

Modelagem Geotécnica da Estabilidade de Taludes de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos: Análises de Equilíbrio Limite Bidimensional e Tridimensional

Geotechnical Modeling of Municipal Solid Waste Landfill Slope Stability: Two-Dimensional and Three-dimensional Limit Equilibrium Analyses

Ana Leticia Ramos Bezerra¹; Daniel Epifânio Bezerra²; Victor Emmanuel Avelino Gomes Bahia³; Gabriel Araújo Paes Freire⁴; Cláudio Luis de Araújo Neto⁵; Veruschka Escarião Dessoles Monteiro⁶; Márcio Camargo de Melo⁷

¹ Federal University of Pernambuco, Recife, PE, Brazil. E-mail: ana.ramosb@ufpe.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1064-2720>

² Federal University of Campina Grande, Campina Grande, PB, Brazil. E-mail: dbezerra29@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2788-872X>

³ Federal University of Campina Grande, Campina Grande, PB, Brazil. E-mail: victorbahia225@hotmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5406-3615>

⁴ Federal University of Campina Grande, Campina Grande, PB, Brazil. E-mail: paesfreire@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4678-9126>

⁵ Federal University of Maranhão, Balsas, MA, Brazil. E-mail: claudio.neto@ufma.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7281-0705>

⁶ Federal University of Campina Grande, Campina Grande, PB, Brazil. E-mail: veruschkamonteiro@hotmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7714-5692>

⁷ Federal University of Campina Grande, Campina Grande, PB, Brazil. E-mail: melomc90@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6215-8100>

Resumo: Este estudo realiza uma avaliação comparativa de análises de estabilidade de taludes em 2D e 3D para aplicações em aterros sanitários sob diferentes condições geométricas e hidrogeológicas. As avaliações de estabilidade foram realizadas utilizando os softwares Slide2 e Slide3, aplicando o método do equilíbrio limite com a formulação de Morgenstern-Price para determinar as superfícies de ruptura críticas e os respectivos fatores de segurança. Foram considerados dois cenários hidrogeológicos: (1) condição não saturada com pressão da água nos poros nula e (2) condição saturada com nível piezométrico de 17 metros. Os resultados indicam que a modelagem 3D aprimora a resolução espacial, permitindo a identificação precisa de zonas de instabilidade localizadas. No entanto, apesar das simplificações geométricas, a abordagem 2D permanece confiável. Essas descobertas sugerem que a decisão entre análises 2D e 3D deve levar em consideração fatores como a geometria do aterro, os recursos computacionais disponíveis e a precisão necessária para a avaliação de riscos.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos; Estabilidade de taludes em aterros sanitários; Método do equilíbrio limite; Análise tridimensional; Modelagem de Modelo Digital de Elevação (MDE).

Abstract: This study conducts a comparative evaluation of 2D and 3D slope stability analyses for landfill applications under varying geometric and hydrogeological conditions. Stability assessments were performed using Slide2 and Slide3 software, applying the limit equilibrium method with the Morgenstern-Price formulation to determine critical failure surfaces and corresponding factors of safety. two hydrogeological scenarios: (1) an unsaturated condition with zero pore-water pressure and (2) a saturated condition with a 17-meters piezometric level. Results indicate that 3D modeling enhances spatial resolution, enabling precise identification of localized instability zones. However, despite its geometric simplifications, the 2D approach remains reliable. These findings suggest that the decision between 2D and 3D analyses should account for factors such as landfill geometry, computational resources, and the required precision for risk assessment.

Keywords: Municipal solid waste; Landfill slope stability; Limit equilibrium method; Three-dimensional analysis; DEM modeling.

1. Introdução

A estabilidade de taludes é um aspecto fundamental no projeto e na operação de aterros sanitários, exigindo análises abrangentes para garantir a integridade estrutural e a funcionalidade em longo prazo. Diversos fatores influenciam o comportamento dos taludes em aterros, incluindo a composição e as propriedades mecânicas dos resíduos, a geometria do talude, as características do solo utilizado nas camadas de base e cobertura, as condições de pressão de poros e as cargas externas atuantes sobre o talude (Qi et al., 2021). Nesse contexto, uma avaliação abrangente da estabilidade é essencial para mitigar riscos como deslizamentos, erosão e contaminação (Bahia et al., 2025). Para a análise da estabilidade de aterros, é necessário avaliar a distribuição das tensões cisalhantes e outros parâmetros geotécnicos ao longo das superfícies potenciais de ruptura, a fim de determinar o Fator de Segurança (FS). Esse parâmetro constitui um indicador crítico da confiabilidade do talude e deve ser validado de acordo com as normas técnicas estabelecidas (Nasiri e Hajiazizi, 2020).

A análise da estabilidade de taludes em aterros emprega metodologias bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), havendo uma discussão recorrente na literatura sobre suas respectivas vantagens e limitações (Feng et al., 2018; Gitirana Jr. et al., 2019; Santos et al., 2025; Wu et al., 2024). Historicamente, as análises em 2D têm predominado na prática devido à representação simplificada da geometria do aterro em um plano, proporcionando maior eficiência computacional e familiaridade metodológica. Além disso, a limitada disponibilidade de dados geotécnicos tridimensionais e o maior custo computacional associado à modelagem em 3D frequentemente restringem sua aplicação na engenharia de aterros (Rao et al., 2024).

Na prática, as análises tridimensionais de estabilidade são utilizadas com menor frequência, sendo geralmente reservadas para situações que envolvem geometrias altamente irregulares ou mecanismos de ruptura complexos, nos quais as variações laterais e as irregularidades topográficas desempenham papel determinante. Embora a abordagem bidimensional seja, em geral, suficiente para a análise de seções transversais simétricas ao longo da direção longitudinal, condições assimétricas introduzem complexidades adicionais que exigem uma avaliação mais abrangente. Um modelo bidimensional pode não representar adequadamente o comportamento real do solo ou dos componentes estruturais, pois não considera as variações de geometria e das propriedades dos materiais em todas as direções espaciais (Chakraborty e Goswami, 2016; Leshchinsky e Baker, 1986).

A abordagem tridimensional permite uma caracterização mais precisa das irregularidades topográficas, das variações do terreno e da heterogeneidade das propriedades do solo, aumentando a confiabilidade das avaliações de estabilidade em comparação às análises convencionais em 2D (Rao et al., 2024). Ao proporcionar uma avaliação mais abrangente do comportamento dos taludes, os métodos 3D reduzem o conservadorismo excessivo dos fatores de segurança obtidos em análises bidimensionais, além de possibilitarem a identificação de superfícies críticas de ruptura que podem permanecer não detectadas em análises planares (Zhang et al., 2022).

As técnicas de análise tridimensional da estabilidade dependem de modelos topográficos capazes de representar com precisão as descontinuidades dos taludes, geralmente obtidos por meio de técnicas de fotogrametria digital (Singh et al., 2022). Nesse contexto, o rápido avanço das tecnologias de aquisição de imagens tem favorecido a utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) em levantamentos fotogramétricos, possibilitando a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) de alta precisão. Esses modelos permitem reconstruir a superfície tridimensional com elevada exatidão (Baiocchi et al., 2019), proporcionando uma avaliação mais precisa das potenciais superfícies de ruptura (Vemulapalli e Mesapam, 2021).

