

Avaliação da estabilidade de taludes de aterro sanitário: uma análise bidimensional e de sensibilidade do fator de segurança

Assessment of the stability of landfill slopes: a two-dimensional analysis and sensitivity of the safety factor

Ana Letícia Ramos Bezerra¹; Daniel Epifânio Bezerra²; Victor Emmanuel Avelino Gomes Bahia³; Raliny Mota de Souza Farias⁴; Claudio Luis de Araújo Neto⁵; Veruschka Escarião Dessoles Monteiro⁶; Marcio Camargo de Melo⁷

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, Brasil. Email: ana.ramosb@ufpe.com.br

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

² Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, Brasil. Email: dbezerra29@gmail.com

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

³ Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, Brasil. Email: victorbahia225@hotmail.com

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

⁴ Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina/PE, Brasil. Email: raliny.mota@univasf.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8081-1994>

⁵ Universidade Federal do Maranhão, Balsas/MA, Brasil. Email: claudio.neto@ufma.br

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

⁶ Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, Brasil. Email: veruschkamonteiro@hotmail.com

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

⁷ Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande/PB, Brasil. Email: melome90@gmail.com

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

Resumo: Devido à crescente demanda pela disposição de resíduos sólidos urbanos e às barreiras encontradas para a instalação de novos aterros sanitários, o alteamento dessas estruturas tem sido uma estratégia adotada para ampliar a capacidade de disposição de resíduos. Por outro lado, os riscos associados a essa prática, como os deslizamentos, podem causar grandes impactos ambientais e sociais. Diante disso, a proposta deste estudo consiste em analisar a estabilidade de taludes em um aterro sanitário localizado no semiárido brasileiro. A metodologia envolveu análises de estabilidade bidimensionais e análises de sensibilidade do fator de segurança a variações dos parâmetros geotécnicos. Foram simulados dois cenários: um com o aterro em estado não saturado e outro em condições de saturação. As análises foram realizadas nos *softwares* *slope/W* e no *slide/2*. Os resultados indicam que a estabilidade dos taludes está intimamente relacionada às propriedades geotécnicas dos RSU e à presença do nível piezométrico de líquidos no maciço. Suponha-se que as simulações numéricas podem apresentar pequenas discrepâncias quando realizadas em dois *softwares* diferentes e que a precisão das potenciais superfícies de ruptura crítica está condicionada à qualidade e representatividade dos dados de entrada.

Palavras-chave: Fator de segurança; Parâmetros geotécnicos; Análise determinística; Análise de estabilidade.

Abstract: Due to the increasing demand for the disposal of municipal solid waste and the barriers encountered in establishing new landfills, the elevation of these structures has been adopted as a strategy to expand waste disposal capacity. On the other hand, the risks associated with this practice, such as landslides, can cause significant environmental and social impacts. Therefore, the purpose of this study is to analyze the stability of slopes in a landfill located in the Brazilian semi-arid region. The methodology involved two-dimensional stability analyses and sensitivity analyses of the safety factor to variations in geotechnical parameters. Two scenarios were simulated: one with the landfill in an unsaturated state and another under saturated conditions. The analyses were conducted using the *Slope/W* and *Slide/2* software. The results indicate that slope stability is closely related to the geotechnical properties of the MSW and the presence of the piezometric level of liquids in the mass. It was concluded that numerical simulations may present discrepancies when conducted in two different software programs, and that the accuracy of potential critical failure surfaces depends on the quality and representativeness of the input data.

Keywords: Safety factor; Deterministic analysis; Geotechnical parameters; Stability analysis.

1. Introdução

Com a produção crescente de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e as restrições ambientais à implantação de novos aterros, tornou-se comum a utilização de estratégias para aumentar a capacidade dos aterros sanitários existentes, a exemplo do alteamento e expansão da área dessas estruturas (Ghasemian, Karimpour-Fard e Nadi, 2024). Essa abordagem visa otimizar a utilização do espaço disponível, minimizar os custos relacionados à criação de novos aterros e prevenir a utilização de novas áreas (Lü *et al.*, 2019).

No entanto, o alteamento dessas estruturas causa preocupações, diante de um contexto marcado pelos diversos incidentes em aterros sanitários, nas últimas décadas, em que o deslizamento de RSU evoluiu para desastres de elevada magnitude, causando expressivos danos à população e ao meio ambiente (Li, Chen e Lin, 2023). Nessa perspectiva, a estabilidade de taludes é uma das principais preocupações da engenharia ao longo da operação dos aterros sanitários (GAO *et al.*, 2018), sendo um desafio crítico ao longo de toda a vida útil desses empreendimentos. Desse modo, realizar avaliações da estabilidade de taludes de aterros torna-se crucial diante das questões ambientais decorrentes dos potenciais desastres associados a essas estruturas.

Estudos como os de Strauss (1998), Zhan, Chen e Ling (2008), Basha e Raviteja (2018), Remédio (2014), Silva (2011), Jahanfar *et al.*, (2017), Lu *et al.*, (2019), Cirolini *et al.*, (2020), Medeiros, Norberto e Mariano (2020) e Damasceno *et al.*, (2020) realizaram análises de estabilidade para diversos aterros, utilizando, predominantemente, abordagens bidimensionais, o que reflete uma tradição consolidada na literatura técnica. Em seus estudos acerca da estabilidade de taludes de aterros sanitários, Daciolo (2020) e Jahanfar *et al.*, (2017) abordaram agentes responsáveis por causar variações no fator de segurança, como o alteamento da Célula do aterro sanitário, parâmetros de resistência ao cisalhamento e de poropressão, destacando a relevância de compreender como esses aspectos afetam o fator de segurança das seções críticas do aterro. Fatores estes que os projetistas e as empresas responsáveis pela operação dos aterros devem considerar durante as etapas de concepção, funcionamento e encerramento dessas obras geotécnicas, atentando-se às peculiaridades e finalidades, a exemplo das características e composições dos resíduos dispostos ao longo da operação.

Portanto, pode-se realizar análises paramétricas de sensibilidade, que buscam identificar e avaliar de forma sistemática os fatores que influenciam a estabilidade de um talude. Essas análises podem ser realizadas mediante a alteração individual de parâmetros dos resíduos (como coesão, ângulo de atrito interno e peso específico), do nível de poropressão e da carga aplicada no talude, relacionando-os com o fator de segurança. Sendo assim, é possível avaliar o efeito das propriedades geotécnicas dos materiais que compõem o maciço sanitário na estabilidade da estrutura.

Considerando os riscos significativos associados às falhas em aterros sanitários, este trabalho visa realizar análises de estabilidade de taludes em um aterro sanitário localizado no semiárido brasileiro, focando na sensibilidade do fator de segurança frente a variações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento e comparando o desempenho de dois softwares de análise bidimensional. Considerando a sensibilidade do fator de segurança das seções críticas bidimensionais frente a variações dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, bem como verificar o desempenho de dois softwares em análises de estabilidade bidimensionais.

