

Análise da correlação estatística de parâmetros e sensibilidade do Fator de Segurança (FS) da estabilidade de taludes de aterros sanitários *Analysis of the statistical correlation of parameters and sensibility of the Safety Factor (FS) of landfill slope stability*

Alison de Souza Norberto¹, Rafaella de Moura Medeiros¹, Riadny Patrícia de Souza Ferreira¹, Liz Geise Santos de Araújo¹, Maria Odete Holanda Mariano¹, José Fernando Thomé Jucá¹

¹ Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco, Brasil

Contato: alison.norberto@ufpe.br

Palavras-Chave

aterros de RSU
comportamento mecânico
heterogeneidade
ruptura de aterros

RESUMO

Os parâmetros geotécnicos de aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) são reportados com ampla oscilação de seus valores pelas literaturas, tal variação incide diretamente no comportamento mecânico dessas estruturas e, neste contexto, na estabilidade de taludes. Tal variabilidade pode ser justificada pela heterogeneidade da massa de resíduos, bem como fatores climáticos/ambientais e de operação. Com tal panorama, o presente trabalho busca avaliar a sensibilidade do FS da estabilidade de taludes de aterros de RSU, a fim de testar como se comporta o FS em diversos cenários de variação dos parâmetros. Os parâmetros que foram testados e combinados nas análises de sensibilidade do FS foram: peso específico, coesão, ângulo de atrito, nível de água e geometria. Para realização das análises de estabilidade de talude foi utilizado o Software GeoSlope 2018, que utiliza o critério de ruptura de Mohr-Coulomb nas análises pelos métodos do equilíbrio limite. O estudo paramétrico realizado, verificou que o nível de água tem grande influência na redução do FS, em alguns casos provocando uma redução no FS superior a 50%, este aspecto demonstra a importância da utilização de mecanismo de controle monitoramento deste parâmetro, não só em campo, mas também por meio de análises e simulações de cenários diversos, para assim evitar ou mitigar os riscos de ruptura destas estruturas.

Key-word

MSW landfills
mechanical behavior
heterogeneity
landfill breaks

ABSTRACT

The geotechnical parameters of urban solid waste landfills (MSW) are reported with wide oscillation of their values in the literature, such variation directly affects the mechanical behavior of these structures and, in this context, the stability of slopes. Such variability can be explained by the heterogeneity of the waste mass, as well as climatic/environmental and operational factors. With such a panorama, the present work seeks to evaluate the sensitivity of the FS of the stability of slopes of MSW landfills, in order to test how the FS behaves in different scenarios of parameter variation. The parameters that were tested and combined in the FS sensitivity analysis were: specific weight, cohesion, friction angle, water level and geometry. To carry out the slope stability analysis, the GeoSlope 2018 Software was used, which uses the Mohr-Coulomb rupture criterion in the analyzes using the limit equilibrium methods. The parametric study carried out found that the water level has a great influence on the reduction of FS, in some cases causing a reduction in FS greater than 50%, this aspect demonstrates the importance of using a control mechanism monitoring this parameter, not only in field, but also through analyzes and simulations of different scenarios, in order to avoid or mitigate the risks of rupture of these structures.

Informações do artigo

Recebido: 15 de setembro, 2021
Aceito: 04 de julho, 2022
Publicado: 30 de agosto, 2022

Introdução

Segundo Babu et al. (2014), a gestão adequada de quantidades crescentes de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem sido uma grande preocupação para os profissionais das engenharias civil e ambiental. Apesar dos esforços de reciclagem e reutilização, bem como da incineração, grandes quantidades de RSU ainda precisam ser dispostas em aterros sanitários.

Devido às regulamentações e desafios rigorosos na implantação de novos empreendimentos, tem-se proposto com maior frequência aterros mais íngremes, com os objetivos de melhorar o aproveitamento do espaço físico, reduzir os custos com implantação de novos aterros, bem como evitar a degradação de uma nova área (LÜ et al., 2018).

No entanto, a elevação da altura ou aumento da massa de resíduos acumulados em um aterro não deve alterar as condições de estabilidade do mesmo. Sendo que, além da geometria, outros fatores devem ser considerados nas análises, tais como: parâmetros geotécnicos, nível piezométrico, geração de biogás e fundação da estrutura.

Mesmo apresentando-se como a forma de destinação final mais utilizada, principalmente no Brasil, o aterro sanitário frequentemente apresenta uma problemática quanto à estabilidade dos taludes. Muitas das rupturas que ocorrem estão atreladas aos altos níveis de lixiviado e poropressão elevada na massa de resíduos (DANG et al., 2020).

Petrovic et al. (2016) afirmam que a principal questão do projeto geotécnico dos aterros sanitários envolve a avaliação da estabilidade global. A estabilidade deve ser assegurada durante o período de execução e no período de pós-encerramento. As principais considerações nas diretrizes de estabilidade dos resíduos estão diretamente ligadas à camada de cobertura, lixiviado, biogás, solo de fundação, geometria do aterro, parâmetros de resistência dos principais materiais e a influência da poropressão do lixiviado.

Reddy et al. (2009) acrescentam como fatores intervenientes na estabilidade do talude, o grau de compactação dos resíduos e as condições climáticas, além das pressões dos fluidos (líquidos e gases).

Cossu & Stegmann (2018) ressaltam que aterros instalados em encostas apresentam um possível plano de ruptura no contato entre a massa de resíduos e o solo, que pode ser agravado a depender da extensão vertical do aterro, de descartes inadequados de lodo, bem como atividades de escavação durante a mineração do mesmo.

Segundo Khoshand et al. (2018), os vários parâmetros do aterro podem influenciar e afetar a estabilidade e, conseqüentemente, o fator de segurança (FS). A consideração da variação desses parâmetros deve ser sempre levada em consideração na concepção dos projetos de aterros.

Outro aspecto importante, segundo Hong-Jun et al. (2015), é a respeito da complexidade da

composição gravimétrica dos resíduos, que depende de fatores econômicos, culturais e regionais. Além disso, deve ser considerado também, a mudança que o material presente na célula sofre ao longo do tempo, devido ao processo temporal de decomposição da matéria orgânica, mudando os aspectos físicos e mecânicos, além dos seus parâmetros.

Os valores dos parâmetros na análise de estabilidade de um aterro sanitário são, em geral, variáveis, por isso é necessário analisar a influência da mudança deles na estabilidade do aterro, e, assim, compreender melhor a sensibilidade do FS. E, também, para que - neste contexto - seja possível garantir uma análise mais consistente da estabilidade de aterros sanitários.

Vale salientar que, para a análise da estabilidade, a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos é usualmente quantificada pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb (RAMAIAH et al., 2017).

Têm-se notado que, com o avanço da idade da massa de resíduos sólidos aterrada, ocorre um incremento nos valores de ângulo de atrito e uma redução nos valores de coesão (ZEKKOS et al., 2010; GOMES et al., 2013). Como visto por Abreu e Vilar (2017) que, ao analisarem o resíduo disposto em um aterro sanitário experimental, em São Paulo, com a idade variando de 2 a 25 anos obtiveram um ângulo de atrito de 22,00° e uma coesão de 13,70 kPa para os resíduos menos degradados; para os resíduos mais degradados os valores encontrados foram 30,00° e 4,40 kPa, respectivamente.

Diante disso, faz-se necessária uma análise da estabilidade dos aterros, não somente utilizando os parâmetros relacionados aos resíduos novos, como também levando em consideração os resíduos envelhecidos.

Material e Métodos

Parâmetros de resistência ao cisalhamento coletados da literatura

A partir de uma pesquisa bibliográfica, foram coletados os parâmetros máximos e mínimos encontrados na literatura para o peso específico (γ), coesão (C) e ângulo de atrito (ϕ) apresentados por Norberto et al. (2020), dispostos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros máximos e mínimos de resistência ao cisalhamento

Resistência	Mínimo		Máximo	
γ (kN m ⁻³)	5,00	Del Greco e Oggeri (1994) em Borgatto (2006)	15,00	Giri e Reddy (2014) em Borgatto (2006)
C (kPa)	0,00	Strauss (1998)	48,00	Remédio (2014)
ϕ (°)	8,00	Reddy et al. (2011) em Babu et al. (2014)	48,10	Hong-Jun (2015)

Fonte: Norberto et al. (2020)

A alta variabilidade dos parâmetros em questão é devido à heterogeneidade da massa dos RSU e ao processo de biodegradação, à dificuldade de obtenção de amostras representativas para a realização do ensaio de cisalhamento, bem como a realização do ensaio utilizando-se caixas de cisalhamento de grandes dimensões. Em adição, o clima, a operação dos aterros, a composição gravimétrica dos resíduos também influencia no comportamento geotécnico.

A Tabela 2 mostra os valores médios dos parâmetros de resistência ao cisalhamento coletados da literatura.

Tabela 2. Valor médio dos parâmetros encontrados.