No contexto da engenharia de aterros sanitários, a ocorrência de rupturas de taludes ao longo da última década evidencia a necessidade de análises de estabilidade mais avançadas para essas estruturas (Datta e Sivakumar Babu, 2016; Li et al., 2019; Rao et al., 2024). As análises tridimensionais mostram-se particularmente relevantes por considerarem cenários complexos envolvendo variações significativas na geometria dos taludes e materiais de resíduos heterogêneos e/ou anisotrópicos (Chen et al., 2024; Shiau et al., 2023). Diante dessas condições, ampliar o escopo das avaliações de estabilidade é essencial para garantir uma análise mais precisa e confiável do comportamento dos taludes de aterros.

Stark e Eid (1998) destacam as vantagens das análises tridimensionais de estabilidade em projetos de taludes caracterizados por topografia complexa, variações na resistência ao cisalhamento ou diferentes condições de pressão de poros. Diversos estudos realizaram avaliações de estabilidade em aterros sanitários empregando predominantemente abordagens bidimensionais, consolidando uma tradição bem estabelecida na literatura técnica (Cirolini et al., 2020; Damasceno et al., 2020; Medeiros et al., 2020; Munwar Basha e Raviteja, 2018; Remédio, 2014; Silva, 2011; Strauss, 1998; Zhan et al., 2008). Entretanto, o número reduzido de pesquisas voltadas às análises tridimensionais de estabilidade em aterros sanitários evidencia uma importante lacuna científica quanto à influência dos efeitos tridimensionais no comportamento dos taludes.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo avaliar o comportamento de taludes de aterros sanitários por meio de análises bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), a fim de investigar a eficácia dessas abordagens na caracterização do comportamento geotécnico dos aterros sob diferentes condições. Ao integrar metodologias 2D e 3D, esta pesquisa busca ampliar o conhecimento científico sobre a influência dos efeitos tridimensionais na estabilidade de taludes em aterros sanitários.

2. Metodologia

2.1. Dados de entradas

A análise de estabilidade de aterros sanitários depende da utilização de dados geotécnicos confiáveis, incluindo as propriedades mecânicas das camadas de resíduos sólidos (resíduos em diferentes estágios de decomposição) e das camadas de solo, bem como os níveis piezométricos do lixiviado no interior da massa de resíduos. Neste estudo, os parâmetros geotécnicos (ângulo de atrito, coesão e peso específico) dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e dos solos adjacentes, assim como o nível piezométrico do lixiviado, foram obtidos de Araújo Neto (2021).

A avaliação da estabilidade considerou dois cenários hidrogeológicos com o objetivo de analisar a influência do nível de lixiviado no comportamento do aterro:

- Cenário 1 (Condição Não Saturada): ausência de superfície piezométrica no interior da massa de resíduos, representando a condição mais favorável à estabilidade.
- Cenário 2 (Condição Saturada): presença de uma superfície piezométrica a 17 m de profundidade, correspondente ao maior nível registrado durante o monitoramento e representando a condição mais crítica de estabilidade.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros geotécnicos dos RSU e dos solos utilizados nas análises para ambos os cenários.

Tabela 1 – Parâmetros geotécnicos de RSU e solos para os dois cenários analisados.

Material	Peso unitário (KN/m ³)	Coesão (kPa)		Ângulo de atrito (°)	
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2
Resíduos recentemente dispostos	10	1.4	5.2	28.3	21.6
Resíduos com um ano de disposição	15	41	52.7	35.6	27
Resíduos com dois anos de disposição	15	41.6	28.4	31.9	29.7
Camada de cobertura	14.5	7.8		31	
Camada de impermeabilização	18.8	1.7		26	
Subsolo	14.5	7.8		31	
Rocha	26	-		-	

Fonte: Adaptado de Araújo Neto (2021).

Os dados de nível piezométrico foram obtidos por meio do monitoramento contínuo de piezômetros instalados na célula do aterro, utilizando um sensor eletrônico. Para a análise de estabilidade, selecionou-se o nível registrado mais crítico (17 metros), o qual permaneceu abaixo do nível máximo observado de 30 metros no platô do aterro.

2.2. Seções críticas

As seções transversais críticas para as análises de estabilidade bidimensionais foram definidas com base na topografia do aterro, seguindo a direção da cota mais elevada para a mais baixa do corpo de resíduos. Essa abordagem foi adotada para garantir que as seções transversais selecionadas representassem as condições de estabilidade mais desfavoráveis. A Figura 1 apresenta a configuração geométrica e as seções transversais designadas utilizadas nas avaliações de estabilidade.

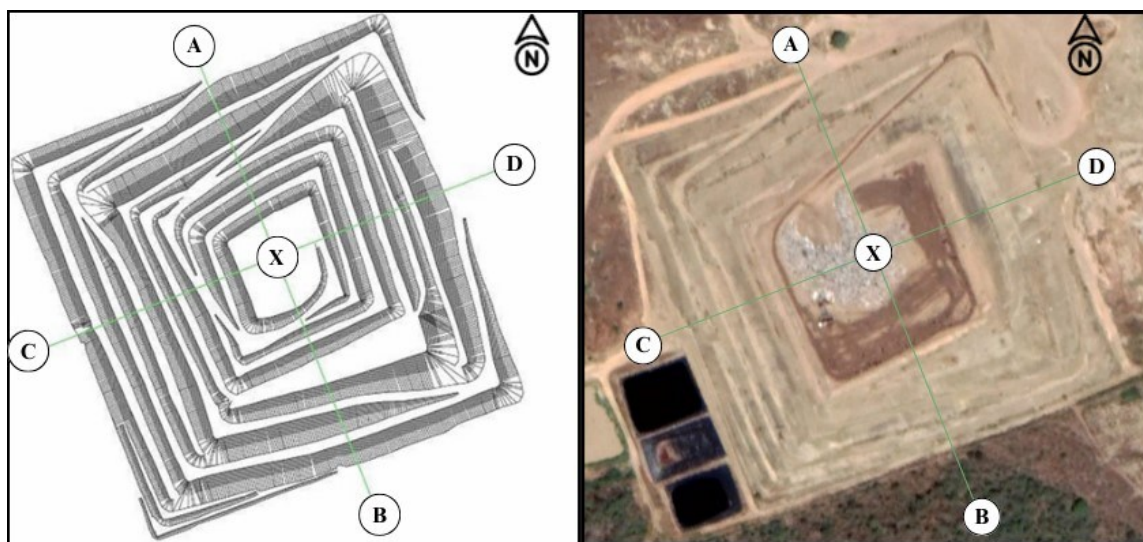


Figura 1 – Disposição das seções transversais críticas para a análise de estabilidade (vista aérea).

Fonte: Adaptado de Araújo Neto (2021).

2.3. Métodos de análise

O Método do Equilíbrio Limite (Limit Equilibrium Method – LEM) foi selecionado para a análise da estabilidade dos taludes do aterro sanitário. Essa abordagem é amplamente reconhecida como a técnica tradicional e predominante para a avaliação da estabilidade de taludes de solo (Qi et al., 2021). Diversos estudos aplicaram o LEM em análises de estabilidade de aterros sanitários, incluindo os de Seed et al. (1990), Zhan et al. (2008), Jahanfar et al. (2017), Munwar Basha e Raviteja (2018), Li et al. (2019), Damasceno et al. (2020) e Medeiros et al. (2020), reforçando sua confiabilidade e ampla utilização.

No âmbito dos métodos de equilíbrio limite, o método de Morgenstern-Price foi selecionado por sua capacidade de satisfazer todas as condições de equilíbrio estático e por sua ampla adoção na prática profissional. Esse método é reconhecido por sua robustez e caráter conservador (Moawwez et al., 2021), proporcionando avaliações confiáveis da estabilidade. Além disso, considera a interação entre as fatias, permitindo uma representação mais realista do comportamento da massa do aterro (Rahardjo e Fredlund, 1984).