2. Metodologia

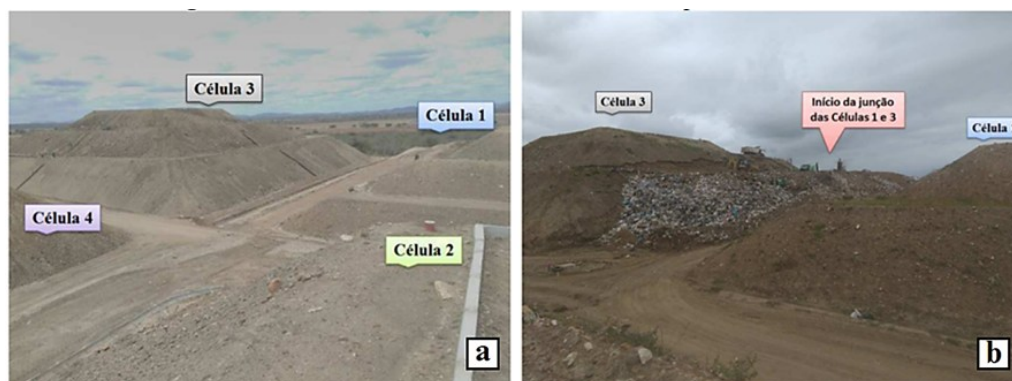
2.1 Caracterização da área de estudo

O Aterro Sanitário objeto deste estudo está apresentado na Figura 1. Conforme os dados da AESA (2022), a região apresenta um clima semiárido, com uma temperatura média anual máxima de 28,6 °C e mínima de 19,5 °C, resultando em uma média de 22,7°C. A evaporação anual é estimada em 1417,4 mm, enquanto a precipitação média anual atinge 802,7 mm.



*Figura 1 – Aterro Sanitário objeto de estudo.
Fonte: Adaptado do Google Earth Pro (2020).*

Do início da operação até o período abordado nesse estudo, o Aterro Sanitário passou por um processo de integração de quatro células, denominadas C1, C2, C3 e C4. Isso ocorreu ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 2. Inicialmente, cada célula estava separada (Figura 2a), posteriormente foram unidas por meio da disposição estratégica de resíduos e solo entre elas (Figura 2b), formando um único maciço de resíduos, permitindo a integração gradual das células do aterro sanitário.



*Figura 2 – Células do aterro sanitário (a) antes do início do processo de união (b) após início do processo de união.
Fonte: Guedes (2018).*

A finalização da união das Células C1, C2, C3 e C4 resultou na formação de uma única Célula com dimensões de 225 x 225 metros, como ilustrado na Figura 3. Esta Célula integrada é caracterizada pela presença de camadas de resíduos provenientes das Células individuais com diferentes idades de aterramento.



Figura 3 – Célula do aterro após junção das C1, C2, C3 e C4.

Fonte: Souza (2021).

Neste período o Aterro apresentou variação nas espessuras das camadas de cobertura de 0,6 a 1,0 m de solo compactado (Araújo Neto, 2016; Souza, 2021). Por esse motivo, foi adotada uma espessura média de 0,8 m para essa camada, já para a camada de base, 0,6 m (Silva, 2017). Por meio de investigação do subsolo utilizando sondagem à percussão (SPT) foram observadas profundidades entre 0,4 e 0,8 m de solo, para as análises de estabilidade considerou-se uma espessura média de 0,6 m. O maciço sanitário era constituído por camadas de resíduos com distintos tempos de aterramento: 0 ano (recém aterrados), 1 ano e 2 anos. A determinação das espessuras dessas camadas foi baseada no acompanhamento da operação do Aterro Sanitário, combinado com levantamentos topográficos. Essa abordagem garante a representatividade dos modelos gerados.

2.2 Dados de entrada para análise de estabilidade em ferramentas computacionais

Os dados de entrada necessários aos estudos de estabilidade são os parâmetros geotécnicos e o nível piezométrico de líquidos presente no interior do maciço. Nesse estudo, os parâmetros geotécnicos (ângulo de atrito, coesão e peso específico) dos RSU e dos solos, além do nível piezométrico de líquidos foram obtidos por estudos realizados por Araújo Neto (2021). As análises de estabilidade do aterro foram realizadas considerando dois cenários quanto a situação a qual se encontra o nível piezométrico de líquidos no interior do maciço sanitário. Sendo estes:

- Cenário 1 (condição não saturada): Sem a presença de nível piezométrico de líquidos no interior do maciço (Cenário referente a condição mais favorável à estabilidade global do maciço);
- Cenário 2 (condição saturada): Com a presença de 17 metros de nível piezométrico de líquidos no interior do maciço, sendo o maior nível constatado durante o monitoramento do aterro (Cenário referente a condição mais desfavorável à estabilidade global do maciço). Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros geotécnicos dos RSU e dos solos referentes aos dois cenários considerados resultantes dos ensaios realizados.

Tabela 1 – Parâmetros geotécnicos para os dois cenários considerados.

Material	Peso Específico (KN/m ³)	Coesão (kPa)		Ângulo de Atrito (°)	
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2
Resíduo recém-aterrados	10	1,4	5,2	28,3	21,6
Resíduos com 1 ano	15	41	52,7	35,6	27
Resíduos com 2 anos	15	41,6	28,4	31,9	29,7
Camada de cobertura	14,5	7,8	7,8	31	31
Camada de base	18,8	1,7	1,7	26	26
Subsolo	14,5	7,8	7,8	31	31
Rocha	26	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Araújo Neto (2021).

Os dados dos níveis piezométricos de líquidos foram obtidos por meio de monitoramento dos piezômetros instalados na Célula do aterro com o auxílio de um sensor eletrônico de nível piezométrico. O valor considerado para esta pesquisa foi o mais crítico detectado durante todo o monitoramento do aterro, sendo 17 metros. A Figura 4 mostra o layout com a disposição dos piezômetros.

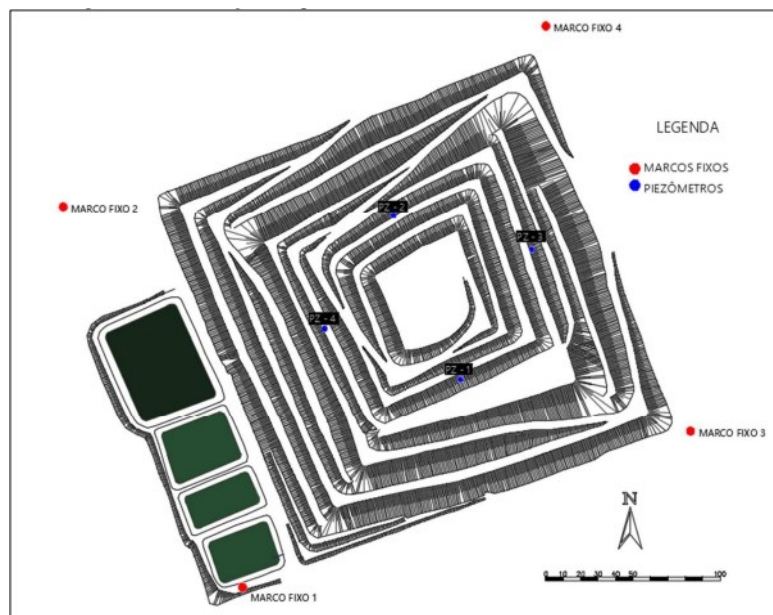


Figura 4 – Localização dos piezômetros Pz1, Pz2, Pz3, Pz4 no Aterro Sanitário.
Fonte: Araújo Neto (2021).