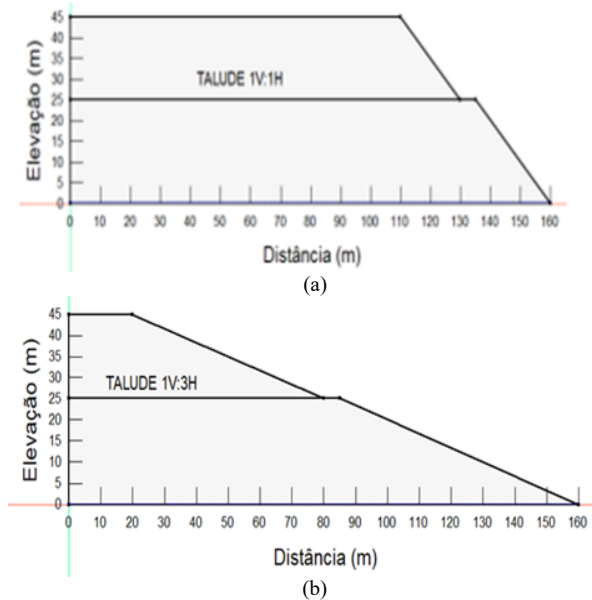
Parâmetro	Valor médio encontrado
γ (kN m ⁻³)	11,00
C (kPa)	20,00
ϕ (°)	29,00

Fonte: Norberto et al. (2020)

Geometrias avaliadas

Analisou-se duas geometrias distintas para efeito comparativo da interferência da sua variação: 1V:1H – inclinação íngreme e 1V:3H – inclinação suave, por serem as mais utilizadas a depender da escolha do projetista. A célula apresentou-se com dimensões de um aterro de médio porte, altura da seção em corte de 45,00 m e comprimento de 160,00 m (Figura 1).

Figura 1. Geometrias avaliadas: (a) 1V:1H (b) 1V:3H



Fonte: Norberto et al. (2020)

Nível piezométrico

A linha piezométrica, que é resultante da água de chuva percolada pela camada de cobertura e do chorume produzido pelo processo de decomposição de matéria orgânica, é de essencial importância na variação da sensibilidade do FS em aterros sanitários.

A partir das geometrias adotadas, foram determinados sete níveis de avaliação de estabilidade do aterro, os quais foram variados da condição de perfeita de drenagem com cota 0,00 m, até a condição mais crítica, com o aterro atingindo cota de 45,00 m (Tabela 3).

Tabela 3. Níveis piezométricos utilizados na avaliação de sensibilidade do FS

Nível piezométrico	H (m)
H ₁ (NA = H x 0)	0,00
H ₂ (NA = H x 1/4)	11,25
H ₃ (NA = H x 1/3)	15,00
H ₄ (NA = H x 1/2)	22,50
H ₅ (NA = H x 2/3)	30,00
H ₆ (NA = H x 3/4)	33,75
H ₇ (NA = H x 1)	45,00

Fonte: Norberto et al. (2020)

Biogás

O biogás, composto principalmente pelos gases CO₂ e CH₄, produzido no processo de decomposição da matéria orgânica, é de importante influência nas condições de estabilidade, pois quando não drenado de forma eficiente, o mesmo tende a formar bolsões de gás dentro das células, os quais podem levar a ruptura do aterro (BENVENUTO, 2016). Devido às limitações do software utilizado, a variação do biogás na sensibilidade do FS do aterro não foi avaliada no presente trabalho, mas vale destacar a importância do parâmetro nas condições de estabilidade de aterros sanitários.

Análise de estabilidade

Para analisar um talude foi utilizado o método da análise do equilíbrio limite delimita uma superfície que pode admitir uma ruptura circular, poligonal, ou de outra geometria e assume que que a ruptura se dá ao longo de tal superfície, sendo que ao longo da mesma é atingida a condição do fator de segurança (FS) simultaneamente.

O FS é definido pelo quociente entre a resistência ao cisalhamento disponível no solo e a tensão de cisalhamento mobilizada, como apresentado na Equação 1.

$$FS = \tau_{resistente} / \tau_{mobilizada} \tag{Eq. 1}$$

Onde: $\tau_{resistente}$ = resistência ao cisalhamento disponível na camada; $\tau_{mobilizada}$ = tensão de cisalhamento mobilizada na camada

As análises de estabilidade foram realizadas por meio do software GeoSlope 2018, da GeoStudio, em sua versão para estudante, o software utiliza o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. O método adotado nas análises foi o Morgenstern-Price, o qual realiza uma análise de estabilidade que satisfaz as condições de equilíbrio limite.

O método de Morgenstern-Price exige um cálculo computacional derivado de um complexo processo iterativo, que utiliza a diretriz dos métodos das fatias na avaliação da estabilidade podendo calcular superfícies de rupturas quaisquer.

Avaliação combinada da sensibilidade do FS

Após as definições dos itens descritos anteriormente, o estudo da sensibilidade do FS foi feito à medida que fossem variados os parâmetros geotécnicos: coesão, peso específico e ângulo de atrito. A faixa de variação dos parâmetros (P) foram os valores máximos e mínimos, com pontos intercalados neste intervalo, em um intervalo de cinco pontos (Tabela 4).

Tabela 4. Modelo de faixa de variação de parâmetros para avaliação da sensibilidade do FS

P1	P2	P3	P4	P5
γ_{\min}	$\gamma_2 = \gamma_{\min} + (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})/4$	$\gamma_3 = \gamma_2 + (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})/4$	$\gamma_4 = \gamma_3 + (\gamma_{\max} - \gamma_{\min})/4$	γ_{\max}
C_{\min}	$C_2 = C_{\min} + (C_{\max} - C_{\min})/4$	$C_3 = C_2 + (C_{\max} - C_{\min})/4$	$C_4 = C_3 + (C_{\max} - C_{\min})/4$	C_{\max}
ϕ_{\min}	$\phi_2 = \phi_{\min} + (\phi_{\max} - \phi_{\min})/4$	$\phi_3 = \phi_2 + (\phi_{\max} - \phi_{\min})/4$	$\phi_4 = \phi_3 + (\phi_{\max} - \phi_{\min})/4$	ϕ_{\max}

Legenda: γ_{\max} e γ_{\min} = peso específico máximo e mínimo; C_{\max} e C_{\min} = coesão máxima e mínima; ϕ_{\max} e ϕ_{\min} = coesão máxima e mínima

Fonte: Norberto et al. (2020)

Definidas as faixas de variação, a etapa seguinte consiste em testar a variação de cada ponto do intervalo, sempre fixando os demais parâmetros geotécnicos e testando para todos os cinco pontos a variação do FS à medida que se elevasse o nível piezométrico.

A proposta seguinte, consiste em criar cinco superfícies para as duas geometrias utilizadas, correspondendo a cada ponto da faixa de variação de sensibilidade uma superfície que apresente o comportamento do FS de forma tridimensional na variação a proposta, para os parâmetros: NA, C, γ e ϕ (Figura 2).

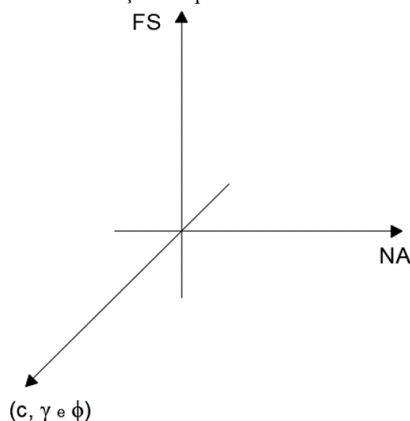
Além disso, procura-se verificar os graus de correlação das faixas de variações dos parâmetros e se é possível identificar alguns intervalos de confiança de parâmetros que assegurem valores de FS acima dos mínimos estabelecidos por normas.

Sendo a correlação entre duas variáveis quaisquer expressas pela Equação 2.

$$\rho(x, y) = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i * y_i)] - n * (\bar{x} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (Eq. 2)$$

Onde: $\rho(x, y)$ = correlação entre variáveis; \bar{x} = média aritmética da variável x; x_i = valor da variável na observação i; \bar{y} = média aritmética da variável y; y_i = valor da variável na observação i; n = número de observações

Figura 2. Modelo de dos eixos tridimensionais da avaliação da sensibilidade do FS à variação dos parâmetros



Legenda: FS = Fator de Segurança; NA = Nível de Água; c = coesão; ϕ = ângulo de atrito; γ = peso específico

Fonte: Norberto et al. (2020)

Resultados e Discussões

No total foram realizadas 360 modelagens de estabilidade de talude no software GeoSlope. As quais foram utilizadas na avaliação da sensibilidade do FS à variação combinada dos parâmetros, por meio de análises gráficas e de coeficientes de correlação.

Realizou-se as avaliações de sensibilidade do FS para as geometrias 1V:1H e 1V:3H e, ao fim de cada item analisado se compôs uma tabela comparativa entre todas as geometrias.