Métodos avançados, como o de Morgenstern-Price, requerem um processo iterativo de tentativa e erro para alcançar o equilíbrio de momentos e forças em cada fatia, tornando os cálculos manuais impraticáveis (Abramson et al., 2001). Em consequência, diversos programas computacionais foram desenvolvidos para facilitar as análises de estabilidade de taludes. Esses softwares permitem modelar geometrias complexas, diferentes parâmetros de resistência ao cisalhamento, condições variáveis de pressão de poros e cenários de carregamento externo. Além disso, possibilitam a identificação automática da superfície crítica de ruptura associada ao menor fator de segurança (Duncan e Wright, 2005).

As análises de estabilidade foram realizadas utilizando os softwares Slide2 e Slide3, desenvolvidos pela Rocscience, ferramentas consolidadas na engenharia geotécnica e com confiabilidade comprovada em aplicações acadêmicas e profissionais (Jahanfar et al., 2017). O Slide2 utiliza métodos de equilíbrio limite para calcular o fator de segurança (FS) em superfícies de ruptura circulares e não circulares em taludes de solo ou rocha (Rocscience, 2025a). O Slide3 amplia essa capacidade para análises tridimensionais, empregando o método tridimensional das colunas (3D method of columns) para avaliar mecanismos de ruptura em três dimensões (Rocscience, 2025b).

Neste estudo, o Slide3 foi particularmente importante por superar as limitações computacionais associadas ao processamento de geometrias tridimensionais complexas, que frequentemente representam desafios para softwares convencionais de análise de estabilidade. Ambos os programas utilizaram a detecção automática de superfícies de ruptura para identificar as superfícies críticas de escorregamento com base nos parâmetros geotécnicos de entrada, sendo os cálculos do fator de segurança realizados por meio de métodos rigorosos de equilíbrio limite.

2.4. Desenvolvimento de um Modelo 3D de Estabilidade de Taludes

Foi desenvolvido um modelo geotécnico tridimensional do aterro sanitário utilizando um Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução como base topográfica principal, representando de forma detalhada a configuração das células do aterro ao longo do período de estudo. A aquisição dos dados foi realizada por meio de fotogrametria utilizando um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) DJI Phantom 2, permitindo a reconstrução tridimensional da superfície. Essa metodologia possibilitou uma modelagem e simulação numérica robustas, em consonância com a abordagem apresentada por Chand e Koner (2023). Os Modelos Digitais de Elevação constituem ferramentas fundamentais por fornecerem informações topográficas digitais essenciais para análises espaciais e avaliações geotécnicas. Esses modelos representam a superfície terrestre em três dimensões, permitindo a extração de parâmetros do terreno, como declividade e elevação (Gomes et al., 2022).

Para facilitar a integração do modelo tridimensional ao Slide3 e superar limitações computacionais, o MDE foi convertido para o formato de nuvem de pontos utilizando o software QGIS (versão 3.28.6). O processo de conversão consistiu inicialmente na vetorização do MDE em um arquivo raster, seguida da extração dos valores dos pixels para gerar um conjunto regular de pontos, a partir do qual foram obtidas as coordenadas planimétricas e as respectivas cotas do terreno.

Esse procedimento resultou em uma camada vetorial de pontos contendo atributos de elevação. Em seguida, o conjunto de dados geoespaciais foi importado para o ambiente computacional do Slide3, onde foi realizada a análise do comportamento dos taludes. O software executou a triangulação da superfície a partir da nuvem de pontos, reconstruindo uma representação contínua da geometria do aterro sanitário (Figura 2a). Essa superfície triangulada constituiu a base para todas as análises subsequentes de estabilidade (Figura 2b). Por fim, o modelo gerado foi validado por meio da verificação da consistência dos dados e da análise dos erros de interpolação. Esse procedimento incluiu a verificação da consistência dos dados, o cálculo dos erros de interpolação e a correção das inconsistências identificadas (Figura 2c).

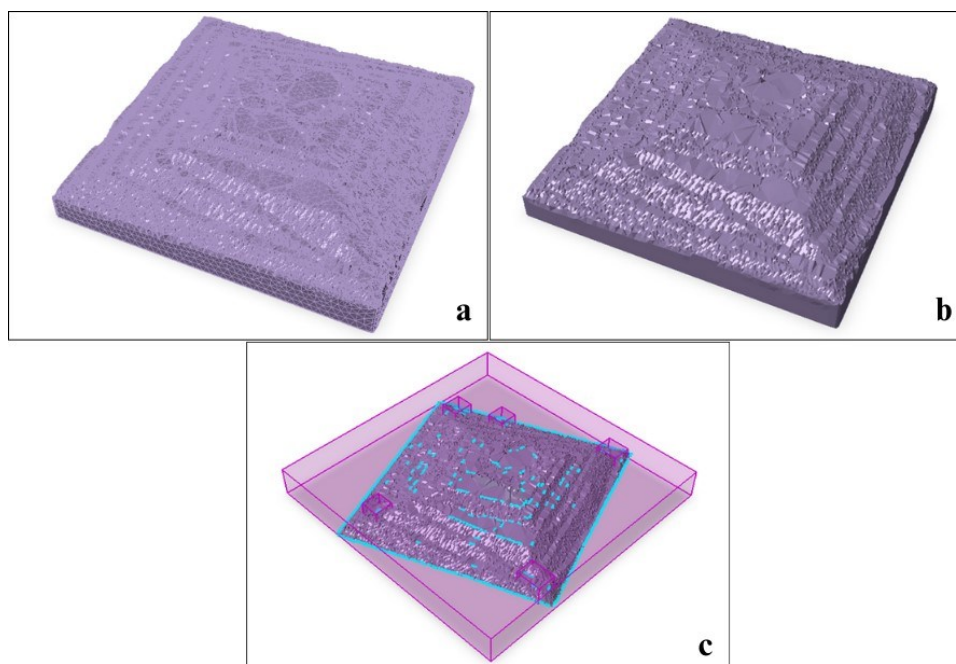


Figura 2 – Processo de geração do Modelo Digital de Elevação (MDE) no Slide3: a) malha gerada após a triangulação do conjunto de pontos; b) modelo de superfície após a triangulação; c) detecção de falhas para correção da superfície.

Fonte: Autores (2026).

Após a geração da grade de elevação e a correção de eventuais inconsistências geométricas, o Modelo Digital de Elevação (MDE) foi refinado por meio de etapas adicionais de processamento. Essas etapas incluíram operações de suavização da superfície, quando necessárias, com o objetivo de aprimorar a representação topográfica. O MDE final foi então documentado de forma sistemática, com especial atenção à definição das escalas de elevação para os diferentes

segmentos do terreno (Figura 3). Posteriormente, esse conjunto de dados processado foi preparado para aplicação nas análises subsequentes, incluindo as análises de estabilidade de taludes que constituem o foco deste estudo.