2.3 Seção crítica bidimensional

Conforme destaca Araújo Neto (2021), para determinar as seções críticas utilizadas nas análises bidimensionais, foram modeladas as seções com as cotas topográficas mais elevadas. Essa abordagem foi adotada para que as seções representassem o cenário mais desfavorável. Na Figura 5 é apresentada a geometria e na Figura 6 as seções utilizadas nas análises de estabilidade.

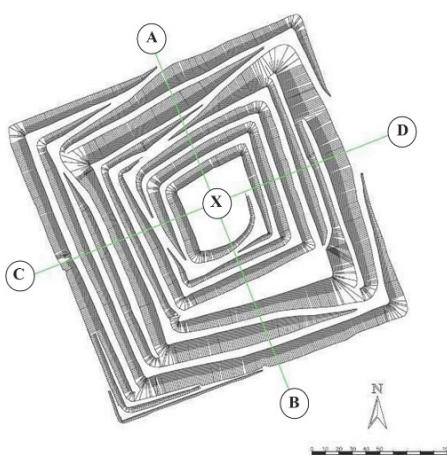


Figura 5 – Geometria utilizada nas análises de estabilidade.
Fonte: Araújo Neto (2021).

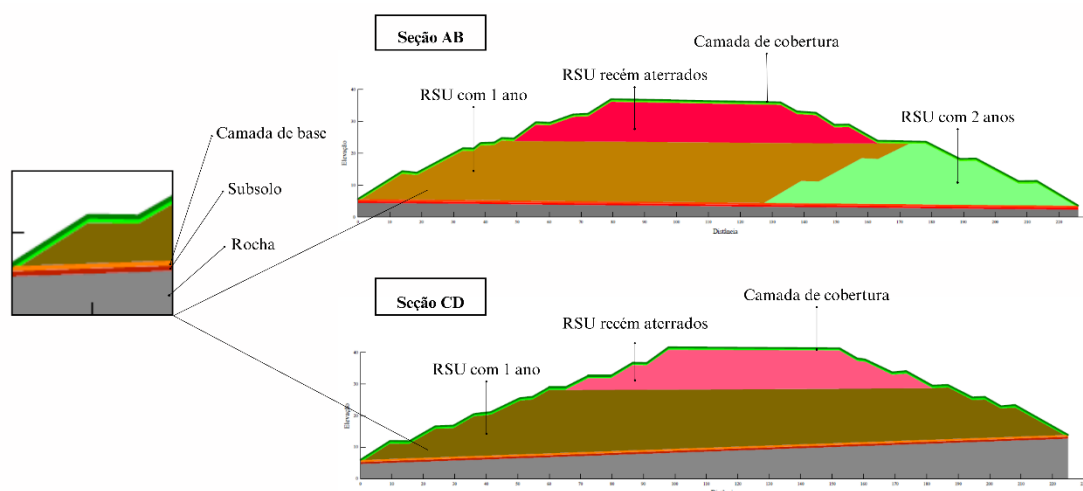


Figura 6 – Seções críticas AB e CD.
Fonte: Adaptado de Araújo Neto (2021).

2.4 Análises de estabilidade de taludes e de sensibilidade

O método de análise de estabilidade dos taludes do Aterro Sanitário adotado neste trabalho foi o método de equilíbrio limite, uma vez que, é reconhecido como a técnica tradicional e predominante na avaliação da estabilidade de taludes convencionais em solos (Qi *et al.*, 2021). Seed, Mitchell e Seed (1990), Strauss (1998), Zhan, Chen e Ling (2008), Remédio (2014), Silva (2011), Jahanfar *et al.*, (2017), Basha e Raviteja (2018), Andrades (2018), Lu *et al.*, (2019), Daciolo (2020), Damasceno *et al.*, (2020), Medeiros, Norberto e Mariano (2020) também realizaram análises de estabilidades empregando o método do equilíbrio limite em aterros sanitários. Dentro desse método, foi selecionado o método de Morgenstern-Price, que satisfaz todas as condições de equilíbrio estático e é amplamente utilizado na prática profissional, além de ser um método robusto e conservador, proporcionando valores favoráveis a segurança da estabilidade dos taludes (BRETAS, 2020).

Os *softwares* utilizados neste trabalho foram o *slope/w* da Geostudio e o *Slide/2* da Rocscience (empresa desenvolvedora) determinados por meio de pesquisa bibliográfica. Durante essa etapa, ao consultar os estudos sobre análises de estabilidade de taludes de aterros sanitários, constatou-se que vários autores têm explorado esses softwares, investigando a estabilidade de diferentes aterros sanitários em diversas regiões. Daciolo (2020) utilizou o *Slide/2*, enquanto Andrades (2018) empregou tanto o *Slide/2* quanto o *slope/w*. Além disso, Remédio (2014), Silva (2014), Medeiros, Norberto e Mariano (2020), Damasceno *et al.* (2020), Cirolini *et al.* (2020), Jahanfar *et al.* (2017), e Lu *et al.* (2019) realizaram suas análises por meio do *slope/w*. Esses estudos não só destacam a eficácia dessas ferramentas, mas também evidenciam sua relevância no campo da investigação geotécnica desses tipos de empreendimentos.

No *slope/w*, a definição da superfície de pesquisa é realizada manualmente. Neste trabalho, o critério de buscas da superfície de ruptura adotado no *slope/w* foi o de determinação das entradas e saídas consideradas mais críticas. No *slide/2*, a definição das superfícies de pesquisa adotada foi a busca automatizada, considerando a região com maior risco de ruptura com base nos dados de projeto inseridos, enquanto o cálculo do fator de segurança foi realizado por meio de metodologias embasadas em análises de equilíbrio limite.

Para analisar o efeito da variabilidade das propriedades de resistência no fator de segurança, obtido para as análises bidimensionais, foram conduzidas análises de sensibilidade nos softwares *slope/w* e no *slide/2* considerando os parâmetros geotécnicos, geometria e cenários descritos nas seções 2.2 e 2.3. Adotou-se intervalos de variação dos parâmetros geotécnicos dos materiais representantes da configuração do maciço sanitário referentes as seções AB e CD e aos dois cenários considerados neste estudo. As análises de cada seção foram realizadas em relação aos parâmetros geotécnicos de cada cenário, sendo eles: coesão e o ângulo de atrito. Os intervalos de variação foram determinados em relação aos valores fixos considerados nas análises de estabilidade.

