

## Perspectiva Probabilística Em Aterros Sanitários Diante De Trincas E Variações Hidrogeológicas

José Leonardo dos Santos

Estudante de Graduação, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, js6400@hotmail.com

Leonardo Alberto do Nascimento

Estudante de Pós-Graduação, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, leo\_ladn@yahoo.com.br

Patricia Rodrigues Falcão

Estudante de Pós-Graduação, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, falcao.rodrigues.patricia@gmail.com

Rinaldo José Barbosa Pinheiro

Docente, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, rinaldo@ufsm.br

Magnos Baroni

Docente, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, magnos.baroni@gmail.com

**RESUMO:** Os resíduos sólidos originários de atividades domésticas e de limpeza urbana requerem correta destinação, normalmente ocorrendo a deposição dos mesmos em aterros sanitários. A confiabilidade de tais aterros sanitários deve ser alcançada através do constante monitoramento geotécnico e ambiental, para tal, possíveis trincas devem ser levadas em consideração durante a análise de estabilidade. O presente artigo busca avaliar o efeito de tais trincas frente a diferentes condições hidrogeológicas, onde com o uso do software Slide2, aplicou-se o método de Morgenstern-Price, e utilizando-se de parâmetros geotécnicos encontrados na literatura, foi possível estimar um fator de segurança para o talude através de uma análise probabilística. As análises indicaram uma influência negativa no fator de segurança com a presença de trincas de baixa inclinação ( $0^\circ$  a  $20^\circ$ ) se encontrando próximas à crista do talude, uma pequena diminuição do fator de segurança com trincas de  $30^\circ$  de inclinação, e por fim, uma menor variação no fator de segurança quando analisadas trincas de maior inclinação ( $40^\circ$  a  $60^\circ$ ). Considerando que alguns casos apresentaram fator de segurança menor que o normatizado (1,5), ressalta-se a importância do monitoramento contínuo em aterros sanitários e a consideração de trincas nas análises de estabilidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise de Estabilidade, Trincas de Tração, Abordagem Probabilística, Aterros Sanitários.

**ABSTRACT:** The disposal of solid waste originating from domestic and urban cleaning activities is a significant issue that requires proper management. Such waste is typically disposed of in landfills, which must be monitored to ensure their reliability. During the stability analysis of these landfills, it is essential to consider the potential impact of cracks, which can occur under different conditions. This paper aims to evaluate the effect of such cracks on landfill stability. The Morgenstern-Price method was applied using the Slide2 software, and a safety factor for the slope was estimated through a probabilistic analysis using geotechnical parameters found in the literature. The analyses indicated that the factor of safety was negatively influenced by the presence of low inclination cracks ( $0^\circ$  to  $20^\circ$ ) near the crest of the slope. However, a small decrease in the factor of safety was observed with  $30^\circ$  inclination cracks. Furthermore, the factor of safety exhibited a smaller variation when analyzing higher inclination cracks ( $40^\circ$  to  $60^\circ$ ). It is evident that in certain instances, the safety factor was found to be below the standard value of 1.5. This highlights the necessity for continuous monitoring of landfills and the incorporation of crack analysis in stability assessments.

**KEYWORDS:** Stability Analysis, Tension Cracks, Probabilistic Approach, Sanitary Landfills.

## 1 INTRODUÇÃO

Diante dos resíduos produzidos pela atividade antrópica, existem classificações estabelecidas pela legislação nacional. Os resíduos sólidos urbanos (RSU), originários de atividades domésticas e de limpeza urbana, são classificados como inertes e de baixa periculosidade conforme a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305, 2010). Esses normalmente são acondicionados em aterros sanitários (AS), cujo projeto deve seguir as diretrizes da NBR 8419 (ABNT, 1992), garantindo estabilidade e segurança ambiental.

Os AS operam em várias etapas, que incluem a preparação da área para a deposição de resíduos, as frentes de trabalho onde os materiais são depositados, áreas já preenchidas e seu monitoramento contínuo (Lange et al., 2008). Essa operação contínua assegura a estabilidade do aterro, comumente analisada pelo método de equilíbrio limite (MEL), como descrito por Boscov (2008). Neste método, a superfície de ruptura é segmentada em fatias, onde em cada fatia é realizado o equilíbrio das forças atuantes, e com este equilíbrio de forças, realiza-se o cálculo do equilíbrio do conjunto (Gerscovich, 2012). De forma que o FS requerido segundo a NBR 11682 para aterros sanitários deve ser superior a 1,5 (ABNT, 2009).