Sensibilidade do FS à variação: NA x γ

A primeira avaliação de sensibilidade do FS, por meio de modelagens de estabilidade com variações combinadas entre parâmetros, foi entre o nível de água e o peso específico do aterro de RSU. É importante destacar que os demais parâmetros necessários para a análise no software foram fixados, tendo em vista que eles não serão o objeto da análise neste momento. Os valores fixados para coesão e ângulo de atrito foram os parâmetros médios da compilação estatística ($C = 20,00$ kPa e $\phi = 29,00^\circ$).

Os resultados das modelagens para avaliação do FS e correlação para geometria 1V:1H estão apresentados na Tabela 5.

Analisando os resultados da Tabela 5 pode-se observar que o FS tem valores maiores para níveis piezométricos mais baixos e peso específico menores.

Quanto às correlações, nas situações com NA: 0, 1/4 e 1/3 apresentaram comportamento de correlação fortemente negativo, que indica que os parâmetros se correlacionam e caminham em direções opostas, à medida que um aumenta o outro reduz (γ e FS), por disporem de valores bem próximos de 1 e negativos, com exceção do NA=1/3 que obteve um valor de $\rho(x, y)$ de -0,1501.

Tabela 5. Resultado das modelagens para avaliação da sensibilidade do FS à variação: NA x γ – Geometria 1V:1H

NA	γ (kN m ⁻³)					$\rho(x,y)$
	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	
0	1,606	1,367	1,242	1,159	1,102	-0,9600
1/4	1,160	1,054	1,018	0,996	0,953	-0,9533
1/3	0,712	0,850	0,791	0,792	0,713	-0,1501
1/2	0,216	0,251	0,333	0,438	0,501	0,9892
2/3	0,232	0,109	0,226	0,354	0,447	0,8208
3/4	0,242	0,138	0,193	0,342	0,425	0,7806
1	0,101	0,172	0,208	0,281	0,356	0,9942

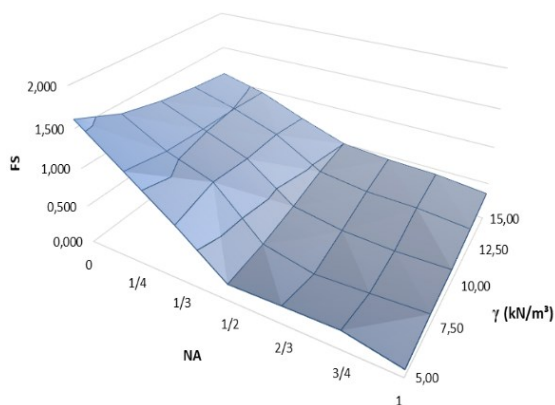
Fonte: Norberto et al. (2020)

Considerando a avaliação nos demais níveis piezométricos, a correlação se mostrou de forma oposta, onde os parâmetros se correlacionam e caminham no mesmo sentido, isto é, à medida que um aumenta o outro também aumenta (γ e FS), por disporem de valores de coeficiente de correlação bem próximos de 1 e positivos.

Desta forma é possível verificar que o FS tende a apresentar valores maiores para pesos específicos menores até um certo nível piezométrico que, para a geometria 1V:1H, foi o nível NA=1/3. Nos níveis piezométricos superiores a 1/3, o comportamento se inverteu e constatou-se que para pesos específicos maiores o FS também resultou em valores maiores.

Com os dados da Tabela 5 formulou-se por meio do software Excel superfícies tridimensionais do comportamento do FS para geometria 1V:1H, o resultado é apresentado na Figura 3.

Figura 3. Superfície da avaliação da sensibilidade do FS à variação: NA x γ – Geometria 1V:1H



Fonte: Norberto et al. (2020)

A superfície da geometria 1V:1H para a variação NA x γ (Figura 3) apresenta uma visualização gráfica do comportamento da relação da variação dos parâmetros, sendo possível constatar graficamente a tendência de valores de FS máximos para o peso específico mínimo (5,00 kN m⁻³).

Na sequência, a Tabela 6 dispõe dos resultados para a geometria 1V:3H.

Tabela 6. Resultado das modelagens para avaliação da sensibilidade do FS à variação: NA x γ – Geometria 1V:3H

NA	γ (kN m ⁻³)					$\rho(x,y)$
	5,00	7,50	10,00	12,50	15,00	
0	3,230	2,830	2,621	2,489	2,398	-0,9571
1/4	1,521	1,544	1,696	1,768	1,801	0,9692
1/3	0,683	0,924	1,243	1,411	1,504	0,9808
1/2	0,312	0,408	0,860	1,090	1,238	0,9792
2/3	0,174	0,271	0,687	0,962	1,138	0,9850
3/4	0,149	0,203	0,614	0,896	1,083	0,9810
1	0,192	0,219	0,475	0,767	0,971	0,9772

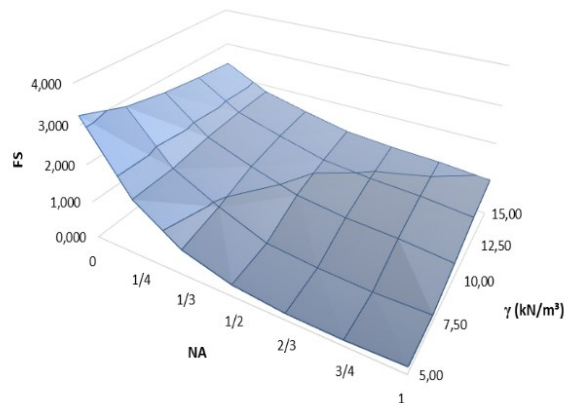
Fonte: Norberto et al. (2020)

Analogamente ao verificado para a geometria 1V:1H, observou-se que o FS tem valores maiores para níveis piezométricos baixos e menores pesos específicos. Quanto às correlações, na situação com NA igual a 0 verificou-se um comportamento de correlação fortemente negativo, que indica que os parâmetros se correlacionam e caminham em direções opostas, à medida que um aumenta o outro reduz (γ e FS), por dispor de valor bem próximo de 1 e negativo. Considerando os demais níveis piezométricos a correlação se mostrou de forma oposta, onde os parâmetros se correlacionam e caminham no mesmo sentido, isto é, à medida que um aumenta o outro também aumenta (γ e FS), por apresentarem coeficientes de correlação bem próximos de 1 e positivos.

Sendo assim, é possível constatar que o FS tende a apresentar valores maiores para o peso específico 5,0 kN m⁻³ com nível piezométrico 0, para a geometria 1V:3H. Nos níveis piezométricos superiores ao nível zero, o comportamento se inverte e observa-se que para pesos específicos maiores, o FS resulta em valores maiores.

Similar à geometria 1V:1H, também foi construída superfícies para a geometria 1V:3H, o resultado é apresentado na Figura 4. Para a superfície resposta da geometria 1V:3H na variação NA x γ (Figura 4), vê-se um comportamento análogo à superfície da geometria 1V:1H, só que com valores superiores, tendo valor de FS máximo de 3,230, sendo cerca de 50% maior ao da superfície da geometria comparada.

Figura 4. Superfície da avaliação da sensibilidade do FS à variação: NA x γ – Geometria 1V:3H



Fonte: Norberto et al. (2020)

A fim de avaliar de forma comparativa os efeitos da variação das geometrias nas análises do FS, resumiu-se na Tabela 7 um comparativo dos valores máximos e mínimos do FS, assim como a combinação dos parâmetros em que ocorreu cada resultado.

Tabela 7. Resumo dos resultados dos FS_{MAX} e FS_{MIN} para as geometrias na avaliação da sensibilidade do FS à variação: NA x γ

Geometria	Situação		FS _{MAX}	Situação		FS _{MIN}
	γ (kN m ⁻³)	NA		γ (kN m ⁻³)	NA	
1V: 1H	5,00	0	1,606	5,00	1	0,101
1V: 3H			3,230			0,192

Fonte: Norberto et al. (2020).

Da Tabela 7 é possível constatar dois importantes resultados a respeito do FS, o primeiro é sobre o FS máximo, o qual para as duas geometrias apresentou maior resultado na situação em que o peso específico foi mínimo e o nível de água também mínimo. A segunda constatação é a respeito do FS mínimo, verificou-se que este ocorre na condição também de peso específico mínimo, mas de nível piezométrico máximo.

De forma geral, nos resultados apresentados nesta etapa pode-se verificar a existência de um ponto em que a mudança do nível piezométrico para cada geometria condiciona uma fase de transição do comportamento do FS, onde até certo ponto o FS se maximiza com o peso específico mínimo (5,00 kN m⁻³), e após este nível piezométrico o FS torna-se maior para pesos específicos maiores (15,00 kN m⁻³).

Nesta análise combinada entre nível de água e peso específico foi possível verificar que o FS tende a apresentar valores maiores para pesos específicos menores até um certo nível piezométrico que, para a geometria 1V:1H, foi o nível NA=1/3.

Sensibilidade do FS à variação: NA x C

Dando seqüências aos resultados, realizou-se a segunda avaliação da sensibilidade do FS entre o nível piezométrico e a coesão de aterros de RSU. Analogamente às outras avaliações, também foram fixados alguns parâmetros geotécnicos no Software e, neste caso, os parâmetros fixados foram o peso específico e o ângulo de atrito. E, de forma similar à avaliação anterior, os valores fixados também foram parâmetros médios da compilação estatística ($\gamma = 11,00$ kN m⁻³ e $\phi = 29,00^\circ$).