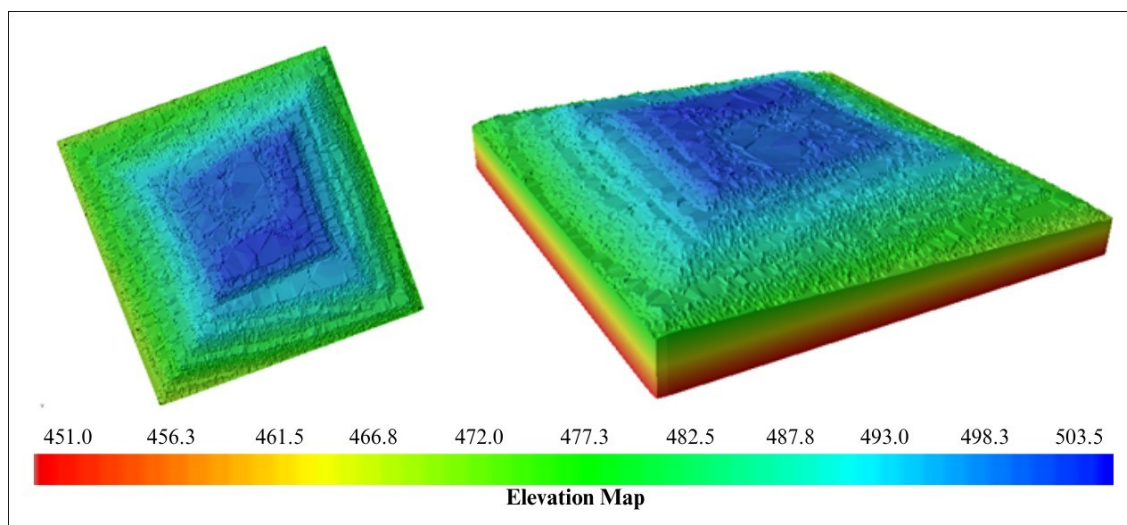


Figura 3 – MDE gerado utilizando o software Slide3.

Fonte: Autores (2026).

Para aumentar a precisão geométrica e geotécnica do modelo tridimensional do aterro sanitário, a representação 3D incorporou os componentes estratigráficos, incluindo as camadas de solo (camadas de impermeabilização e de cobertura), a massa de resíduos e a pressão de poros no interior do aterro. A estratigrafia da área de estudo foi modelada utilizando a ferramenta *Borehole Manager* do Slide3, que permite a simulação de sondagens para definir camadas representativas de materiais no modelo tridimensional. Esse procedimento possibilitou a delimitação das superfícies de contato correspondentes aos diferentes componentes do aterro.

Por meio dessa ferramenta, foram atribuídas às sondagens informações referentes à espessura das camadas representativas da célula do aterro no modelo tridimensional. A configuração das sondagens foi adaptada a partir das seções transversais bidimensionais, de modo a reproduzir fielmente a estratigrafia do aterro, incorporando as informações apresentadas por Araújo Neto (2021). Em seguida, o software executou um processo de interpolação para definir as interfaces entre as camadas, caracterizando adequadamente as propriedades geotécnicas dos resíduos e dos materiais de solo constituintes do aterro sanitário.

3. Resultados

3.1. Análise bidimensional de estabilidade de taludes

3.1.1. Análise bidimensional para o cenário 1

Para o Cenário 1, foram realizadas análises de estabilidade nas seções transversais A-X, B-X, C-X e D-X. A Figura 4 apresenta os resultados mais críticos do fator de segurança para cada seção, conforme determinado pelo software utilizado na análise.

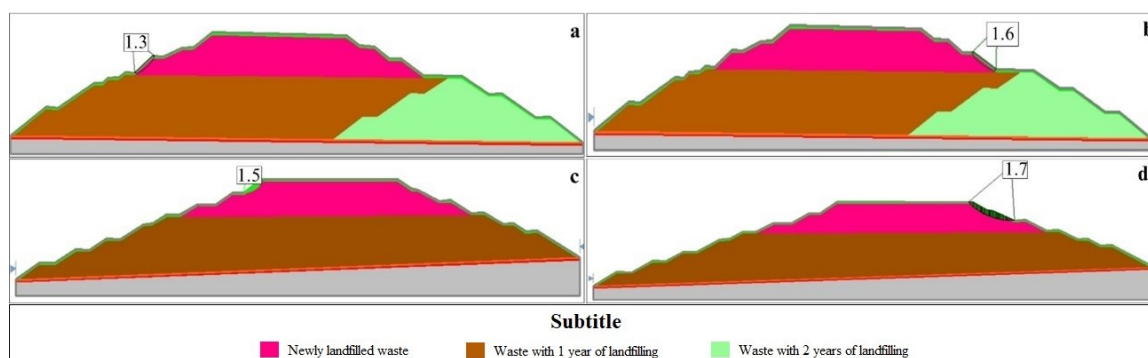


Figura 4 – Distribuição dos fatores de segurança nas seções transversais mais críticas do Cenário 1: (a) Seção transversal A-X (perfil AB); (b) Seção transversal B-X (perfil AB); (c) Seção transversal C-X (perfil CD); (d) Seção transversal D-X (perfil CD).

Fonte: Autores (2026).

As análises de estabilidade identificaram os menores fatores de segurança ao longo das superfícies críticas de ruptura localizadas nas regiões superiores da célula do aterro (Figuras 4a–4c). Essas condições de menor estabilidade estão diretamente relacionadas às zonas compostas por resíduos recentemente dispostos, nas quais o reduzido tempo de disposição resulta em menores características de resistência ao cisalhamento. O comportamento geotécnico dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) apresenta significativa variabilidade temporal, sendo que os resíduos recentemente depositados possuem propriedades mecânicas inferiores quando comparados aos resíduos com um ou dois anos de disposição. Essa diferença de resistência decorre dos distintos históricos de consolidação. Os resíduos aterrados há mais tempo (um a dois anos) são submetidos progressivamente ao carregamento das camadas sobrejacentes à medida que novos resíduos são dispostos, promovendo maior consolidação e, consequentemente, aumento da resistência. Em contrapartida, as camadas de RSU recentemente dispostas ainda não foram submetidas a pressões significativas de sobrecarga e permanecem nos estágios iniciais da biodegradação, apresentando menor densidade e reduzida resistência ao cisalhamento.

O peso específico dos RSU é diretamente influenciado pela pressão de sobrecarga, correspondente à carga exercida pelas camadas superiores de resíduos e solo. Nas camadas mais profundas dos aterros sanitários, o aumento dessa pressão promove maior densificação dos resíduos, especialmente após determinado estágio de estabilização decorrente da biodegradação (Townsend et al., 2015). Consequentemente, os RSU localizados em maiores profundidades tendem a apresentar maior densidade do que os resíduos recentemente compactados próximos à superfície. No Cenário 1, os perfis de resíduos caracterizados por maiores pesos específicos e localizados em camadas mais profundas apresentaram fatores de segurança mais elevados. Em contrapartida, os perfis com menores pesos específicos, geralmente associados aos resíduos recentemente dispostos, apresentaram menores valores de fator de segurança.

Corroborando esses resultados, Feng et al. (2017) investigaram as propriedades geotécnicas dos RSU e verificaram que a densidade dos resíduos aumentava, enquanto sua compressibilidade diminuía com a profundidade, com base em medições do peso específico realizadas em amostras coletadas na superfície e a 16 metros de profundidade. De forma semelhante, Awad-Allah (2022) avaliou a estabilidade de aterros sanitários utilizando parâmetros geotécnicos obtidos em ensaios de campo e concluiu que os valores do fator de segurança eram significativamente influenciados pela inclinação dos taludes laterais e pelos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Uma observação relevante no Cenário 1 é a ausência de desenvolvimento de pressão de poros na massa de resíduos, uma vez que não foi identificado acúmulo de líquidos ou gases. Nessas condições, a distribuição espacial das superfícies críticas de ruptura foi predominantemente controlada pela resistência ao cisalhamento e pelo peso específico das camadas de resíduos, o que está de acordo com a identificação das superfícies de ruptura nas camadas superiores do aterro. Além disso, as variações temporais do fator de segurança (FS) podem ser atribuídas a diversos fatores, como as condições climáticas, a profundidade de amostragem e o grau de degradação dos resíduos (Cox et al., 2015).