Com a natural presença de água no maciço, que pode contribuir para a movimentação de material, elevação da poropressão e redução do atrito entre as partículas, além da atuação de tensões internas e externas presentes em um talude, cria-se um cenário propenso ao surgimento de trincas devido a tensão (Verma et al. 2013). O surgimento de tais trincas pode se relacionar com uma má drenagem, fator que gera o acúmulo de líquido e o aparecimento de bolsões de gases provenientes das reações que ocorrem em um aterro sanitário. Assim sendo, para uma correta estimativa do FS, é relevante a consideração de tais trincas, visto que estas geram alteração da forma de ruptura do maciço, levando a uma alteração de comportamento do material que ocorre de diferentes maneiras frente a distintos parâmetros geotécnicos, afetando a tensão resistida e a segurança da operação como um todo (Kaniraj & Abdullah, 1993).

Através do proposto, o presente artigo busca realizar uma análise probabilística de estabilidade de uma seção típica de um aterro sanitário, levando em consideração a variação da poropressão, parâmetros geotécnicos do RSU e suas interações com a presença de trincas com diferentes ângulos e distâncias da crista do talude, de forma a avaliar sua influência no fator de segurança do maciço sanitário através do software Slide2.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente seção visa apresentar e localizar o aterro sanitário do qual foi retirado o corte para a realização do presente estudo, bem como contextualizar os parâmetros geotécnicos utilizados, os métodos e as especificidades que foram usadas para a análise da estabilidade de um maciço de resíduos com a consideração da presença de trincas de tração e variação estatísticas dos parâmetros geotécnicos dos materiais envolvidos.

### 2.1 Aterro Sanitário Analisado

O Aterro sanitário analisado faz parte da Central de Tratamento de Resíduos da Caturrita, pertencente à Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR), localizado na cidade de Santa Maria/RS. Tal aterro conta com oito fases de implantação, de forma que os resíduos são locados em diferentes datas e locais. Para o presente trabalho, foi utilizado um corte localizado na porção oeste do AS. A seção utilizada neste trabalho pode ser visualizada com a denominação MS17 na Figura 1