Os resultados das modelagens de estabilidade de talude para avaliação do FS e correlação para geometria 1V:1H estão apresentados na Tabela 8.

Para os resultados da Tabela 8, observa-se que o FS tem valores maiores para níveis piezométricos mais baixos e valores de coesão mais altos.

Tabela 8. Resultado das modelagens para avaliação da sensibilidade do FS à variação: NA x c – Geometria 1V:1H

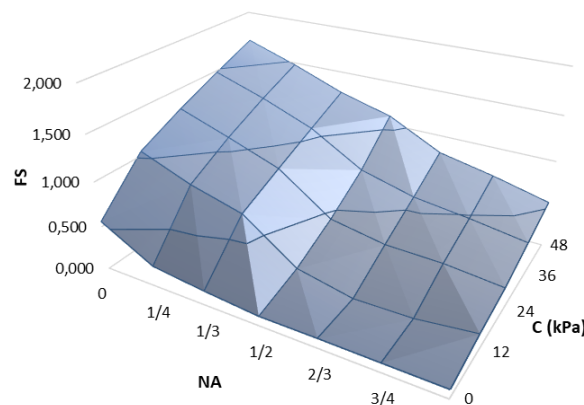
NA	C (kPa)					$\rho(x,y)$
	0,00	12,00	24,00	36,00	48,00	
0	0,556	1,048	1,277	1,480	1,668	0,9757
1/4	0,235	0,828	1,081	1,291	1,476	0,9652
1/3	0,165	0,672	0,873	1,067	1,257	0,9714
1/2	0,110	0,239	0,453	0,721	1,098	0,9825
2/3	0,111	0,109	0,343	0,562	0,799	0,9697
3/4	0,106	0,119	0,328	0,486	0,673	0,9772
1	0,102	0,198	0,266	0,392	0,522	0,9930

Fonte: Norberto et al. (2020)

Quanto às correlações, em todas as situações o comportamento foi similar, com correlação fortemente positiva, que indica que os parâmetros se correlacionam e caminham na mesma direção, à medida que um aumenta o outro também aumenta (C e FS), por disporem de valores bem próximos de 1 e positivos. Com relação ao nível piezométrico, como foi apresentado nos itens anteriores, verifica-se mais uma vez que o aumento dele reduz o FS.

Utilizando os dados da Tabela 8, formulou-se por meio do software Excel superfícies para geometria 1V:1H, o resultado é apresentado na Figura 5.

Figura 5. Superfície da avaliação da sensibilidade do FS a variação: NA x C – Geometria 1V:1H.



Fonte: Norberto et al. (2020)

Para superfície resposta da geometria 1V:1H para a variação NA x C (Figura 5) apresenta uma visualização gráfica do comportamento da relação da variação dos parâmetros, sendo possível visualizar uma tendência de valores de FS para os maiores para valores máximos de coesão e com baixo nível piezométrico. Diferente do que ocorreu na análise da variação do peso específico, nesta situação a variação do FS não se dá de forma tão abrupta.

Na etapa seguinte, a Tabela 9 dispõe os resultados da avaliação da sensibilidade para a geometria (1V:3H).

Similar ao verificado para a geometria (1V:1H) observou-se que o FS tem valores maiores para níveis piezométricos mais baixos e valores de coesão mais altos.

Tabela 9. Resultado das modelagens para avaliação da sensibilidade do FS a variação: NA x C – Geometria 1V:3H

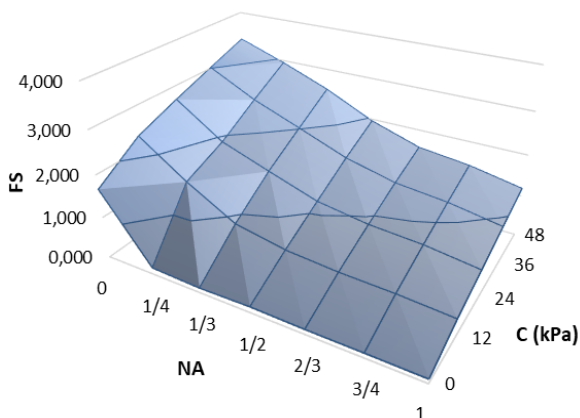
NA	C (kPa)					$\rho(x,y)$
	0,00	12,00	24,00	36,00	48,00	
0	1,665	2,316	2,680	3,013	3,338	0,9874
1/4	0,157	1,544	1,921	2,451	2,944	0,9648
1/3	0,113	0,892	1,513	2,014	2,501	0,9946
1/2	0,141	0,661	1,119	1,566	1,955	0,9987
2/3	0,117	0,565	0,932	1,275	1,569	0,9969
3/4	0,112	0,522	0,848	1,148	1,425	0,9969
1	0,101	0,438	0,683	0,936	1,185	0,9979

Fonte: Norberto et al. (2020)

Para as correlações, em todas as situações o comportamento foi similar, com correlação fortemente positiva, que indica que os parâmetros se correlacionam e caminham na mesma direção, à medida que um aumenta o outro também aumenta (C e FS), por disporem de valores bem próximos de 1 e positivos. Quanto ao nível piezométrico, como foi apresentado nos itens anteriores, verifica-se mais uma vez que o aumento do nível reduz o FS.

De forma análoga ao realizado para a geometria 1V:1H também foi construída superfícies para a geometria 1V:3H, o resultado é apresentado na Figura 6.

Figura 6. Superfície da avaliação da sensibilidade do FS à variação: NA x C – Geometria 1V:3H



Fonte: Norberto et al. (2020)

Para a superfície da geometria 1V:3H na variação NA x C (Figura 6) apresenta um comportamento similar à superfície da geometria (1V:1H), mas apresenta valores de FS superiores, tendo valor de FS máximo de 3,338, acrescido do dobro do valor máximo da geometria 1V:1H.

De forma comparativa, a Tabela 10 dispõe dos valores máximos e mínimos do FS, assim como a combinação dos parâmetros em que ocorreu cada resultado, a fim de estabelecer uma análise comparativa mais refinada.

De acordo com a Tabela 10 é possível constatar que o FS máximo ocorre para as geometrias mais suaves, com o nível piezométrico 0 e coesão máxima de 48,00 kPa.

Tabela 10. Resumo dos resultados dos FS_{MAX} e FS_{MIN} para as geometrias na avaliação da sensibilidade do FS à variação: NA x C

Geometria	Situação		FS _{MAX}	Situação		FS _{MIN}
	c(kPa)	NA		C (kPa)	NA	
1V: 1H	48,00	0	1,668	0,00	1	0,102
1V: 3H			2,944			0,101

Fonte: Norberto et al. (2020)

Quanto ao FS mínimo, a situação se repete em situações de geometrias mais esbeltas (1V:1H), nível piezométrico máximo 1 e coesão mínima de 0,00 kPa.

A correlação linear positiva dos parâmetros reitera tanto a cimentação do solo – presente no RSU – aumentando a coesão, quanto às variações volumétricas da massa de resíduos com o NA.

O aumento do NA, segundo Schuler (2010), em ensaios triaxiais, reduziu a coesão aparente do resíduo. Para isso, apesar da divergência, é importante considerar que essa correlação estatística se aplica para uma faixa de valores aleatórios encontrados pela literatura. Bem como Javankhoshdel e Bathurst (2016) afirmaram que a magnitude dessa probabilidade ainda não foi determinada devido a análise quantitativa limitada dos dados.

Sensibilidade do FS à variação: NA x ϕ

A avaliação de sensibilidade do FS dos resultados a seguir correlaciona o nível de água e ângulo de atrito de aterros de RSU. Mais uma vez foram fixados alguns parâmetros necessários para a análise no Software. Os valores fixados nesta etapa foram coesão e peso específico. Os valores fixados para coesão e ângulo de atrito foram os parâmetros médios da compilação estatística (C = 20,00 kPa e $\gamma = 11,00 \text{ kN m}^{-3}$).