3.1.2. Análise bidimensional para o cenário 2

Para o Cenário 2, os resultados do fator de segurança para cada seção transversal analisada são apresentados na Figura 5.

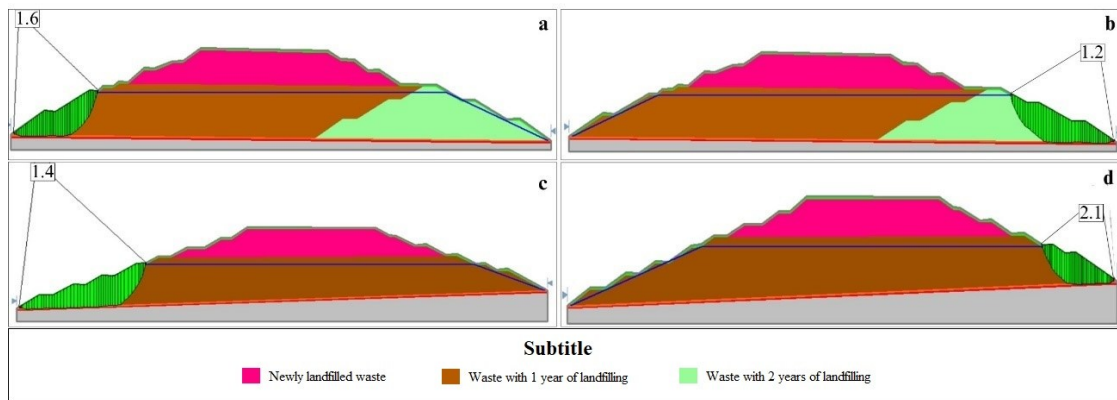


Figura 5 – Distribuição dos fatores de segurança nas seções transversais mais críticas do Cenário 2: a) Seção transversal A-X (perfil AB); b) Seção transversal B-X (perfil AB); c) Seção transversal C-X (perfil CD); d) Seção transversal D-X (perfil CD).

Fonte: Autores (2026).

A Figura 5 ilustra as seções críticas e as variações no FS entre elas, variando de 1,2 a 2,1. A análise do Cenário 2 revela que ao incorporar condições de excesso de poropressão no modelo computacional, o Slide2 localiza consistentemente as superfícies de falha mais críticas abaixo da linha piezométrica. O desempenho comparativo da estabilidade para ambos os cenários está resumido quantitativamente na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação do fator de segurança com base em análises de estabilidade bidimensionais para cada seção transversal.

Seção Transversal	Cenário 1 Fator de Segurança (FS)	Cenário 2 Fator de Segurança (FS)
A-X	1,3	1,6
B-X	1,6	1,2
C-X	1,5	1,4
D-X	1,7	2,1
Média do FS	1,5	1,6

Fonte: Autores (2026).

3.2.1. Análise tridimensional para o cenário 3D

A Figura 6 apresenta a distribuição dos fatores de segurança (FS) obtidos nas análises de estabilidade tridimensionais realizadas para o Cenário 1.

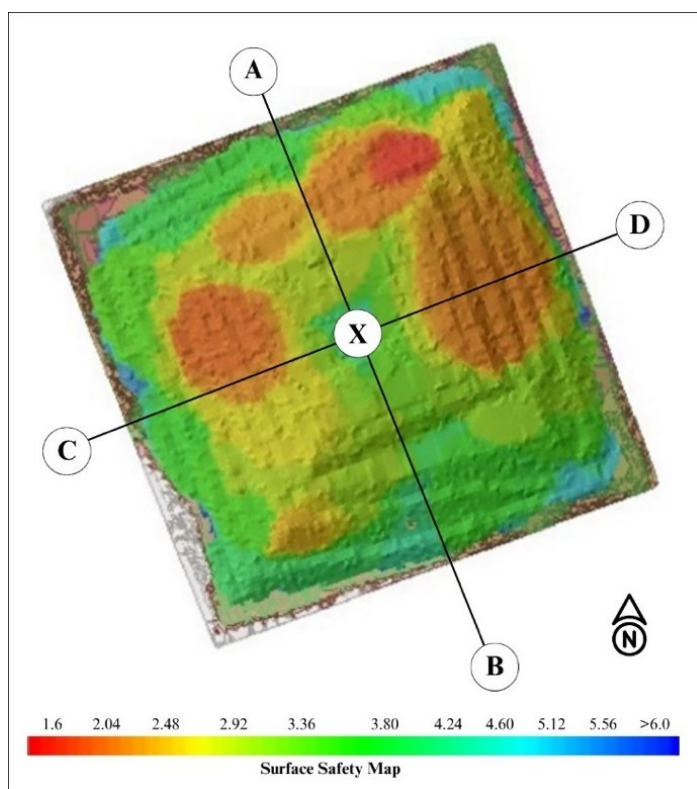


Figura 6 – Modelo de estabilidade tridimensional para o Cenário 1, ilustrando a distribuição do fator de segurança.
Fonte: Autores (2026).

Para o Cenário 1, o FS calculado de 1,6 atendeu ao requisito mínimo de estabilidade estabelecido pela NBR 11682 (ABNT, 2009). A análise tridimensional revelou que a superfície de ruptura crítica se estendia além dos limites identificados nas seções transversais bidimensionais (Figura 6). Essa divergência decorre da maior capacidade de representação da modelagem 3D, que incorpora a geometria topográfica completa e a variabilidade espacial ao longo de todos os eixos. A Figura 7 apresenta vistas em perspectiva da distribuição do fator de segurança, com ênfase especial na zona que apresenta condições críticas de estabilidade.

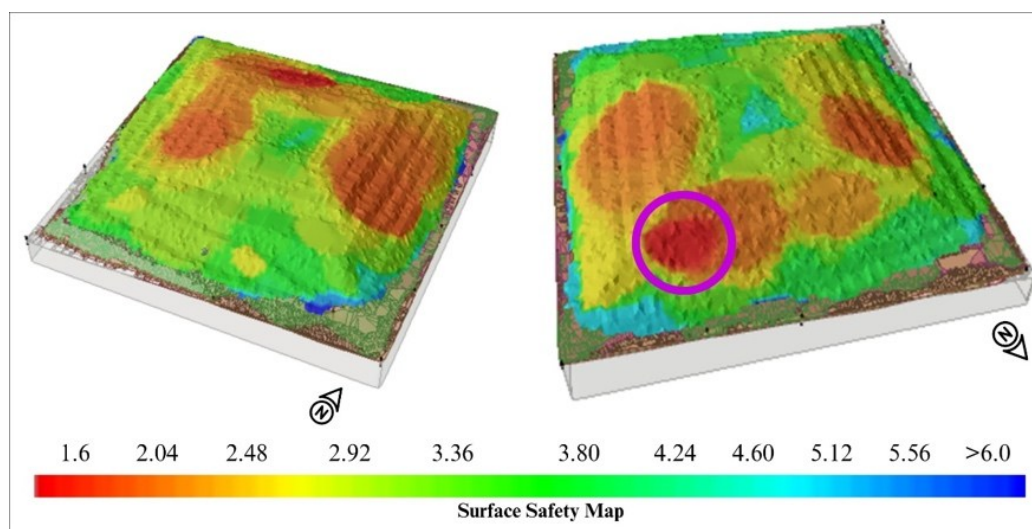


Figura 7 – Vista em perspectiva do fator de segurança espacializado na superfície 3D, destacando as localizações de FS mínimo no Cenário 1.