3. Resultados e discussão

3.1 Análises bidimensionais para o Cenário 1

Para o Cenário 1, foram realizadas análises de estabilidade das seções A-X, B-X, C-X e D-X, utilizando os *softwares* *slope/w* e *slide/2*. A Figura 7 apresenta os resultados dos fatores de segurança mais críticos de cada seção e *software* específico analisado.

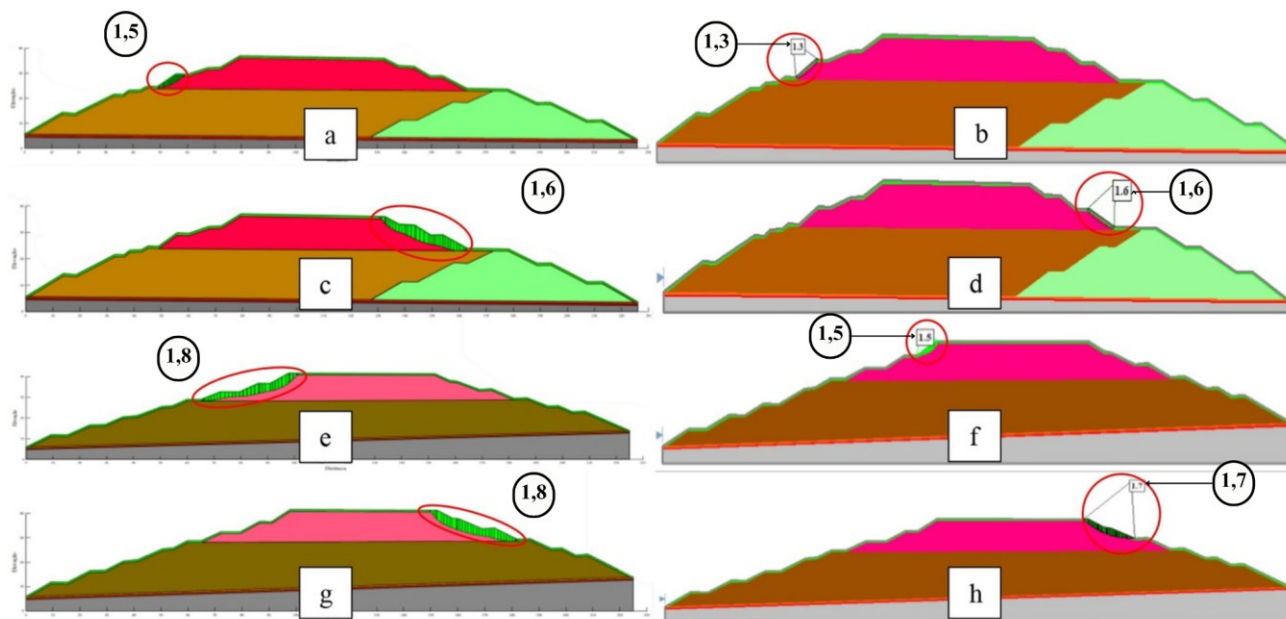


Figura 7 – Análise de estabilidade da seção A – X (Corte AB) para o Cenário 1 - *software* *slope/w* (a) e para *software* *slide/2* (b); Análise de estabilidade da seção B – X (Corte AB) para o Cenário 1 - *software* *slope/w* (c) e para *software* *slide/2* (d); Análise de estabilidade da seção C – X (Corte CD) para o Cenário 1 - *software* *slope/w* (e) e para *software* *slide/2* (f); Análise de estabilidade da seção D – X (Corte CD) para o Cenário 1 - *software* *slope/w* (g) e para *software* *slide/2* (h).

Fonte: Autores (2024).

Na Figura 7, para a seção A – X, ao comparar os fatores de segurança (FS) obtidos para os dois softwares é notável a convergência entre as regiões em que a superfície de ruptura mais crítica ficou localizada, além de que os valores ficaram próximos. Já para a seção B – X, é possível visualizar que os FS obtidos para os dois softwares tiveram valores iguais, porém, no *software* *slope/w*, a área da superfície de ruptura mais crítica foi maior que no *software* *slide/2*. Para a seção C – X, tanto os valores dos fatores de segurança, quanto a área abrangida pelas potenciais superfícies de rupturas mais críticas foram diferentes nos dois softwares. Partindo para a seção D – X, nota-se que os FS e as áreas abrangidas pelas prováveis superfícies de ruptura ficaram próximos. De modo geral, para o Cenário 1, a principal diferença nos fatores de segurança obtidos pode ser atribuída ao método de busca das superfícies de ruptura.

A definição da superfície de pesquisa é feita automaticamente pelo *software* *slide/2* que leva em consideração a região com maior risco de ruptura a partir dos dados de projeto inseridos. Já no *software* *slope/w* como é realizada manualmente, pode interferir negativamente nos valores encontrados. Portanto, a divergência dos resultados em cada *software* de análise geotécnica, dá-se, provavelmente, devido às diferentes metodologias entre eles e a adoção de algoritmos para simular o comportamento do solo e das condições do terreno. As simplificações empregadas na modelagem das simulações numéricas para tornar os cálculos viáveis e eficientes, como a discretização do modelo ou os algoritmos de busca das superfícies de ruptura, podem introduzir limitações que resultem em superfícies críticas diferentes, mesmo utilizando métodos similares.

Como é possível visualizar nas Figuras 7, os fatores de segurança mínimos obtidos pelos dois *softwares* foram identificados nas áreas correspondentes às camadas de resíduos recentemente aterrados. Observa-se que as camadas superiores nas Células de resíduos, que correspondem aos RSU mais jovens, possuem menores resistências ao cisalhamento, uma vez que os parâmetros geotécnicos desses resíduos são inferiores aos dos RSU com 1 e 2 anos de aterramento. Na configuração da Célula referente a esse estudo, as camadas de RSU recém aterrados ainda não haviam sido submetidas aos efeitos das pressões de sobrecargas das camadas superiores.

3.2 Análises bidimensionais para o Cenário 2

Para o Cenário 2, a Figura 8 apresenta os resultados dos fatores de segurança para cada seção e *software* específico.