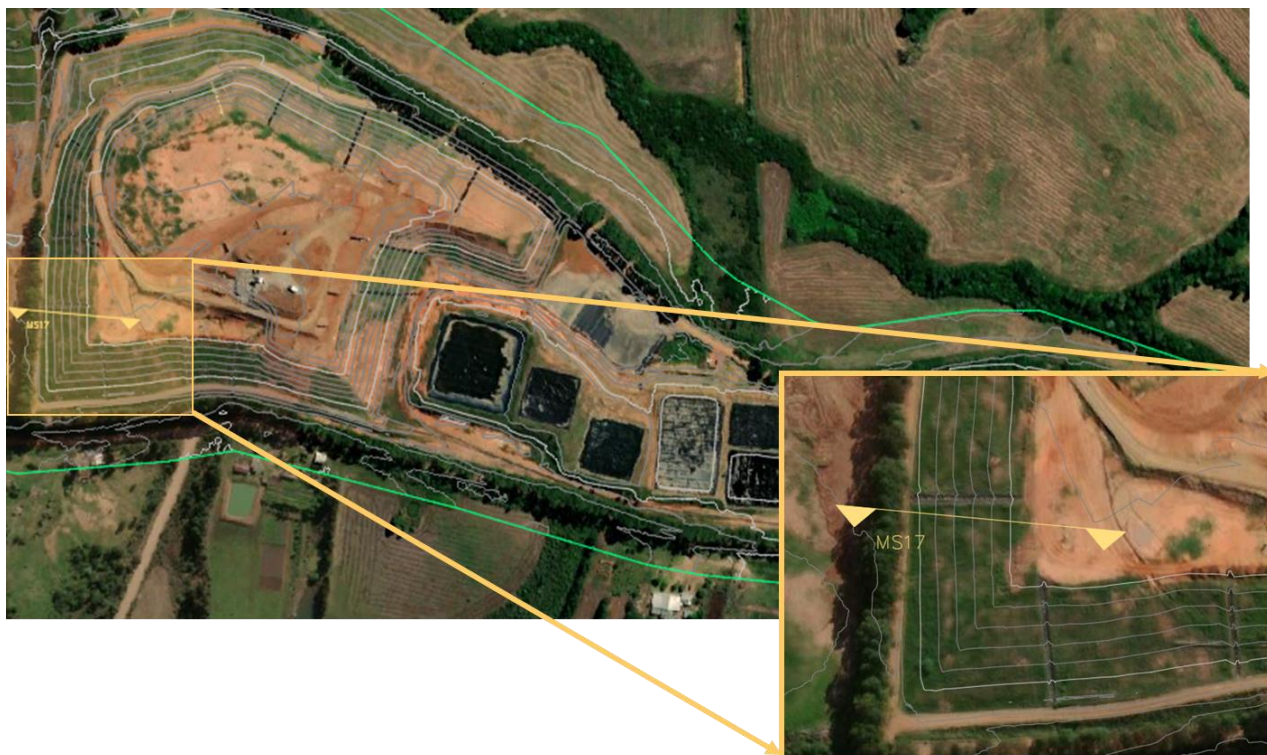


Figura 1. Localização da Seção Analisada.

## 2.2 Parâmetros dos Materiais

Para a realização de análises de estabilidade, é imprescindível o levantamento de parâmetros dos materiais - peso específico, coesão, ângulo de atrito – representativos para o maciço analisado, além disso, é considerada a presença de poropressão para uma análise mais fidedigna, uma vez que a geração do lixiviado é constante no interior do maciço devido aos processos de biodegradação. Posteriormente a compilação destes dados, são selecionados os métodos de análise desejados e definidas as superfícies de ruptura.

Salienta-se que o presente estudo não busca avaliar resíduos com diferentes idades de deposição, o que acarretaria na presença de diferentes camadas, e não existindo ensaios disponíveis do RSU específico, foram utilizados parâmetros encontrados na literatura. Boscov (2008) analisa que existe uma variabilidade natural dos parâmetros geotécnicos, esta que é ligada a tal tempo de deposição e outros fatores, desta forma se faz necessária uma análise probabilística impondo aos parâmetros geotécnicos um coeficiente de variação, assim podendo atribuir aos resultados das análises um elevado índice de confiabilidade.

Para os parâmetros, tendo como base uma geomembrana lisa, foram utilizados dados obtidos por Chiarello (2022), que realizou ensaios de cisalhamento na interface fundação-geossintético e compilou dados referentes à geomembranas. Com base no mesmo autor, foram referenciados dados para parâmetros geotécnicos do solo de fundação. Para a caracterização dos parâmetros geotécnicos do RSU, utilizou-se por base o trabalho de Norberto, et al. (2020), o qual apresenta dados estatísticos baseados em análises da caracterização geotécnica de RSU. Desta forma, foi definido um valor médio para os parâmetros do RSU que pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados.

Parâmetro	$\gamma$ (kN/m <sup>2</sup> )	c (kPa)	(°)
RSU	10,65	20,61	28,12
Geomembrana	10	0	15
Fundação	19	15	25

Considerando que nas camadas inferiores a de impermeabilização se faz presente uma baixa permeabilidade, o parâmetro de poropressão ( $R_u$ ) foi utilizado apenas na camada de RSU, para tal análise, foi

observado o estudo de Salamoni (2019), que caracteriza a poropressão do mesmo aterro utilizado para o presente estudo.

Para a análise de estabilidade por meio do MEL, foi utilizado o método de Morgenstern-Price, onde por meio de valores médios referentes aos parâmetros geotécnicos utilizados como dados de entrada, é calculado o FS, o qual classifica a análise como determinística (Assis, 2020). Porém, para uma representação mais próxima ao que o talude realmente está submetido, devem ocorrer análises probabilísticas, estas que levam em consideração uma variação de parâmetros referentes às incertezas no que diz respeito aos parâmetros geotécnicos, de forma a cobrir discrepâncias que surgem no comportamento do solo e no resultado de ensaios realizados, e assim, chegar em um índice de confiabilidade para a estabilidade do maciço.

Vastos são os métodos de análise probabilística existentes, dentre eles, é comumente utilizado na geotecnia o método estatístico de Monte Carlo, onde por meio de um número escolhido de iterações, existe uma variação de parâmetros adotados dentro de funções de densidade e probabilidade conhecidas, de forma a gerar uma gama de fatores de segurança (Apaza & Barros, 2014).

Desta forma, utilizando os parâmetros geotécnicos médios apresentados anteriormente, combinados com coeficientes de variação (CV) baseados no trabalho de Assis (2020), buscou-se um desvio padrão para cada parâmetro.

### 2.3 Trincas de tração

Com o que se faz referente a trincas de tração, é apresentado por Gerscovich (2012) que a distribuição das tensões horizontais sentidas pelo maciço varia com a profundidade, de forma que a trinca surge na parte superior do maciço e se estende até a profundidade em que é sentida a tensão horizontal nula, a partir deste ponto as tensões atuantes não permitem a desagregação do material.