Fonte: Autores (2026).

Ao analisar as vistas em perspectiva do aterro (Figura 7), observa-se que o fator de segurança varia conforme a localização da seção transversal crítica; valores mais baixos (1,6–2,4) foram constatados em regiões elevadas, onde os resíduos depositados recentemente apresentam menor peso específico e menor resistência ao cisalhamento. Esses resultados estão em consonância com as análises bidimensionais do Cenário 1 (Figuras 4a–4d), que também apontaram os menores valores de FS nas camadas superiores do aterro.

No entanto, ao comparar as superfícies de ruptura críticas identificadas nas análises de estabilidade 2D e 3D do Cenário 1, ambas as versões do software Slide apresentam convergências em certas áreas e divergências em outras. Apesar dessas variações, as análises resultam em valores médios estatisticamente semelhantes, conforme demonstrado na Tabela 3. Os valores dos fatores de segurança para a análise 3D foram obtidos a partir da Figura 6, extraídos de perfis correspondentes àqueles analisados nas avaliações 2D. Esses valores, que representam superfícies de ruptura crítica idênticas em ambas as abordagens de modelagem, foram utilizados para o teste de hipóteses com um nível de significância de 0,05.

Tabela 3 – Teste *t* de Student para comparar o fator de segurança médio nas seções críticas do Cenário 1.

		t-value	p
Superfícies Críticas de Ruptura (AX–BX; CX–DX)	Student's <i>t</i> -test	-0.289	0.821

Nota: $H_0 \mu_{bidimensional} = \mu_{tridimensional}$

$H' \mu_{bidimensional} \neq \mu_{tridimensional}$

Fonte: Autores (2026).

A análise estatística da Tabela 3 não revela diferença estatisticamente significativa entre os fatores de segurança médios em 2D e 3D ($p > 0,05$), corroborando a hipótese nula de equivalência nas avaliações de estabilidade entre as abordagens de modelagem. Isso indica que não há diferença estatisticamente significativa entre os fatores de segurança médios obtidos por meio de análises bidimensionais e aqueles derivados das correspondentes avaliações de perfis tridimensionais. Embora as avaliações de estabilidade em 2D ofereçam uma compreensão detalhada de seções específicas, a análise em 3D proporciona uma avaliação mais abrangente de todo o sistema de talude, levando em conta interações tridimensionais no terreno, inclusive em áreas não contempladas nos modelos bidimensionais.

3.2.2. Análise tridimensional para o Cenário 2

A Figura 8 apresenta a distribuição espacial dos fatores de segurança derivados da análise de estabilidade 3D para o Cenário 2.

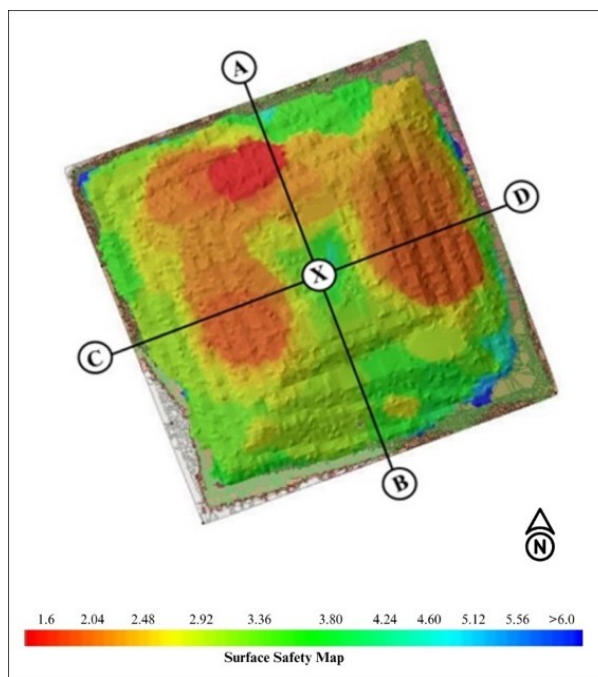


Figura 8 – Seções transversais AB e CD no modelo 3D para o Cenário 2, mostrando a distribuição espacial do fator de segurança.

Fonte: Autores (2026).

A Figura 8 ilustra a distribuição espacial dos fatores de segurança (FS) para o Cenário 2, revelando um valor mínimo de aproximadamente 1,6 em uma região adjacente à zona crítica identificada na análise tridimensional do Cenário 1. Uma avaliação comparativa dos resultados 2D e 3D para o Cenário 2 destaca uma divergência metodológica na seção transversal C–X, onde a superfície de ruptura crítica varia significativamente entre as abordagens dimensionais. Essa discrepância decorre da capacidade do modelo 3D de capturar características complexas do terreno não representadas na análise 2D. Em contrapartida, a seção transversal D–X apresenta forte concordância espacial entre ambos os métodos, com uma localização consistente da superfície de ruptura crítica.

Assim, a análise comparativa revela uma convergência parcial entre as superfícies de ruptura críticas obtidas pelas abordagens 2D e 3D nas condições do Cenário 2, apresentando tanto correspondência espacial em certos setores quanto divergência significativa em outros. A Figura 9 apresenta visualizações tridimensionais das distribuições dos fatores de segurança, com a zona de estabilidade mais crítica claramente destacada em roxo.

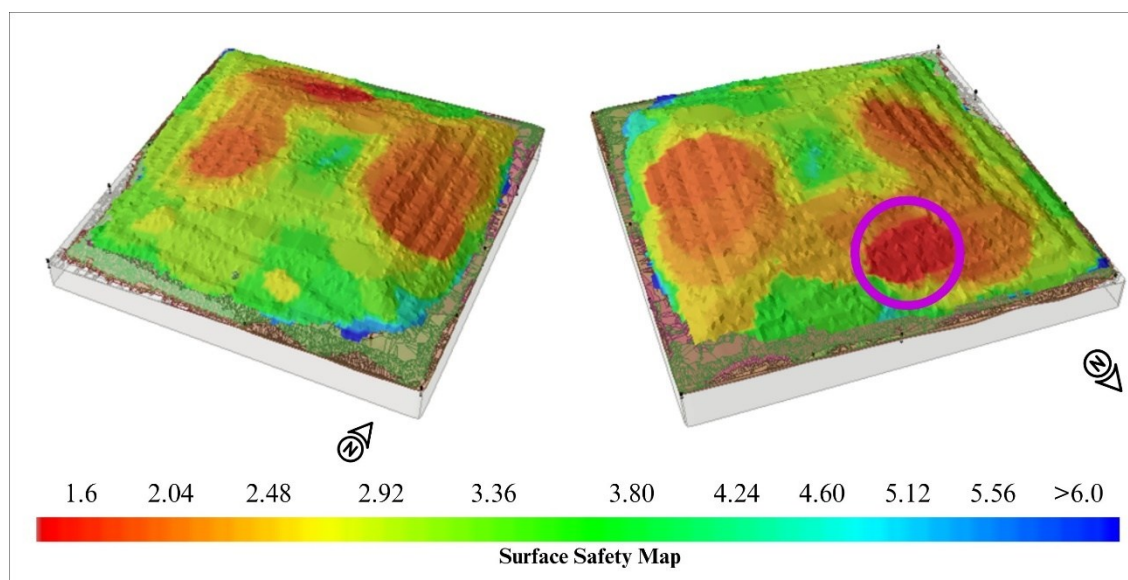


Figura 9 – Vista em perspectiva da espacialização do fator de segurança 3D, destacando o valor mais baixo – Cenário 2.