Os resultados das modelagens para avaliação do FS e correlação para geometria (1V:1H) estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Resultado das modelagens para avaliação da sensibilidade do FS a variação: NA x ϕ – Geometria 1V:1H

NA	ϕ (°)					$\rho(x,y)$
	8,00	18,00	28,10	38,10	48,10	
0	0,540	0,849	1,175	1,544	2,021	0,9958
¼	0,495	0,738	0,985	1,291	1,427	0,9951
1/3	0,434	0,608	0,791	1,007	1,162	0,9990
½	0,381	0,399	0,385	0,377	0,395	0,1006
2/3	0,327	0,315	0,285	0,285	0,193	-0,8963
¾	0,283	0,280	0,266	0,220	0,168	-0,9331
1	0,223	0,218	0,224	0,254	0,319	0,8505

Fonte: Norberto et al. (2020)

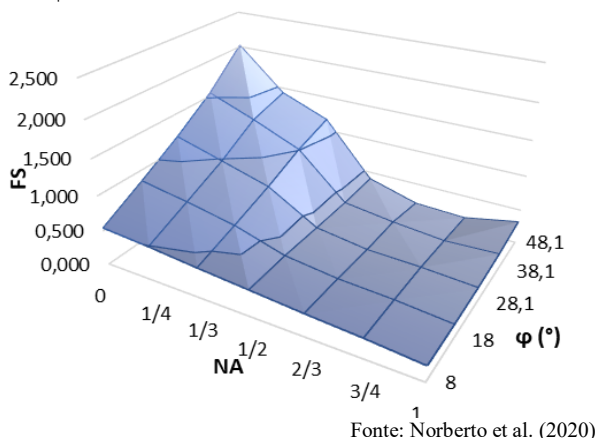
Dos resultados, observa-se que o FS tem valores maiores para níveis piezométricos mais baixos e ângulos de atrito mais elevados. Quanto às correlações, as situações com NA: 0, 1/4, 1/3, 1/2 e 1 apresentaram comportamento de correlação fortemente positivo, indicando que os parâmetros se correlacionam e

convergem – de forma diretamente proporcional (ϕ e FS), por disporem de valores bem próximos de 1 e positivos, com exceção do NA=2/3 e 3/4 que apresentou coeficiente de correlação baixo. Considerando a avaliação nos demais níveis piezométricos, a correlação se mostrou de forma oposta, onde os parâmetros se correlacionam e divergem, isto é, à medida que um aumenta, o outro reduz (ϕ e FS), por disporem de valores bem próximos de 1 e negativos.

Similar ao comportamento ocorrido na avaliação entre NA x γ , para o estudo da avaliação entre ϕ x FS também é possível verificar que o FS tende a resultar em valores maiores para ângulos de atritos maiores, isto é válido para certos níveis piezométricos para a geometria (1V:1H). Nos níveis piezométricos superiores a 2/3, o comportamento se inverteu e constatou-se que para ângulos de atrito menores o FS resultou em valores maiores.

Com os dados da Tabela 11 formulou-se por meio do software Excel a superfície para geometria (1V:1H). O resultado é apresentado na Figura 7.

Figura 7. Superfície da avaliação da sensibilidade do FS à variação: NA x ϕ – Geometria 1V:1H



A superfície da geometria (1V:1H) para a variação NA x ϕ (Figura 7) apresenta uma visualização gráfica do comportamento da relação da variação dos parâmetros, sendo possível constatar graficamente a tendência de valores de pico do FS para o ângulo de atrito máximo (48,1°).

Na Tabela 12 são apresentados os resultados da avaliação de sensibilidade da variação NA x ϕ para a geometria (1V:3H).

Tabela 12. Resultado das modelagens para avaliação da sensibilidade do FS à variação: NA x ϕ – Geometria 1V:3H

NA	ϕ (°)					$\rho(x,y)$
	8,00	18,00	28,10	38,10	48,10	
0	1,049	1,736	2,490	3,369	4,527	0,9941
1/4	1,011	1,388	1,707	1,919	2,073	0,9849
1/3	0,880	1,135	1,312	1,432	1,565	0,9871
1/2	0,706	0,878	0,957	1,051	1,167	0,9911
2/3	0,578	0,717	0,804	0,895	1,005	0,9965
3/4	0,536	0,647	0,735	0,827	0,938	0,999
1	0,463	0,525	0,594	0,682	0,801	0,9905

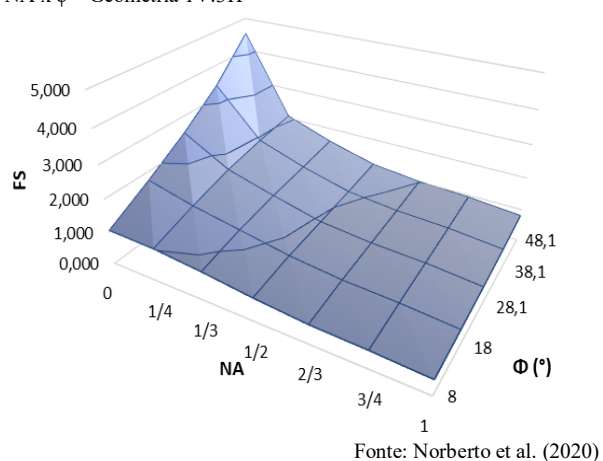
Fonte: Norberto et al. (2020)

De forma análoga ao verificado para geometria 1V:1H, para a geometria 1V:3H observou-se também que o FS tem valores maiores para níveis piezométricos mais baixos e valores de ângulo de atrito mais altos.

Para as correlações, houve um comportamento diferente ao constatado na geometria 1V:1H, para a geometria 1V:3H em todas as situações o comportamento da correlação foi fortemente positivo, indicando que os parâmetros se correlacionam e convergem, à medida que um aumenta o outro também aumenta (ϕ e FS), por disporem de valores bem próximos de 1 e positivos. Quanto ao nível piezométrico, mais uma vez foi verificado que o aumento dele reduz o FS.

Similar à geometria 1V:1H também foi construída a superfície para a geometria 1V:3H, o resultado é apresentado na Figura 8.

Figura 8. Superfície da avaliação da sensibilidade do FS à variação: NA x ϕ – Geometria 1V:3H



Quanto à superfície resposta da geometria 1V:3H na variação NA x ϕ (Figura 8) apresenta um comportamento análogo à superfície resposta da geometria 1V:1H, apesar de ter valores superiores, tendo valor de FS máximo de 4,527, sendo mais que o dobro do valor máximo da superfície 1V:1H, que é de 2,021.

Para efetuar uma avaliação de forma comparativa os efeitos da variação das geometrias nas análises do FS, para os parâmetros NA x ϕ , resumiu-se na Tabela 13 um comparativo dos valores máximos e mínimos do FS, assim como a combinação dos parâmetros em que ocorreu cada resultado.

Tabela 13. Resumo dos resultados dos FS_{MAX} e FS_{MIN} para as geometrias na avaliação da sensibilidade do FS a variação: NA x ϕ

Geometria	Situação		FS _{MAX}	Situação		FS _{MIN}
	ϕ (°)	NA		ϕ (°)	NA	
1V: 1H	48,1	0	2,021	8,00	1	0,223
1V: 3H			4,527			0,463

Fonte: Norberto et al. (2020)

Analisando a Tabela 13 é possível constatar que o FS máximo para as geometrias, ocorreu na situação em que o ângulo de atrito foi máximo e o nível de água mínimo.

A segunda constatação verificada é sobre o FS mínimo, verificou-se que este se dá na condição também de ângulo de atrito é mínimo e de nível piezométrico máximo.

Nesta análise foi possível verificar que o FS tende a resultar em valores maiores para ângulos de atritos maiores e com os menores níveis de água. Resultado já esperado tendo em vista o ângulo de atrito elevado aumenta as condições de resistência ao cisalhamento no solo, da mesma forma que pelo princípio das tensões efetivas indica que a elevação do nível de água no solo reduz a sua resistência ao cisalhamento (TERZAGHI, 1943).

Sensibilidade do FS à variação: $\gamma \times C$

A avaliação da sensibilidade do FS de aterros de RSU seguinte é entre dois parâmetros geotécnicos, são eles: peso específico e coesão. Mais uma vez é importante destacar que os demais parâmetros necessários para a análise no software foram fixados, tendo em vista que os mesmos não serão o objetivo da análise neste momento. O valor fixado para ângulo de atrito foi o valor médio da compilação estatística, $\phi = 29,00^\circ$ e o nível piezométrico fixado foi de $NA=0$, para evitar que ele influencie na análise.

Os resultados das modelagens para avaliação do FS e correlação para geometria (1V:1H) estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Resultado das modelagens para avaliação da sensibilidade do FS a variação: $\gamma \times c$ – Geometria 1V:1H

γ (kN m^{-3})	C (kPa)					$\rho(x,y)$
	0,00	12,00	24,00	36,00	48,00	
5,00	0,556	1,317	1,742	2,133	2,513	0,9875
7,50	0,556	1,159	1,467	1,742	2,007	0,9820
10,00	0,556	1,073	1,317	1,539	1,742	0,9775
12,50	0,556	1,017	1,226	1,407	1,579	0,9735
15,00	0,556	0,980	1,159	1,317	1,467	0,9699

Fonte: Norberto et al. (2020)

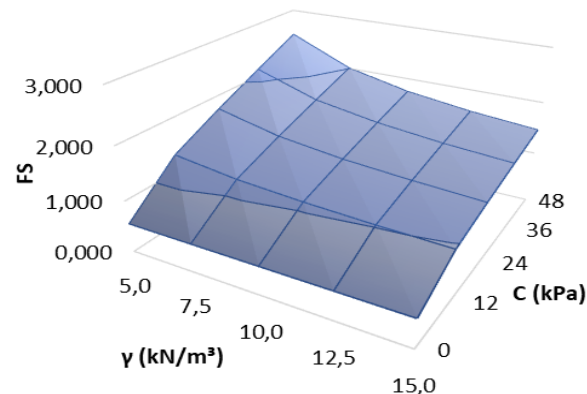
Para as correlações, houve um comportamento de correlação fortemente positivo, que indica que os parâmetros se correlacionam e convergem, à medida que um aumenta o outro também aumenta (γ e C), por disporem de valores bem próximos de 1 e positivos.

