4, enquanto para um sistema entupido os valores alcançaram a faixa de 1,2, indicando uma ligação clara entre eficiência da drenagem e estabilidade.

### 3.4 Métodos estatísticos e probabilísticos na análise de estabilidade

A utilização de métodos estatísticos e probabilísticos na análise de estabilidade de taludes de aterros sanitários é uma alternativa cada vez mais explorada nos dias atuais. Devido à alta heterogeneidade dos resíduos e da difícil caracterização e controle do que é depositado nos aterros sanitários, esses métodos tornam-se uma solução para a determinação da estabilidade dos taludes.

Daciolo *et al.* (2020) utilizaram o comportamento estatístico dos parâmetros de resistência dos resíduos para avaliar a evolução dos fatores de segurança e a probabilidade de ruptura, com base no caso de falha de um aterro real. No estudo, foi concluído que as análises determinísticas ofereciam estabilidade ao aterro, com valores de FS acima de 1,5, porém com alta possibilidade de ruptura, o que evidencia a necessidade de utilização de métodos probabilísticos durante as fases de projeto e operação dos aterros.

Damasceno *et al.* (2020) também realizaram análises probabilísticas e determinísticas acerca de um aterro sanitário em Minas Gerais, analisando tanto o FS quanto a probabilidade de ruptura. Nos resultados das análises, observou-se um FS satisfatório para a estabilidade da estrutura, porém a probabilidade de ruptura indicou um grau de risco que deve ser levado em consideração. Dessa forma, concluiu-se que o limite para a probabilidade de ruptura deve ser determinado de acordo com o risco associado de cada projeto, de modo que cada caso deve ser analisado individualmente. Além disso, a análise determinística do FS não deve ser descartada, de maneira que ambos os métodos devem ser utilizados em conjunto para um entendimento mais assertivo da situação.

Chihi e Varga (2023) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar o impacto da inclinação de taludes na capacidade dos aterros sanitários e no fator de segurança, visando à construção de aterros maiores e com maior vida útil. Para isso, foi utilizado um novo método probabilístico de cálculo, que considera a heterogeneidade dos resíduos por meio do emprego de parâmetros de cisalhamento aleatórios, representando de forma mais próxima o real estado do aterro. Observou-se uma relação inversa do FS com a inclinação dos taludes, de modo que o aumento do ângulo de inclinação diminui a estabilidade. Porém, o novo método de cálculo possibilitou a utilização de inclinações maiores do que o método tradicional, evidenciando a importância dos avanços desse tipo de estudo na implementação e operação dos aterros.

## 4 CONCLUSÃO

Os estudos discutidos neste artigo demonstram que a análise de estabilidade de taludes em aterros sanitários é um tema complexo e em evolução, além de ser influenciada por diversos fatores. Quanto à influência do tempo de degradação nas propriedades geotécnicas dos resíduos, os trabalhos analisados apresentam convergência comportamento com relação aos valores de ângulo de atrito e coesão, influenciando na estabilidade.

Além disso, a presença e o acúmulo de lixiviado representam um fator crítico para a estabilidade, sendo associada à redução significativa do fator de segurança (FS), principalmente em casos de falhas ou ineficiência do sistema de drenagem. Essa condição pode intensificar os deslocamentos e aumentar o risco de ruptura dos taludes.



2025

Por fim, observou-se uma crescente adoção de métodos estatísticos e probabilísticos como ferramentas complementares às análises determinísticas tradicionais de estabilidade. Tais abordagens possibilitam uma representação mais realista da variabilidade dos resíduos e dos parâmetros geotécnicos, contribuindo para a tomada de decisões mais seguras no projeto e na operação dos aterros.

Para trabalhos futuros, sugere-se revisões de literatura mais profundas acerca do tema de estabilidade de aterros e do tempo de deposição dos resíduos, a fim de reforçar a convergência dos resultados apresentados neste trabalho ou de apresentar um contraponto. Além disso, sugere-se também, neste mesmo tema, o desenvolvimento de estudos levando em consideração variáveis como o estágio de decomposição, o tipo de resíduo e a composição do material, além das condições de operação dos aterros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Boscov, M. E. G. (2008) *Geotecnica 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.
- 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, 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 jun. 2025.
- Chihi, F., Varga, G. (2023) Landfill capacity enhancement from a slope inclination perspective and its implementation on the safety factor. In: 9th International Congress on Environmental Geotechnics – ICEG. *Anais...*
- Chen N, D., Chen, Y.-G.; Deng, Y.-F.; Ye, D.-C.; Ye, W.-M.; Wang, Q. (2024) *Mechanical properties of municipal solid waste under different stress paths: Effects of plastic content and particle gradation*. Waste Management, v. 185.
- 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. *Anais...* ABMS.
- Damasceno, L. G., Ferreira, P. H., Duarte, L. N., Souza, D. H. S., Oliveira, T. M. (2020) Aplicação de Métodos Estatísticos na Análise de Estabilidade em Taludes de Aterro Sanitário. 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.
- Huang, M., Zhang, Z., Zhu, B., Zhang, J., Xu, H. (2023). *Effects of moisture content and landfill age on the shear strength properties of municipal solid waste in Xi'an, China*. Environmental Science and Pollution Research International.
- Jucá, J. F. T., Noberto, A. S., Santos Júnior, J. I., Marinho, F. A. M. (2021) *Brasília municipal solid waste landfill: a case study on flow and slope stability*. Soils and Rocks, 44 (3).
- Medeiros, R. M., Norberto, A. S., Oliveira Júnior, A. I. de; Mariano, M. O. H. Jucá, J. F. T. (2023). *Análise hipotética da estabilidade de taludes de um aterro sanitário considerando os tempos de disposição dos resíduos*. In: Congresso Brasileiro de Geotecnica Ambiental – Regeo; Congresso Brasileiro de Geossintéticos – Geossintéticos, 2023, Salvador. *Anais...* ABMS.
- Pulat, H. F.; Yukselen-Aksoy, Y. (2019) *Compressibility and shear strength behaviour of fresh and aged municipal solid wastes*. Environmental Geotechnics, 9 (1), p. 55–63.
- Revista Limpeza Pública, São Paulo, n. 101, jul./set. 2019. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública – ABLP.



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 Geotecnologia Ambiental – REGEO. *Anais...* ABMS.

Santana, A. H. S. (2022) *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.