Para o conhecimento da profundidade das trincas que podem acometer o maciço de RSU, utiliza-se a Equação 1, apresentada por Gerscovich (2012). Desta forma, com o uso dos parâmetros médios apresentados anteriormente, foi calculada uma profundidade máxima teórica para a modelagem das trincas no software.

$$Z = \frac{2c'}{\gamma} \operatorname{tg}\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (1)$$

Tendo em posse a profundidade calculada de aproximadamente 6,50 metros, foram criadas trincas variando de metro em metro a distância da crista do talude no intervalo de cinco a dez metros, em cada um destes intervalos, foram aplicadas diferentes inclinações para a trinca, variando seu ângulo em relação a linha perpendicular ao terreno de dez em dez graus no sentido anti-horário. Com o que diz respeito à configuração de tais trincas, foi considerado o caso em que as mesmas estão completamente preenchidas por água, de forma que apresentam o pior cenário em relação à estabilidade.

### 2.4 Modelagem do talude

Para a realização das análises, foi utilizada a seção apresentada na Figura 2, onde podem ser visualizadas as diferentes camadas de materiais, que consistem no resíduo sólido urbano (RSU), a geomembrana responsável pela impermeabilização, e o material de fundação.

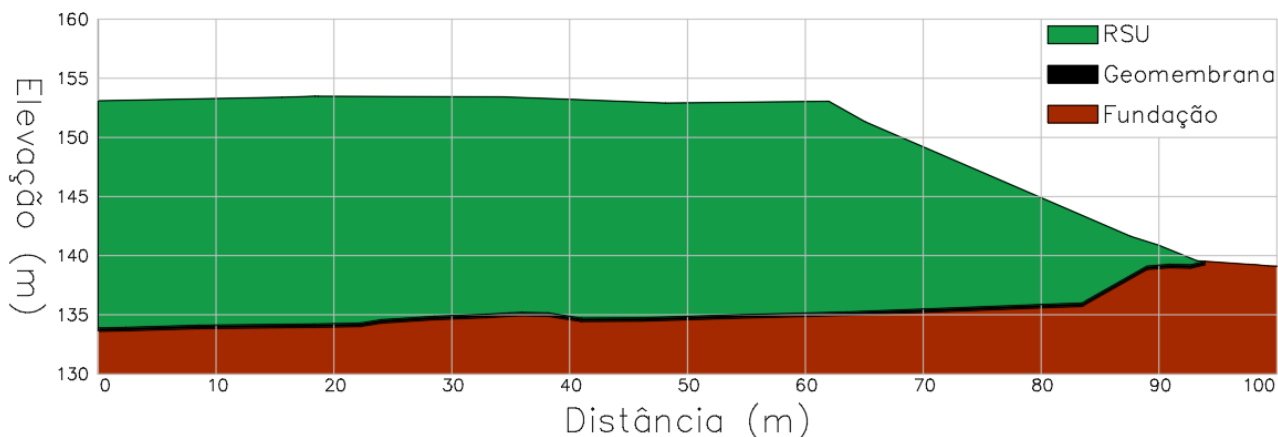


Figura 2. Caracterização da Seção Analisada.

Tendo como base tal modelo, foram implementadas as trincas com diferentes inclinações e distâncias da crista do talude. Para tal variação, baseou-se no trabalho de Bharati et al. (2020), onde para o presente estudo, foram adicionadas trincas com 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 metros de distância da crista do talude, contemplando assim uma variação da soma de um metro de distância da crista do talude por caso analisado (Figura 3). Em cada um destes casos, foram adicionadas variações do ângulo das trincas em relação ao plano vertical, essas variando de 0 a 60 graus, assim criando-se uma adição de 10 graus de inclinação por análise realizada. Desta forma, 56 casos diferentes foram analisados, contemplando assim variações da posição da trinca.