A Figura 9 dispõe do resultado da superfície para a geometria 1V:1H.

Dos resultados da variação $\gamma \times C$ para o FS, constatou-se alguns comportamentos diferentes dos apresentados anteriormente. O primeiro foi que o valor do FS para a coesão 0 foi o mesmo para todos os pesos específicos, uma explicação deve-se ao fato de que a cunha de ruptura de todos os casos foi bem superficial.

Outro comportamento notado foi que alguns valores de FS coincidiram em combinações diferentes de $\gamma \times C$, tais resultados foram marcados com cores iguais na Tabela 14.

Figura 9. Superfície da avaliação da sensibilidade do FS à variação: $\gamma \times C$ – Geometria 1V:1H.



Fonte: Norberto et al. (2020)

Para a superfície da geometria 1V:1H para a variação $NA \times \gamma$ (Figura 9) verificou-se que a variação dos parâmetros não funciona de forma tão oscilatória como nas análises anteriores, é fácil constatar isso pela superfície pouco sinuosa.

Na sequência, a Tabela 15 dispõe dos resultados para a geometria 1V:3H.

Tabela 15. Resultado das modelagens para avaliação da sensibilidade do FS a variação: $\gamma \times C$ – Geometria 1V:3H

γ (kN m^{-3})	C (kPa)					$\rho(x,y)$
	0,00	12,00	24,00	36,00	48,00	
5,00	1,665	2,751	3,463	4,144	4,807	0,9942
7,50	1,665	2,489	2,992	3,463	3,920	0,9914
10,00	1,665	2,353	2,751	3,111	3,463	0,9884
12,50	1,665	2,271	2,595	2,896	3,182	0,9856
15,00	1,665	2,216	2,489	2,751	2,992	0,9827

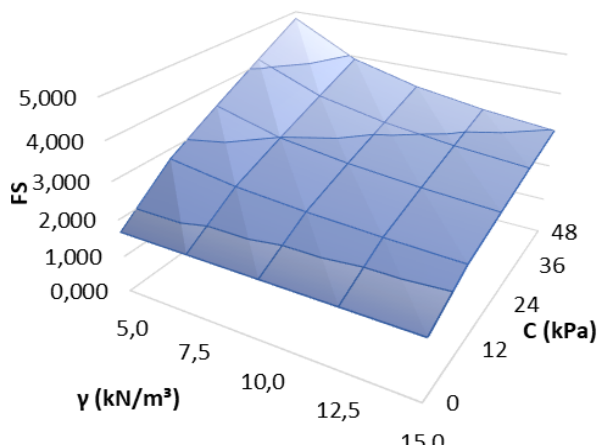
Fonte: Norberto et al. (2020)

De forma similar ao ocorrido na geometria 1V:1H, foi verificado mais uma vez um comportamento diferente dos resultados, comparado aos de outras análises. Outra vez os valores do FS para a coesão 0 foi o mesmo para todos os pesos específicos, neste caso também houve a ocorrência de cunhas de ruptura superficiais. Outro comportamento notado foi que alguns valores de FS coincidiram em combinações diferente de $\gamma \times c$, tais resultados foram marcados com cores iguais na Tabela 15.

Quanto às correlações, de forma equivalente ao ocorrido na geometria 1V:1H, também ocorreu um comportamento de correlação fortemente positivo, que indica que os parâmetros se correlacionam e convergem, à medida que um aumenta o outro também aumenta (γ e C), por disporem de valores bem próximos de 1 e positivos.

De forma análoga à geometria 1V:1H, formulou-se por meio do software Excel a superfície para a geometria 1V:3H. O resultado é apresentado na Figura 10.

Figura 10. Superfície da avaliação da sensibilidade do FS à variação: $\gamma \times C$ – Geometria 1V:3H



Fonte: Norberto et al. (2020)

Para a superfície da geometria 1V:3H para a variação $\gamma \times C$ (Figura 12) verificou-se que a variação dos parâmetros não ocorre de forma tão oscilatória como nas análises anteriores, é fácil constatar isso graficamente.

A Tabela 16 resume um comparativo dos resultados dos valores máximos e mínimos do FS, assim como a combinação dos parâmetros em que ocorreu cada resultado.

Tabela 16. Resumo dos resultados dos FS_{MAX} e FS_{MIN} para as geometrias na avaliação da sensibilidade do FS a variação: $\gamma \times C$

Geometria	Situação		FS _{MAX}	Situação		FS _{MIN}
	γ (kN m ⁻³)	C (kPa)		γ (kN m ⁻³)	C (kPa)	
1V: 1H	5,00	48,00	2,513	Qualquer	0,00	0,556
1V: 3H			4,807			1,665

Fonte: Norberto et al. (2020)

Do resumo da Tabela 16, é possível constatar que o FS máximo ocorre em todas as geometrias na situação em que o peso específico é mínimo e a coesão é máxima. O FS mínimo, verificou-se o mesmo ocorre para qualquer valor de peso específico com coesão 0, o que há em comum nesses resultados é a cunha de ruptura superficial, sendo essa a provável explicação para tal comportamento.

Para análise paramétrica desses parâmetros foi verificado que o aumento de ambos resultou no aumento do FS, indicando uma correlação positiva desses parâmetros.

Sensibilidade do FS à variação: $\gamma \times \phi$

A avaliação da sensibilidade do FS seguinte é também entre dois parâmetros geotécnicos, são eles: peso específico e ângulo de atrito. Novamente é importante ressaltar que os demais parâmetros necessários para a análise no software foram fixados. O valor fixado para ângulo de atrito foi o valor médio da compilação estatística, $C = 19,00$ kPa e o nível piezométrico fixado foi novamente de: $NA=0$.

Os resultados das modelagens para avaliação do FS e correlação para geometria 1V:1H estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Resultado das modelagens para avaliação da sensibilidade do FS a variação: $\gamma \times \phi$ – Geometria 1V:1H

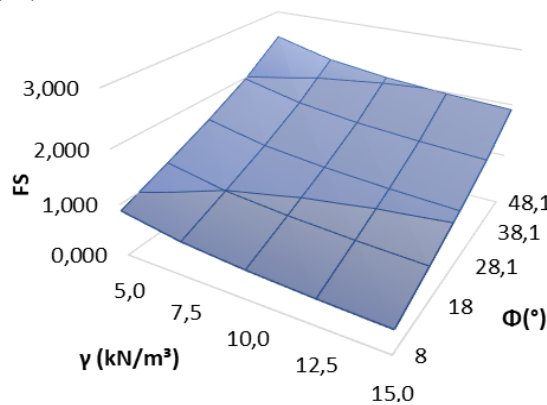
γ (kN m ⁻³)	ϕ (°)					$\rho(x,y)$
	8,00	18,00	28,10	38,10	48,10	
5,00	0,875	1,215	1,572	1,976	2,494	0,996
7,50	0,673	0,996	1,335	1,725	2,213	0,9961
10,00	0,569	0,883	1,211	1,583	2,063	0,9959
12,50	0,505	0,808	1,129	1,496	1,970	0,9955
15,00	0,462	0,758	1,072	1,434	1,904	0,9952

Fonte: Norberto et al. (2020)

Para os resultados da Tabela 17, observa-se que o FS tem valores maiores para pesos específicos mais baixos e valores de ângulo de atrito mais altos. Quanto às correlações, em todas as situações o comportamento foi similar, com correlação fortemente positiva.

Com os dados da Tabela 17 formulou-se por meio do software Excel a superfície para geometria 1V:1H, onde o resultado é apresentado na Figura 11.

Figura 11. Superfície da avaliação da sensibilidade do FS à variação: $\gamma \times \phi$ – Geometria 1V:1H



Fonte: Norberto et al. (2020)

Para superfície resposta da geometria 1V:1H para a variação $\gamma \times \phi$ (Figura 11) apresenta uma visualização gráfica do comportamento da relação da variação dos parâmetros, sendo possível visualizar curvas de níveis bem uniformes, diferente das outras quatro superfícies respostas avaliadas anteriormente. Quanto ao gráfico de contorno também apresentou curvas de nível das zonas de variação do FS bem uniformes. Dando sequência aos resultados, na Tabela 18 são apresentados os resultados para a geometria 1V:3H. Similar aos resultados para a geometria 1V:1H, o FS apresentou valores maiores para pesos específicos mais baixos e valores de ângulo de atrito mais altos. Para as correlações, em todas as situações o comportamento foi similar, com correlação fortemente positiva, por disporem de valores de $\rho(x,y)$ bem próximos de 1 e positivos.