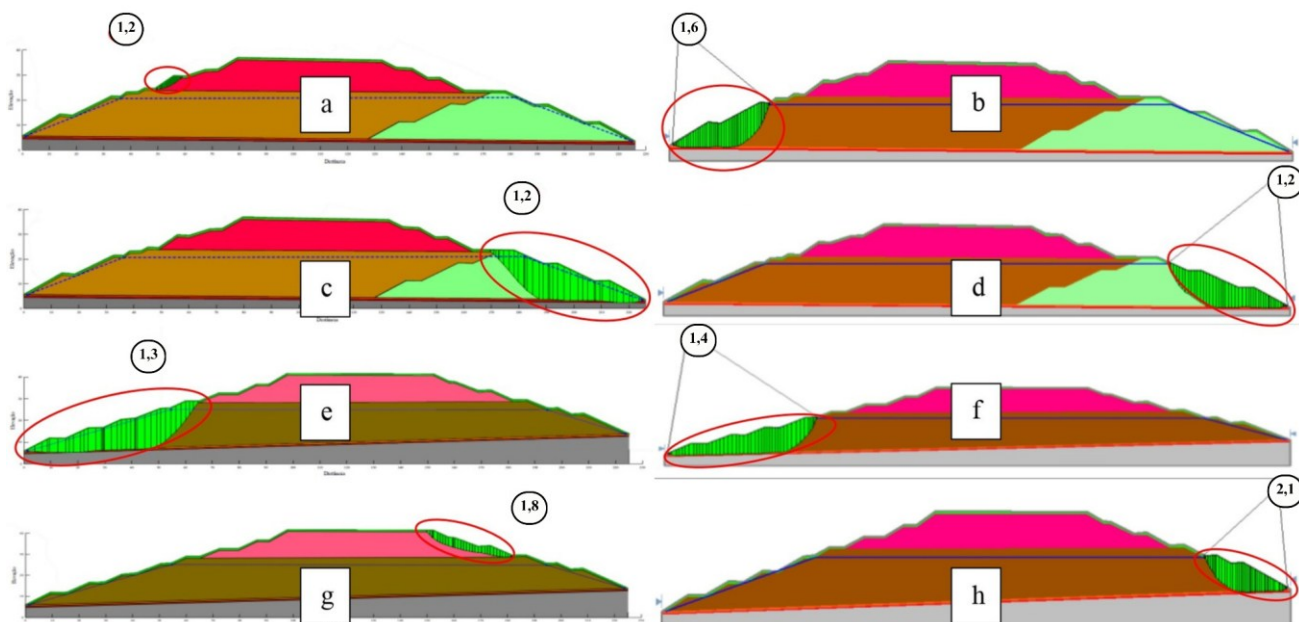


Figura 8 – Análise de estabilidade da seção A – X (Corte AB) para o Cenário 2 - software slope/w (a) e para software slide/2 (b); Análise de estabilidade da seção B – X (Corte AB) para o Cenário 2 - software slope/w (c) e para software slide/2 (d); Análise de estabilidade da seção C – X (Corte CD) para o Cenário 2 - software slope/w (e) e para software slide/2 (f); Análise de estabilidade da seção D – X (Corte CD) para o Cenário 2 - software slope/w (g) e para software slide/2 (h).

Fonte: Autores (2024).

Na seção A – X, os FS obtiveram valores próximos, porém a potencial superfície de ruptura mais crítica apresenta-se em regiões diferentes no *slope/w* e no *slide/2*. Já para seção B – X, conforme apresentado na Figura 8, os fatores de segurança foram iguais e as potenciais superfícies de ruptura mais críticas abrangeram em áreas semelhantes. Na seção C – X, os FS apresentaram valores próximos e potencial superfície de ruptura mais crítica, abrangendo a mesma área. Assim como na seção A – X, na seção D – X os fatores de segurança obtidos eram valores próximos, porém a potencial superfície de ruptura mais crítica apresenta-se em regiões diferentes no *slope/w* e no *slide/2*.

Nas Seções B-X e C-X nos dois cenários estudados, observou-se que os fatores de segurança do Cenário 2 foram menores do que no Cenário 1, tanto no *slope/w* quanto no *slide/2*. Essa redução nos FS pode ser atribuída ao posicionamento da superfície de ruptura mais crítica que ficou abaixo da linha piezométrica em ambos os *softwares*. Para as Seções A-X e D-X, o FS do Cenário 2, calculado no *slide/2*, foi maior que o do Cenário 1. Isso deve-se à consideração do excesso de poropressão na configuração do projeto, o *slide/2* realiza as buscas das superfícies de ruptura mais críticas apenas na região abaixo da linha piezométrica, resultando em um aumento do FS obtido quando comparado ao do *slope/w* para o Cenário 2.

Outros autores, como Sheng *et al.*, (2021), também constataram a influência negativa dos líquidos na estabilidade de um aterro sanitário. Ao investigar a expansão vertical dessas estruturas, especialmente considerando a presença de

lixiviado, os autores constataram uma diminuição no fator de segurança. Por exemplo, quando esse nível passa de 2 m para 20 m, o fator de segurança do aterro diminui em 13,2–15,4%. Corroborando, com o que ocorreu neste estudo em que nas seções B – X e C – X também demonstraram uma diminuição no fator de segurança sob o Cenário 2. Andrade (2018) ao analisar a estabilidade de um aterro sanitário, empregou dados de monitoramento de níveis piezométricos de líquidos medidos ao longo de 12 meses e obteve os parâmetros geotécnicos dos RSU da literatura técnica, logo, assim com esse trabalho, o presente estudo destaca a importância de considerar diferentes *softwares* para analisar as variações nos fatores de segurança.

Conforme o que preconiza a NBR 11682 (ABNT, 2009), por meio dos fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade é possível avaliar a situação da estabilidade do aterro para os cenários em estudo. De acordo com esta norma, os fatores de segurança abaixo de 1,5 estão em desconformidade com o mínimo recomendado, considerando a condição de alto nível de segurança ao risco contra danos materiais e ambientais, e médio ao risco de perda de vidas humanas. A Tabela 2 apresenta a classificação dos FS de cada seção em relação à conformidade e desconformidade com o mínimo recomendado pela NBR 11682 (ABNT, 2009).

Tabela 2 – Classificação dos fatores de segurança para cada seção com base na NBR 11682 (ABNT, 2009).

Cenário	Seção	<i>slope/w</i>	Situação	<i>slide/2</i>	Situação
1	A-X	1,5	Conformidade	1,3	Desconformidade
	B-X	1,6	Conformidade	1,6	Conformidade
	C-X	1,8	Conformidade	1,5	Conformidade
	D-X	1,8	Conformidade	1,7	Conformidade
2	A-X	1,5	Conformidade	1,6	Conformidade
	B-X	1,2	Desconformidade	1,2	Desconformidade
	C-X	1,3	Desconformidade	1,4	Desconformidade
	D-X	1,8	Conformidade	2,1	Conformidade

Fonte: Autores (2024).

A estabilidade dos taludes do Aterro Sanitário em estudo também foi analisada por Araújo Neto (2021), ele verificou valores superiores aos do presente estudo. Essas divergências de valores podem ser atribuídas aos diferentes métodos de busca empregados para determinar as superfícies de ruptura mais críticas. No estudo conduzido por Araújo Neto (2021), a busca pelas superfícies críticas foi realizada variando o raio e o centro do círculo que intersecta o maciço sanitário no *software* GEO5 2021. Isso significa que as buscas realizadas não capturaram eventuais rupturas pontuais que poderiam ocorrer ao longo dos taludes. Essa abordagem, embora ofereça uma visão abrangente do comportamento do talude, pode subestimar a ocorrência de falhas localizadas ou pontuais.