Fonte: Autores (2026).

A Figura 9 apresenta uma avaliação abrangente dos padrões de distribuição do FS e da região correspondente à superfície de ruptura mais crítica no interior da massa de resíduos, sob condições influenciadas pela pressão de poros. Para facilitar a comparação direta entre as análises bidimensional e tridimensional, os valores de FS foram extraídos de regiões idênticas em ambos os modelos. Em consonância com os resultados do Cenário 1, os valores médios de FS obtidos na simulação 3D do Cenário 2 mostraram-se muito próximos daqueles obtidos nas análises 2D, conforme apresentado na Tabela 4

Tabela 4 – Teste *t* de Student para comparação do fator de segurança médio nas seções críticas do Cenário 2.

		t-value	p
Superfícies de Ruptura Crítica (AX-BX; CX-DX)	Student's <i>t</i> -test	-1.396	0.212

Nota: $H_0 \mu_{bidimensional} = \mu_{tridimensional}$

$H' \mu_{bidimensional} \neq \mu_{tridimensional}$

Fonte: Autores (2026).

Conforme demonstrado pela análise estatística na Tabela 4, o valor-p supera o nível de significância de 0,05, corroborando assim a aceitação da hipótese nula. Esses resultados demonstram que não existe diferença estatisticamente significativa entre as médias dos fatores de segurança de superfícies de ruptura críticas obtidas a partir de análises bidimensionais e tridimensionais. Chang (2005) reanalisou a ruptura do aterro sanitário de Kettleman Hills (1988) e relatou que os fatores de segurança obtidos em análises 3D eram ligeiramente superiores aos derivados de condições de deformação plana. Tais variações observadas evidenciam a influência de diferentes premissas de modelagem e abordagens analíticas.

Mitchell et al. (1990) e Qi et al. (2021) realizaram avaliações de estabilidade de aterros sanitários utilizando análises bidimensionais e tridimensionais. Mitchell et al. (1990) relataram faixas de FS de 1,2–1,25 (2D) versus 1,08 (3D) para o caso de molhagem mínima, e de 1,1–1,15 (2D) versus 1,01 (3D) para cenários de molhagem total da base. Por outro lado, Qi et al. (2020) observaram padrões divergentes, com análises 2D resultando em valores de FS de 1,5 (coeficiente mínimo de pressão neutra) e 0,5 (coeficiente máximo de pressão neutra), em comparação com os resultados 3D correspondentes

de 1,7 e 0,5. Essas constatações da literatura corroboram as evidências estatísticas apresentadas neste estudo (Tabelas 3 e 4), demonstrando médias de fatores de segurança comparáveis entre as abordagens 2D e 3D.

Nesse contexto, a modelagem tridimensional oferece vantagens distintas para a avaliação da estabilidade ao incorporar a complexidade topográfica completa do corpo de resíduos, permitindo assim uma identificação mais precisa de zonas com elevado potencial de instabilidade. No entanto, embora as análises 3D proporcionem uma resolução espacial superior para a detecção de áreas críticas, os métodos bidimensionais permanecem estatisticamente confiáveis para a estimativa do fator de segurança, apesar de suas simplificações geométricas inerentes.

4. Conclusões

A aplicação de métodos de equilíbrio-limite em análises de estabilidade de taludes aumenta significativamente a precisão e a confiabilidade da avaliação de estabilidade. Quando integrados a Modelos Digitais de Elevação (MDEs) obtidos por meio de fotogrametria com VANTs, esses métodos permitem a reconstrução tridimensional da superfície, representando a geometria real do aterro sanitário. Essa abordagem combinada fornece uma estrutura analítica completa para uma avaliação abrangente da estabilidade dos taludes.

Este estudo comparou análises bidimensionais e tridimensionais de estabilidade de taludes em um aterro sanitário sob duas condições de pressão de poros, considerando a presença e a ausência de saturação por chorume. As análises em 3D apresentaram, consistentemente, fatores de segurança mais elevados do que as avaliações em 2D. Essa diferença sistemática é atribuída à capacidade do método tridimensional de oferecer uma perspectiva mais abrangente e detalhada, permitindo considerar a variabilidade espacial e as heterogeneidades do material, bem como identificar complexidades geométricas na topografia do aterro.

No entanto, a escolha entre as abordagens 2D e 3D deve ser cuidadosamente ponderada, pois depende de múltiplos fatores, como a complexidade do projeto, os recursos disponíveis, a precisão exigida e as características específicas do aterro em análise.

Embora a análise bidimensional ofereça uma ferramenta inicial eficiente para identificar potenciais zonas críticas, a análise tridimensional proporciona uma avaliação mais precisa das condições de estabilidade ao incorporar variações espaciais e heterogeneidades do material no corpo de resíduos. Consequentemente, a integração de ambos os métodos pode aumentar significativamente a precisão e a confiabilidade das avaliações de estabilidade de taludes na engenharia de aterros sanitários.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Grupo de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande e à ECOSOLO – Gestão Ambiental de Resíduos Ltda. pela infraestrutura, pelo apoio e pelos recursos.

Referências

- ABNT NBR 11682, 2009. Estabilidade de encostas. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S., Boyce, G.M., 2001. Slope Stability and Stabilization Methods, 2ª Edição. ed. Wiley, New Jersey.
- Araújo Neto, C.L. de, 2021. Modelagem da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos para análises da estabilidade de taludes de aterros sanitários. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Awad-Allah, M.F., 2022. Field and numerical studies to evaluate slope stability in municipal solid waste sites. *Innov. Infrastruct. Solut.* 7, 150. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00736-1>
- Bahia, V.E.A.G., Neto, C.L.A., Silva, T.F., Boscov, M.E.G., Monteiro, V.E.D., Melo, M.C., 2025. Influence of municipal solid waste composition on the shear strength of a landfill cell. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 22, 8853–8868. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06191-6>