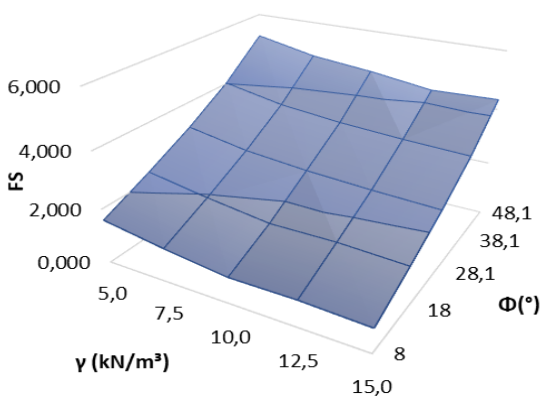
Tabela 18. Resultado das modelagens para avaliação da sensibilidade do FS à variação: $\gamma \times \phi$ – Geometria 1V:3H

γ (kN m ⁻³)	ϕ (°)					$\rho(x,y)$
	8,00	18,00	28,10	38,10	48,10	
5,00	1,592	2,311	3,095	4,015	5,199	0,9946
7,50	1,246	1,949	2,718	3,612	4,772	0,9946
10,00	0,966	1,648	2,516	3,397	4,555	0,9956
12,50	0,983	1,667	2,391	3,267	4,260	0,9967
15,00	0,893	1,567	2,304	3,181	4,339	0,9936

Fonte: Norberto et al. (2020)

Na Figura 12 é apresentada a superfície para a geometria 1V:3H.

Figura 12. Superfície da avaliação da sensibilidade do FS à variação: $\gamma \times \phi$ – Geometria 1V:3H



Fonte: Norberto et al. (2020)

Para a geometria 1V:3H a variação $\gamma \times \phi$ (Figura 12) apresentou comportamento análogo à geometria 1V:1H, mas com valores de FS bem maiores quando comparados.

Na Tabela 19, é apresentado um resumo do comparativo dos resultados dos valores máximos e mínimos do FS, assim como a combinação dos parâmetros geotécnicos em que ocorreu cada resultado.

Tabela 19. Resumo dos resultados dos FSMAX e FSMIN para as geometrias na avaliação da sensibilidade do FS à variação: $\gamma \times \phi$

Geometria	Situação		FS _{MAX}	Situação		FS _{MIN}
	γ (kN m ⁻³)	ϕ (°)		γ (kN m ⁻³)	ϕ (°)	
1V: 1H	5,00	48,10	2,494	15,00	8,00	0,462
1V: 3H			5,199			0,893

Fonte: Norberto et al. (2020)

Da Tabela resumo é possível verificar que o FS máximo ocorre em todas as geometrias na situação em que o peso específico é mínimo e o ângulo de atrito é máximo. No caso do FS mínimo, verificou-se que o mesmo ocorre para peso específico máximo e com ângulo de atrito mínimo.

Considerando os resultados obtidos e apesar da heterogeneidade da massa de resíduos sólidos, a correlação linear positiva entre os parâmetros mostrou-se coerente com o comportamento de solos de características semelhantes.

Segundo Javankhoshdel e Bathurst (2016), para declives simples, a correlação cruzada entre valores aleatórios de propriedades do solo pode reduzir a probabilidade de falha da encosta analisada.

E, apesar das avaliações incluírem valores práticos e aleatórios, percebe-se uma convergência que, ainda que conservadora para alguns, aponta para a segurança do talude.

Sensibilidade do FS à variação: C x ϕ

A última avaliação de sensibilidade do FS realizada foi entre a coesão e ângulo de atrito de aterros de RSU. Destacando mais uma vez que os demais parâmetros necessários para a análise no software foram fixados.

O valor fixado para o peso específico foi o valor médio da compilação estatística, $\gamma = 11,00 \text{ kN m}^{-3}$ e o nível piezométrico fixado foi novamente de: NA=0. Os resultados das modelagens para avaliação do FS e correlação para geometria 1V:1H estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20. Resultado das modelagens para avaliação da sensibilidade do FS a variação: $\phi \times C$ – Geometria 1V:1H

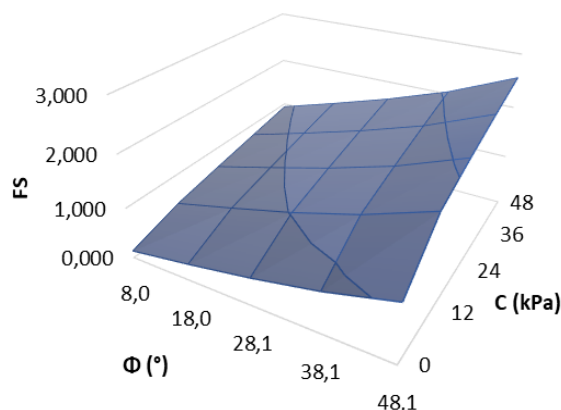
ϕ (°)	C (kPa)					$\rho(x,y)$
	0,00	12,00	24,00	36,00	48,00	
8,00	0,422	0,842	1,150	1,448	1,747	0,9972
18,00	0,976	1,510	1,845	2,162	2,469	0,9926
28,10	1,604	2,244	2,608	2,938	3,261	0,9878
38,10	2,356	3,121	3,493	3,852	4,183	0,982
48,10	3,349	4,279	4,652	5,024	5,381	0,9734

Fonte: Norberto et al. (2020)

Analisando os resultados da Tabela 20, observa-se que o FS tem valores maiores para valores mais altos de ambos os parâmetros analisados. Quanto às correlações, em todas as situações o comportamento foi similar, com correlação fortemente positiva.

A partir dos dados da Tabela 20 formulou-se a superfície tridimensional para a geometria 1V:1H (Figura 13).

Figura 13. Superfície da avaliação da sensibilidade do FS à variação: $\phi \times C$ – Geometria 1V:1H.



Fonte: Norberto et al. (2020)

Para superfície resposta da geometria 1V:1H para a variação $\phi \times C$ (Figura 13) apresenta uma visualização gráfica do comportamento da relação da variação dos parâmetros, demonstrou uniformidade da variação dos parâmetros como ocorrido na análise da variação: $\gamma \times \phi$. Para ao gráfico de contorno também apresentou curvas de nível das zonas de variação do FS bem uniformes, com predominância de 90% dos valores nas faixas de variação do FS de 0-1,0 e 1,0-2,0.

Na sequência dos resultados, a Tabela 21 dispõe dos resultados para a geometria 1V:3H.

Tabela 21. Resultado das modelagens para avaliação da sensibilidade do FS à variação: $\phi \times C$ – Geometria 1V:3H

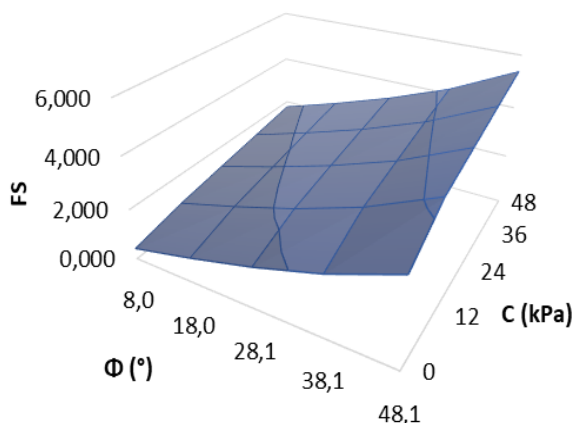
ϕ (°)	C (kPa)					$\rho(x,y)$
	0,00	12,00	24,00	36,00	48,00	
8,00	0,140	0,420	0,597	0,765	0,930	0,9931
18,00	0,326	0,712	0,914	1,099	1,273	0,9838
28,10	0,536	1,018	1,245	1,448	1,634	0,9766
38,10	0,787	1,378	1,622	1,841	2,044	0,9687
48,10	1,118	1,834	2,105	2,343	2,562	0,9609

Fonte: Norberto et al. (2020)

Analogamente aos resultados para a geometria 1V:1H, o FS apresentou valores maiores para os valores máximos de coesão e ângulo de atrito. Para as correlações, em todas as situações o comportamento foi similar, com correlação fortemente positiva, que indica que os parâmetros se correlacionam e convergem, à medida que um aumenta o outro também aumenta (C e ϕ), por disporem de valores bem próximos de 1 e positivos.

Similar à geometria 1V:1H também foi construída superfície para geometria 1V:3H (Figura 14).

Figura 14. Superfície da avaliação da sensibilidade do FS à variação: $\phi \times C$ – Geometria 1V:3H.



Fonte: Norberto et al. (2020)

Quanto à superfície resposta da geometria 1V:3H para a variação $\phi \times C$ (Figura 14), apresenta-se uma visualização gráfica do comportamento da relação da variação dos parâmetros, demonstrando um resultado similar ao da geometria 1V:1H, mas com valores de FS bem superiores.

A Tabela 22 apresenta um comparativo dos valores máximos e mínimos do FS, assim como a combinação dos parâmetros em que ocorreu cada resultado.