Ao comparar os resultados obtidos nesta pesquisa com os de Strauss (1998), Remédio (2014), Andrade (2018), Daciolo (2020), Sheng *et al.*, (2021) Awad-Allah (2022), tem-se que os fatores de segurança obtidos para este estudo são representativos, uma vez que os parâmetros geotécnicos utilizados para determinação das propriedades dos resíduos foram obtidos por meio de coletas de dados semelhantes, métodos similares e situações de campos. Esse método de obtenção de dados, que reflete as condições reais do local, confere uma relevância particular aos resultados apresentados.

3.3 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade auxilia os engenheiros geotécnicos a determinar quais parâmetros de entrada têm o maior impacto na estabilidade do talude, destacando aqueles que demandam maior atenção. As Figuras 9 e 10 representam os resultados das análises de sensibilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU e dos solos do Aterro Sanitário em relação ao fator de segurança para a seção A-X para os dois cenários e *softwares* analisados.

Nas análises produzidas, a variação dos parâmetros geotécnicos estudados (ângulo de atrito e coesão) ocorre de maneira diferente para o *slope/w* e para o *slide2*, enquanto que o *software slope/w* demonstra a variação do ângulo de atrito e coesão por meio da faixa de sensibilidade sendo padronizada de -1 a +1, em que o menor valor dos parâmetros equivale a -1 e o maior equivale a +1. Já para o *software slide/2* a faixa de sensibilidade é padronizada de 0 a 100%, sendo o 0% correspondente ao menor valor de ângulo de atrito e coesão, e o 100% referente ao maior valor dos parâmetros. Já o eixo vertical corresponde ao fator de segurança.

A percepção de sensibilidade é visualizada por meio da inclinação da reta que reflete a alteração do FS em relação aos valores de cada variação do parâmetro. A convergência de todas as retas representa o fator de segurança para as análises que consideram os valores da Tabela 1.

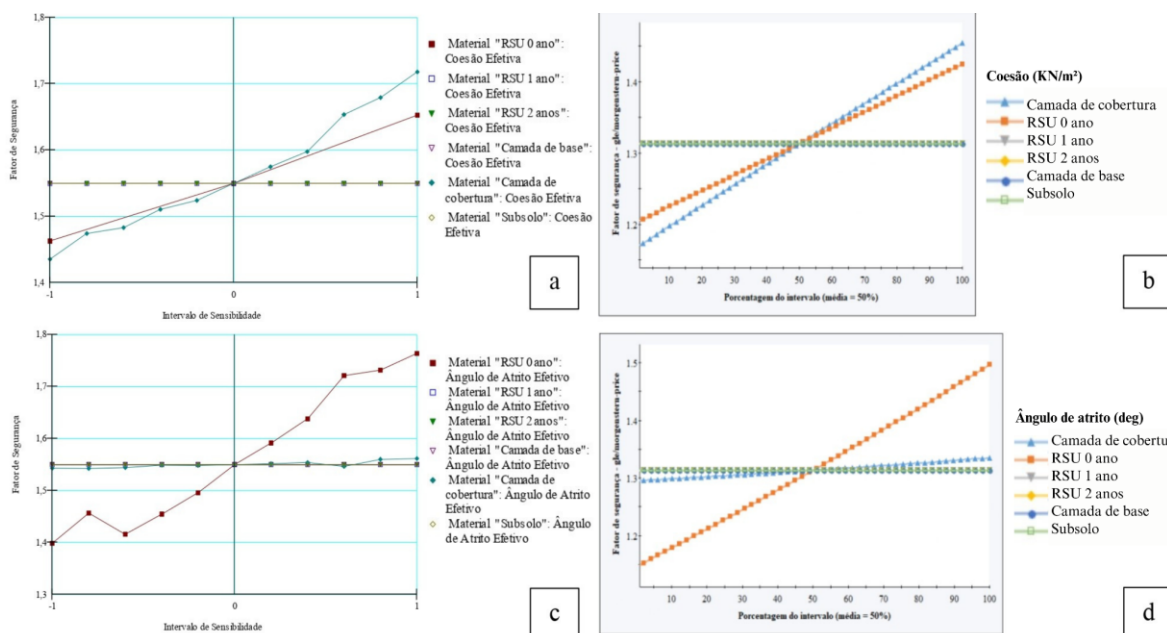


Figura 9 – Análise de sensibilidade da Seção A – X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 1 software slope/w (a) e para software slide/2 (b); Análise de sensibilidade da Seção A – X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 software slope/w (c) e para software slide/2 (d).

Fonte: Autores (2024).

Para o Cenário 1, como se pode observar na Figura 9, para a seção A – X utilizando o *slope/w*, a camada que mais causa oscilações no FS ao variar a coesão é a camada de cobertura em que o fator de segurança se aproxima de 1,4 até o máximo 1,7. Já ao examinar a seção A-X por meio do software Slide/2, é evidente que a camada que mais gera oscilações no FS em resposta à variação da coesão é, novamente, a camada de cobertura do aterro. Além disso, para a seção A – X utilizando o *slope/w*, a camada que mais causa oscilações no FS ao variar o ângulo de atrito é a camada de resíduos recém aterrados em que o fator de segurança atinge um mínimo de 1,4 até o máximo próximo de 1,8. Já para a seção A – X utilizando o *slide/2*, a camada que mais causa oscilações no fator de segurança ao variar o ângulo de atrito é a camada de resíduos recém aterrados.