- Baiocchi, V., Napoleoni, Quintilio, Tesei, Martina, Servodio, Giampaolo, Alicandro, Maria, and Costantino, D., 2019. UAV for monitoring the settlement of a landfill. *Eur. J. Remote Sens.* 52, 41–52. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1683471>
- Chakraborty, A., Goswami, D., 2016. State of the art: Three Dimensional (3D) Slope-Stability Analysis. *Int. J. Geotech. Eng.* 10, 493–498. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1172807>
- Chand, K., Koner, R., 2023. Internal Mine Dump Slope Stability and Failure Zone Identification using 3D Modelling. *J. Min. Environ.* 14, 1105–1119. <https://doi.org/10.22044/jme.2023.13013.2360>
- Chang, M., 2005. Three-dimensional stability analysis of the Kettleman Hills landfill slope failure based on observed sliding-block mechanism. *Comput. Geotech.* 32, 587–599. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2005.11.002>
- Chen, C., Lv, H., Cheng, Z., Gao, X., Cui, X., Yue, X., 2024. Quasi-3D slope stability analysis of waste dump based on double wedge failure. *Sci. Rep.* 14, 6887. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56637-7>
- Cirolini, A., Bruch, A.F., Marquezan, R.G., Silva, F.M.M. da, Carneiro, M., 2020. Análise da Estabilidade de Taludes do Aterro Sanitário de Rosário do Sul/RS. *Periód. Eletrônico Fórum Ambient. Alta Paul.* 16. <https://doi.org/10.17271/1980082716520202645>
- Cox, J.T., Yesiller, N., Hanson, J.L., 2015. Implications of variable waste placement conditions for MSW landfills. *Waste Manag.* 46, 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.031>
- Damasceno, L.G., Ferreira, P.H., Duarte, L.N., Sousa, D.H.S., Oliveira, T., 2020. APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM TALUDES DE ATERRO SANITÁRIO. *Congr. Bras. Mec. Solos E Eng. Geotécnica* 6058–6065. <https://doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0763>
- Datta, S., Sivakumar Babu, G.L., 2016. Prediction of the Slope Stability of Municipal Solid Waste Landfills Using the Reliability Analysis 668–677. <https://doi.org/10.1061/9780784480144.066>
- Duncan, J.M., Wright, S.G., 2005. *Soil Strength and Slope Stability*, 1st edition. ed. Wiley, Hoboken, N.J.
- Feng, S.-J., Chen, Z.-W., Chen, H.-X., Zheng, Q.-T., Liu, R., 2018. Slope stability of landfills considering leachate recirculation using vertical wells. *Eng. Geol.* 241, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.05.013>
- Gitirana Jr, G. de F.N., Souza, J.P.T., Moura, N.R., 2019. ANÁLISE 2D E 3D DA ESTABILIDADE DA BARRAGEM DE FUNDÃO. *REEC - Rev. Eletrônica Eng. Civ.* 15, 123–136. <https://doi.org/10.5216/reec.v16i1.53450>
- Gomes, F.C.M., Zaidan, R.T., Rocha, C.H.B., 2022. Análise comparativa entre a aplicação de métodos de interpolação, para a geração de modelos digitais de elevação. *Rev. Bras. Geogr. Física* 15, 2448–2462. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2448-2462>
- Jahanfar, A., Gharabaghi, B., McBean, E.A., Dubey, B.K., 2017. Municipal Solid Waste Slope Stability Modeling: A Probabilistic Approach. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001704](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001704)
- Leshchinsky, D., Baker, R., 1986. Three-Dimensional Slope Stability: End Effects. *Soils Found.* 26, 98–110. https://doi.org/10.3208/sandf1972.26.4_98
- Li, C., Fu, Z., Wang, Y., Tang, H., Yan, J., Gong, W., Yao, W., Criss, R.E., 2019. Susceptibility of reservoir-induced landslides and strategies for increasing the slope stability in the Three Gorges Reservoir Area: Zigui Basin as an example. *Eng. Geol.* 261, 105279. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105279>
- Medeiros, R. de M., Norberto, A. de S., Mariano, M.O.H., 2020. AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE ATERROS SANITÁRIOS. *Rev. AIDIS Ing. Cienc. Ambient. Investig. Desarro. Prática* 749–761. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.3.68247>
- Mitchell, J.K., Seed, R.B., Seed, H.B., 1990. Kettleman Hills Waste Landfill Slope Failure. I: Liner-System Properties. *J. Geotech. Eng.* 116, 647–668. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:4\(647\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:4(647))

- Moawwez, M.A., Wang, J.-P., Hussain, M.A., 2021. Development of empirical correlations for limit equilibrium methods of slope stability analysis. Arab. J. Geosci. 14, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08375-7>
- Munwar Basha, B., Raviteja, K.V.N.S., 2018. Meethotamulla Landfill Failure Analysis: A Probabilistic Approach, in: Krishna, A.M., Dey, A., Sreedeeep, S. (Eds.), Geotechnics for Natural and Engineered Sustainable Technologies: GeoNEst. Springer, Singapore, pp. 341–351. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7721-0_20
- Nasiri, M., Hajiazizi, M., 2020. The Effects of Strength Parameters on Slope Safety Factor in 2D & 3D Analyses using Numerical Methods. Int. J. Min. Geo-Eng. 54, 71–75. <https://doi.org/10.22059/ijmge.2019.257379.594740>
- Qi, S., Ling, D., Yao, Q., Lu, G., Yang, X., Zhou, J., 2021. Evaluating slope stability with 3D limit equilibrium technique and its application to landfill in China. Eng. Geol. 280, 105939. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105939>
- Rahardjo, H., Fredlund, D.G., 1984. General limit equilibrium method for lateral earth force. Can. Geotech. J. 21, 166–175. <https://doi.org/10.1139/t84-013>
- Rao, B., Burman, A., Roy, L.B., Kumar, S., Kumar, A., Choudhary, S.S., 2024. Comparative analysis of 2D and 3D slope stability problems using limit equilibrium technique-based Bishop’s simplified method. Multiscale Multidiscip. Model. Exp. Des. 7, 1169–1184. <https://doi.org/10.1007/s41939-023-00278-2>
- Remédio, F.H., 2014. Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com Nspt. Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo.
- Rocscience, 2025a. Slide2: Documentation and Theory Overview [WWW Document]. URL <https://www.rocscience.com/help/slide2/overview> (accessed 3.18.25).
- Rocscience, 2025b. Slide3: Documentation and Theory Overview [WWW Document]. URL <https://www.rocscience.com/help/slide3/overview> (accessed 3.18.25).
- Santos, A.F. dos, Porto, T.B., Bretas, T.C., 2025. Análise numérica bidimensional e tridimensional de estabilidade de talude de grande altura em mina a céu aberto: Two-dimensional and three-dimensional numerical analysis of high slope stability in open pit mine. Rev. Geociências Nordeste 11, 314–332. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID32377>
- Seed, R.B., Mitchell, J.K., Seed, H.B., 1990. Kettleman Hills Waste Landfill Slope Failure. II: Stability Analyses. J. Geotech. Eng. 116, 669–690. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:4\(669\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:4(669))
- Shiau, J., Lai, V.Q., Keawsawasvong, S., 2023. Multivariate adaptive regression splines analysis for 3D slope stability in anisotropic and heterogenous clay. J. Rock Mech. Geotech. Eng. 15, 1052–1064. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.05.016>
- Silva, J.P.M. da, 2011. Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto.
- Singh, J., Pradhan, S.P., Singh, M., Hruaikima, L., 2022. Control of structural damage on the rock mass characteristics and its influence on the rock slope stability along National Highway-07, Garhwal Himalaya, India: an ensemble of discrete fracture network (DFN) and distinct element method (DEM). Bull. Eng. Geol. Environ. 81, 96. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02575-5>
- Stark, T.D., Eid, H.T., 1998. Performance of Three-Dimensional Slope Stability Methods in Practice. J. Geotech. Geoenvironmental Eng. 124, 1049–1060. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:11\(1049\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:11(1049))
- Strauss, M., 1998. Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro.
- Townsend, T.G., Powell, J., Jain, P., Xu, Q., Tolaymat, T., Reinhart, D., 2015. Sustainable Practices for Landfill Design and Operation. Springer, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2662-6>

-
- Vemulapalli, S.C., Mesapam, S., 2021. Slope Stability Analysis for Mine Hazard Assessment Using UAV. J. Indian Soc. Remote Sens. 49, 1483–1491. <https://doi.org/10.1007/s12524-020-01239-9>
- Wu, C., Wang, Z.Z., Goh, S.H., Zhang, W., 2024. Comparing 2D and 3D slope stability in spatially variable soils using random finite-element method. Comput. Geotech. 170, 106324. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106324>
- Zhan, T.L.T., Chen, Y.M., Ling, W.A., 2008. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. Eng. Geol. 97, 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.11.006>
- Zhang, W., Li, H., Han, L., Chen, L., Wang, L., 2022. Slope stability prediction using ensemble learning techniques: A case study in Yunyang County, Chongqing, China. J. Rock Mech. Geotech. Eng. 14, 1089–1099. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.12.011>