Tabela 22. Resumo dos resultados dos FS_{MAX} e FS_{MIN} para as geometrias na avaliação da sensibilidade do FS a variação: $\gamma \times \phi$

Geometria	Situação		FS_{MAX}	Situação		FS_{MIN}
	ϕ (°)	C (kPa)		ϕ (°)	C (kPa)	
1V: 1H	48,10	48,00	2,562	8,00	0,00	0,140
1V: 3H			5,381			0,422

Fonte: Norberto et al. (2020)

Analisando os resultados da Tabela 22, é possível verificar que o FS máximo ocorre em todas as geometrias na situação em que ambos os parâmetros são máximos. Considerando o caso do FS mínimo, verificou-se o mesmo ocorre quando ambos os parâmetros são mínimos.

Para esses parâmetros, os resultados apontaram para uma correlação cruzada forte e positiva, aproximando-se de 1 (um). O resultado foi coerente com a Mecânica do Solos, na conhecida equação da resistência ao cisalhamento. De acordo com Oguz et al. (2017), os parâmetros C e ϕ apontam uma queda da probabilidade de falha para uma faixa de valores que possuem o FS maior do que 1. Consequentemente, vê-se que os valores ilustrados na Figura 13 e 14 reiteram os autores citados, fundamentando a convergência estatística com maiores valores de FS onde os dados tiveram $\rho(x,y)$ próximos de 1 (um).

Os resultados encontrados por Aladejare e Wang (2017), utilizando a abordagem Bayesiana, em propriedades de rochas, reiteram a confiabilidade na correlação dos dados. Assim como na estabilidade de taludes, Aladejare e Wang (2017) também afirmam que o estudo da correlação impacta diretamente na segurança da estrutura do maciço.

Quanto à variação do fator de segurança (FS), os resultados de Varkey et al. (2018) mostraram que a correlação cruzada positiva tende a uma melhor confiabilidade do talude enquanto as correlações negativas demonstraram menores fatores de segurança, fora da faixa normatizada. E, os valores encontrados nas Tabelas 20 e 21 apresentam comportamento semelhante. Quanto mais o $\rho(x,y)$ é próximo de 1, os fatores de segurança tendem a valores menores do que quando o $\rho(x,y)$ diminuía, afastando-se de 1.

Conclusão

Nos diversos cenários analisados quanto à sensibilidade do FS da estabilidade de taludes de aterros sanitários, constatou-se que a oscilação de alguns parâmetros pode acarretar riscos de ruptura da estrutura.

Considerando a sensibilidade do FS à variação dos parâmetros, verificou-se que as geometrias menos esbeltas (1V:3H) dispõem de maiores valores de FS em todas as combinações, comparadas as geometrias mais

íngremes (1V:1H), em alguns cenários com uma redução de 50% do FS para as geometrias mais íngremes.

Nas análises combinadas entre parâmetros, na combinação entre peso específico e nível piezométrico verificou-se que para cada geometria avaliada, há um nível piezométrico de transição da combinação destes parâmetros, para o qual acima deste nível, valores de peso específico mais elevados maximizam o FS e abaixo do mesmo ocorre o inverso.

É possível afirmar que o nível piezométrico é o parâmetro responsável pelos maiores casos de oscilação do FS, em diversos cenários com NA acima de 1/3 da altura do aterro o FS apresentou valores inferiores a 1, representando uma situação de ruptura.

De forma geral, é possível afirmar que o controle das condições físicas e geotécnicas de aterros sanitários, é um importante mecanismo de gestão de risco de possíveis rupturas dessas estruturas. Usar metodologias de controle e avaliação da sensibilidade dos parâmetros, as quais tem elevada influência no comportamento mecânico dos aterros, torna-se uma excelente ferramenta para evitar rupturas destas estruturas. De modo que as respostas para eventuais problemas in loco possam ser efetuadas previamente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro em suas pesquisas.

Contribuição dos autores

Os autores desse artigo declaram que contribuíram de forma igualitária na sua elaboração.

Referências

ABREU, A. E. S.; VILAR, O. M. Influence of composition and degradation on the shear strength of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 68, ed. 10, p. 263-274, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.038>

ALADEJARE, A. E.; WANG, Y. Influence of rock property correlation on reliability analysis of rock slope stability: From property characterization to reliability analysis. 2017. **Geoscience Frontiers**, v. 9, p. 1639-1648, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.10.003>

BABU, G. S.; REDDY, K. R.; SRIVASTAVA, A. Influence of spatially variable geotechnical properties of MSW on stability of landfill slopes. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 18, ed. 1, p. 27-37, 2014. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HZ.2153-5515.0000177>

BENVENUTO, M. 2016. Recuperação e adequação de escorregamentos de aterros sanitários. Workshop – Resíduos Urbanos, Desafios para a administração pública. São José dos Campos, RJ. Disponível em: <http://www.ablp.org.br/pdf/Clovis-Benvenuto.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2021.

BORGATTO, A. V. A. 2010. **Estudo das Propriedades Geomecânicas de Resíduos Sólidos Urbanos Pré-Tratados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

COSSU, R.; Stegmann, R. 2018. Solid Waste Landfilling: Concepts, Processes, Technology. **Elsevier**. 1175p.

DANG, M.; CHAI, J.; XU, Z.; QIN, Y.; CAO, J.; LIU, F. Soil water characteristic curve test and saturated-unsaturated seepage analysis in Jiangcunqou municipal solid waste landfill, China. **Engineering Geology**, v. 264, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105374>

GOMES, C.; LOPES, M. L.; VENDA OLIVEIRA, P. J. Municipal solid waste shear strength parameters defined through laboratorial and in situ tests. **J. Air Waste Manage. Assoc.**, v. 63, ed. 11, p. 1352-1368, 2013. [https://doi.org/10.1016/S0959-8049\(13\)70064-9](https://doi.org/10.1016/S0959-8049(13)70064-9)

HONG-JUN, S.; YAN-CHAO, F.; LI-HONG, Z. Sensitivity Analysis on Stability Parameters in Landfill. **The Open Construction and Building Technology Journal**, v. 9, ed. 1, p. 108-111. 2015.

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. <https://doi.org/10.1177/0734242X18757628>

JAVANKHOSHDEL, S.; BATHURST, R. J. Influence of cross correlation between soil parameters on probability of failure of simple cohesive and c-φ slopes. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 53, ed. 5, p. 839-853, 2016. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0109>

LOPES, M. L.; GOMES, C. C. 2013. Geotechnical landfill monitoring - adaptations needed. ICE Publishing: **Environmental Geotechnics**, v. 2, ed. 1, p. 8-17 <https://doi.org/10.1680/envgeo.13.00014>

LÜ, X.; XUE, D.; Huang, M.; Lim, K. W. A shear hardening plasticity model with nonlinear shear strength criterion for municipal solid waste. **Computers and Geotechnics**, v. 104, p. 207-215, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.08.019>

NORBERTO, A. S.; CORRÊA, C. L.; MARIANO, M. O. H.; JUCÁ, J. F. T. Análise estatística da variabilidade de parâmetros de resistência ao cisalhamento de aterros sanitários. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, ed. 1, p. 108-116, 2020. <https://doi.org/10.24221/jeap.5.1.2020.2840.108-116>

OGUZ, E. A.; YALCIN, Y.; HUVAJ, N. Probabilistic Slope Stability Analyses: Effects of the Coefficient of Variation and the Cross-Correlation of Shear Strength Parameters. **Geotechnical Frontiers**, p. 367-371, 2017. <https://doi.org/10.1061/9780784480458.036>

PETROVIC, I.; HIP, I.; FREDLUND, M. D. Application of continuous normal-lognormal bivariate density functions in a sensitivity analysis of municipal solid waste landfill. **Waste Management**, v. 55, p. 141-153, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.021>

RAMAIAH, B. J.; RAMANA, G. V.; DATTA, M. Mechanical characterization of municipal solid waste from two waste dumps at Delhi, India. **Waste Management**, v. 68, ed. 10, p. 275-291, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.055>

REDDY, K.R.; HETTIARACHCHI, H.; GANGATHULASI, J.; BOGNER, J.E.; LAGIER, T. Geotechnical properties of synthetic municipal solid waste. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 3, ed. 3, p. 429-438, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.002>

REMÉDIO, F. H. 2014. **Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com Nspt**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2014.

SCHULER, A. R. 2010. **Análise do comportamento de um aterro municipal de resíduos sólidos urbanos instrumentado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

STRAUSS, M. 1998. **Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

TERZAGHI, K. 1943. **Theoretical Soil Mechanics**, John Wiley and Sons, New York. 510p.

VARKEY, D.; HICKS, M. A; VARDON, P. J. 3D slope stability analysis with spatially variable and cross-correlated shear strength parameters. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON NUMERICAL METHODS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING*, 9., 2018, Porto. **Proceedings** [...] p. 543-548.

ZEKKOS, D.; ATHANASOPOULOS, G.A.; BRAY, J.D.; GRIZI, A.; THEODORATOS, A. Largescale direct shear testing of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 30, ed. 8-9, p. 1544-1555, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.024>