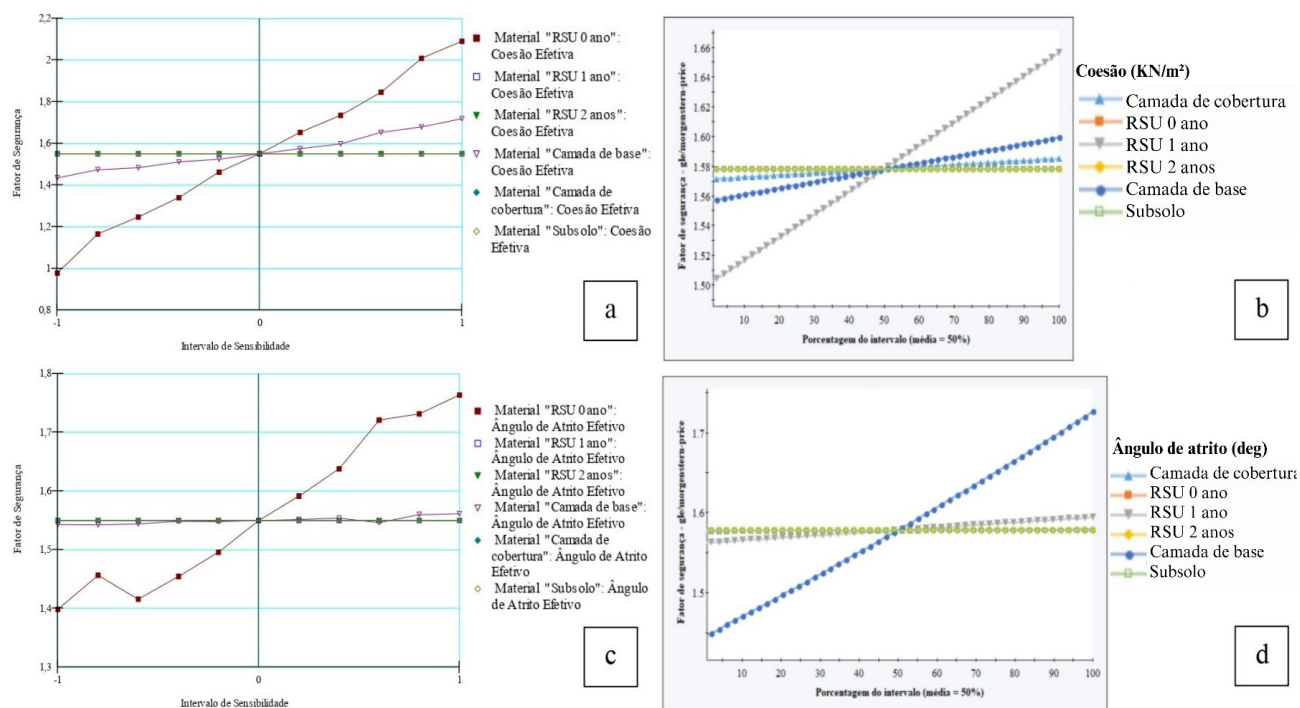


Figura 10 – Análise de sensibilidade da Seção A – X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 2 software slope/w (a) e para software slide/2 (b); Análise de sensibilidade da Seção A – X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 2 software slope/w (c) e para software slide/2 (d).

Fonte: Autores (2024).

Já para o Cenário 2, ainda para a mesma seção, utilizando o *slope/w*, a camada que mais causa oscilações no FS ao variar a coesão é a camada de resíduos recém aterrados em que o fator de segurança atinge um mínimo próximo de 1,0 até o máximo próximo de 2,0. Observa-se que ao variar a coesão, utilizando o *slope/w*, a camada que mais causa pequenas oscilações no FS é a camada de resíduos com 1 ano de aterramento. Ainda para a mesma seção, utilizando o *slope/w*, a camada que mais causa oscilações no FS ao variar o ângulo de atrito é a camada de resíduos recém aterrados em que o fator de segurança atinge um mínimo próximo de 1,4 até o máximo próximo de 1,8.

Para o Cenário 2 no *slide/2*, a camada que mais causa oscilações no FS ao variar o ângulo de atrito é a camada de base em que o fator de segurança atinge um mínimo próximo de 1,5 até o máximo próximo de 1,7. Ao verificar os resultados das análises de sensibilidade de todas as seções é possível verificar que as variações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, especialmente, nos RSU com 0 ano de aterramento (recém-aterrados), exerceram a maior influência no fator de segurança.

A Tabela 3 apresenta uma compilação dos resultados obtidos nas análises de sensibilidade destacando as camadas que mais influenciam em oscilações no fator de segurança de acordo com a variação dos parâmetros para cada seção e software utilizado (*slope/w* e *slide/2*) nos dois cenários analisados.

Tabela 3 – Camadas que mais influenciam no FS de acordo com a variação dos parâmetros para cada seção e software.

Cenário	Seção	Parâmetro variado	Camadas que mais influenciam no FS	
			<i>slope/w</i>	<i>slide/2</i>
1	A-X	Coesão	Camada de cobertura RSU 0 ano	RSU 1 ano
				Camada de cobertura
	B-X	Ângulo de atrito	RSU 0 ano	RSU 0 ano
		Coesão	RSU 1 ano	Camada de cobertura RSU 0 ano
2	C-X	Ângulo de atrito	RSU 0 ano	RSU 0 ano
		Coesão	RSU 0 ano	Camada de cobertura RSU 0 ano

Camada de cobertura			
D-X	Ângulo de atrito	RSU 0 ano	RSU 0 ano
	Coesão	Camada de cobertura RSU 0 ano	RSU 0 ano
A-X	Ângulo de atrito	RSU 0 ano	RSU 0 ano
	Coesão	RSU 0 ano	RSU 1 ano
2	Camada de cobertura		
	Ângulo de atrito	RSU 0 ano	Camada de base
	Coesão	RSU 2 anos	RSU 2 anos
	Ângulo de atrito	Camada de base	Camada de base
	Coesão	RSU 1 ano	RSU 1 ano
	Ângulo de atrito	Camada de base	RSU 1 ano
	Coesão	Camada de cobertura	RSU 1 ano
	Ângulo de atrito	RSU 0 ano	Camada de base

Fonte: Autores (2024).

De modo geral, no Cenário 1, nota-se que as camadas que mais influenciam no FS variam dependendo do parâmetro e da seção analisada, com destaque para a camada de cobertura e dos resíduos recém aterrados que, frequentemente, apresentam influência significativa, especialmente para variações na coesão. Isso sugere que a estabilidade dessas seções está fortemente ligada às propriedades mecânicas dessas camadas, principalmente, quando os RSU são recentemente depositados. Observa-se que os resíduos recém aterrados apresentam composições mais heterogêneas e à medida que eles vão passando pelos processos biodegradativos sofrem alterações em suas características e propriedades, até se estabilizarem.

Já no Cenário 2, as camadas mais influentes também variam de acordo com o parâmetro e a seção, com maior ênfase na camada de base para variações no ângulo de atrito. Esses resultados evidenciam a importância de considerar as características específicas das camadas de material ao avaliar a estabilidade de aterros sanitários.

Quanto aos softwares, para o Cenário 1 o *slope/w* e o *slide/2* mostram diferentes sensibilidades em relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento, especialmente na Seção A-X, onde a camada de cobertura de RSU com 0 ano é mais influente no FS no *slope/w*, enquanto no *slide/2*, são os RSU com 1 ano. No Cenário 2, novamente são observadas diferenças entre os softwares, destacando-se a maior influência da camada de base no *slide/2* para variações no ângulo de atrito, em comparação com o *slope/w*.

Estudos como os de Daciolo (2020) e Jahanfar *et al.*, (2017), destacam a importância de considerar os fatores responsáveis por causar variações no fator de segurança, como os parâmetros de resistência ao cisalhamento, demonstrando como esses fatores podem influenciar significativamente a estabilidade dos taludes ao longo do tempo e em diferentes condições operacionais. Os vários parâmetros que compõem o maciço exercem expressiva influência sobre sua estabilidade e, por conseguinte, sobre o fator de segurança dos taludes. Sendo crucial considerar a variação dessas condições durante a concepção de projetos de aterros, para garantir sua estabilidade ao longo do tempo (Khoshand *et al.*, 2018).

A sensibilidade dos FS às variações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento ressalta a importância do monitoramento contínuo das condições do aterro sanitário. Mudanças nas características dos materiais ao longo do tempo em decorrência dos processos de compactação, decomposição ou infiltração de água, podem afetar significativamente a estabilidade dos taludes e devem ser monitoradas. Os resultados destacam a importância de uma caracterização precisa dos materiais dispostos no aterro sanitário, especialmente dos resíduos recém aterrados. Uma compreensão das propriedades geotécnicas desses materiais é crucial para prever com precisão o comportamento dos taludes e garantir sua estabilidade.

4. Considerações finais

Os fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade bidimensional elucidam que, de modo geral, os taludes do Aterro Sanitário em estudo podem ser considerados em conformidade com o que preconiza as normas vigentes, com

algumas ressalvas decorrentes de divergências nas simulações numéricas, elevada saturação dos resíduos e simplificações nas análises que não consideram o efeito da pressão dos gases e dos processos biodegradativos dos resíduos.

A precisão das potenciais superfícies de ruptura crítica detectadas nas simulações numéricas das análises de estabilidade bidimensionais está condicionada a qualidade e representatividade dos dados de entrada, enfatizando a importância da obtenção dos parâmetros geotécnicos dos RSU e dos solos por meio ensaios de campo e de laboratório, além de dados de nível piezométrico de líquidos provenientes de monitoramento das poropressões.

Por meio da aplicação de análises de sensibilidade tem-se que a maior variabilidade do FS à variação dos parâmetros de resistência está associada às propriedades dos RSU recém arretados em decorrência da sua baixa resistência ao cisalhamento desses resíduos.

Entre os softwares avaliados nas análises bidimensionais, o *slope/w* foi considerado o mais satisfatório para análises considerando o Cenário 2, identificando de forma mais precisa as superfícies de ruptura críticas em toda a seção analisada. Já para o Cenário 1, o *slide/2* apresentou o melhor desempenho.

Referências

- AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. *AESA 2022: Meteorologia – Chuvas. Campina Grande: AESA*. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/?formdate=2019-08-30&produto=municipio&periodo=anual>. Acesso em: 02/02/2024.
- Andrades, S. A. de. *Estudo do fator de segurança de um aterro sanitário tipo convencional comparando com um aterro sanitário tipo encosta*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- Araújo Neto, C. L. de. *Modelagem da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos para análises da estabilidade de taludes de aterros sanitários*. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2021.
- Araújo Neto, C. L. *Análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para previsão das deformações de aterros sanitários*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR 11682: Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- Awad-Allah, M. F. Field and numerical studies to evaluate slope stability in municipal solid waste sites. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 7, n. 2, p. 1-15, 7 fev. 2022.
- Basha, B. M.; Raviteja, K. V. N. S. Meethotamulla Landfill Failure Analysis: a probabilistic approach. *Developments In Geotechnical Engineering*, p. 341-351, 2018.
- Bretas, T. C. *Retroanálise probabilística tridimensional por equilíbrio-limite de rupturas de talude em Belo Horizonte/MG*. 2020. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- Cirolini, A.; Bruch, A. F.; Markezan, R. G.; da Silva; F. M. M.; Carneiro, M. Análise da Estabilidade de Taludes do Aterro Sanitário de Rosário do Sul/RS. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, 16(5). 2020.
- Daciolo, L. V. P. *Parâmetros de resistência de RSU: abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.
- Damasceno, L. G.; Ferreira, P. H.; Duarte, L. N.; Sousa, D. H. S.; Oliveira, T. Aplicação de métodos estatísticos na análise de estabilidade em taludes de aterro sanitário. *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, [S.L.], p. 1-8, 12 mar. 2020.

- Gao, W.; Bian, X. C.; Xu, W. J.; Chen, Y. M. Storage capacity and slope stability analysis of municipal solid waste landfills. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 32, n. 4, p. 04018036, 2018.
- Ghasemian, A.; Karimpour-Fard, M.; Nadi, B. Reliability analysis and risk assessment of a landfill slope failure in spatially variable municipal solid waste. *International Journal of Environmental Science and Technology*, p. 1-14, 2024.
- Jahanfar, A.; Gharabaghi, B.; Mcbean, E. A.; Dubey, B. K. Municipal Solid Waste Slope Stability Modeling: a probabilistic approach. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, [S.L.], v. 143, n. 8, p. 1-10, ago. 2017.
- Khoshand, A.; Fathi, A.; Zoghi, M.; Kamalan, H. Seismic stability analyses of reinforced tapered landfill cover systems considering seepage forces. *Waste Management & Research*, v. 36, ed. 4, p. 361-372, 2018. DOI: 10.1177/0734242X18757628
- Lü, X.; Xue, D.; Chen, Q.; Zhai, X.; Huang, M. Centrifuge model test and limit equilibrium analysis of the stability of municipal solid waste slopes. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 78, p. 3011-3021, 2019.
- Li, J.; Chen, R.; Lin, H. Limit Equilibrium Analysis of Landfill Instability Based on Actual Failure Surface. *Applied Sciences*, v. 13, n. 18, p. 10498, 20 set. 2023. DOI: 10.3390/app131810498
- Medeiros, R. M.; Norberto, A. S.; Mariano, M. O. H. Avaliação de estabilidade de taludes de aterros sanitários. *Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica*, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 749, 6 dez. 2020.
- Qi, S.; Ling, D.; Yao, Q.; Lu, G.; Yang, X.; Zhou, J. W. Evaluating slope stability with 3D limit equilibrium technique and its application to landfill in China. *Engineering Geology*, v. 280, p. 105939, 2021.
- Remédio, F. H. *Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com N_{spt}*. 2014. Tese (Doutorado) - Curso de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2014.
- Seed, R. B.; Mitchell, J. K.; Seed, H. B. Kettleman Hills waste landfill slope failure. II: Stability analyses. *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 116, n. 4, p. 669- 690, 1990.
- Sheng, H.; Ren, Y.; Huang, M.; Zhang, Z.; Lan, J. Vertical Expansion Stability of an Existing Landfill: a case study of a landfill in xi an, china. *Advances In Civil Engineering*, v. 2021, p. 1-14, 7 jul. 2021.
- Silva, B. V. Estabilidade de taludes de aterros não controlados de resíduos. 2014. Dissertação (Mestrado) - Engenharia geológica, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.
- Silva, J. P. M. da. *Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes*. 2011. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2011.
- Silva, T. F. da. *Estudo de mistura de solos para impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.
- Souza, J. C. M. de. *Condições Intervenientes Nas Emissões Fugitivas De Biogás Em Camada De Cobertura De Solo Compactado Em Aterros Sanitários*. 2021. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-Pb, 2021.
- Strauss, M. *Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre*. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- Zhan, T. L. T.; Chen, Y. M.; Ling, W. A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. *Engineering Geology*, v. 97, n. 3-4, p. 97-111, abr. 2008. Elsevier BV.