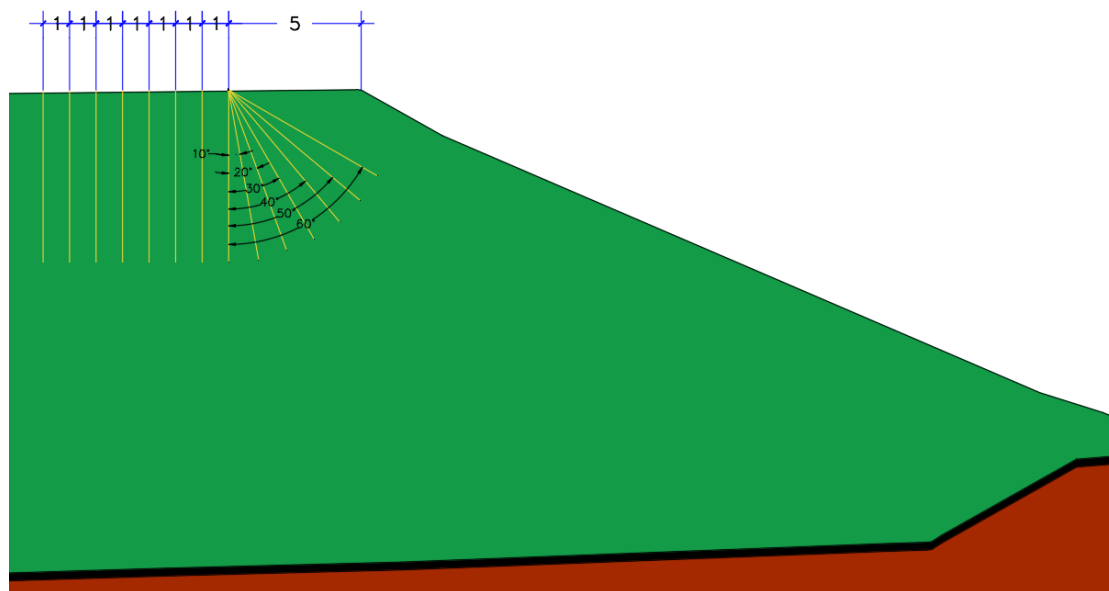


Figura 3. Localização das trincas no talude.

### 3 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Visando contextualizar os resultados obtidos no presente trabalho, buscou-se organizar de forma clara todos os parâmetros que foram usados para a análise probabilística, bem como todos os resultados que foram encontrados com a realização dos casos propostos.

### 3.1 Variação estatística dos parâmetros geotécnicos

Com base nos dados apresentados na Tabela 1 e os coeficientes de variação apresentados por Assis (2020), foi estudado o desvio padrão de cada parâmetro geotécnico. Os dados foram agregados na Tabela 2, de forma a apresentar os valores relativos utilizados, variando o intervalo em duas vezes o desvio padrão, com base em uma distribuição normal de probabilidade, obtendo-se um intervalo de confiança de 95,5% (Assis, 2020).

Tabela 2. Variação de Parâmetros.

Material	Propriedade	Distribuição	Média	CV	SD	Rel. Min	Rel. Max
RSU	Coesão	Normal	20,61	40%	8,24	4,12	37,10
RSU	Phi	Normal	28,12	10%	2,61	22,50	33,74
RSU	Ru	Normal	0,267	33%	0,09	0,09	0,45
RSU	$\gamma$	Normal	10,65	5%	0,53	9,59	11,72
BASE	Coesão	Normal	15	40%	6,00	3,00	27,00
BASE	Phi	Normal	25	10%	2,50	20,00	30,00
BASE	$\gamma$	Normal	19	5%	0,95	17,10	20,90

### 3.2 Análises de estabilidade

A análise ocorreu através do software Slide2. Os dados utilizados no software foram apresentados anteriormente (Tabela 2). Com o gráfico correspondente à convergência do método de Monte Carlo, foi possível perceber que com o número de 2500 iterações existe uma convergência aceitável dos dados para um valor de fator de segurança em todos os casos analisados neste trabalho.

Tendo como base o exposto e com todas as camadas devidamente configuradas foram realizadas as análises de estabilidade utilizando 56 diferentes trinças, acrescentando-se um caso em que nenhuma trinça foi considerada. Os dados foram compilados na Tabela 3 e plotados na Figura 4.

Tabela 3. Valores de Fator de Segurança.

	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m	11 m	12 m
0°	1,494	1,497	1,532	1,593	1,546	1,658	1,600	1,619
10°	1,475	1,484	1,496	1,540	1,524	1,657	1,658	1,583
20°	1,487	1,468	1,505	1,506	1,574	1,528	1,659	1,658
30°	1,656	1,641	1,509	1,507	1,518	1,525	1,659	1,659
40°	1,655	1,654	1,601	1,535	1,532	1,581	1,571	1,659

50°	1,647	1,651	1,622	1,584	1,564	1,660	1,639	1,599
60°	1,655	1,663	1,646	1,624	1,604	1,665	1,650	1,638

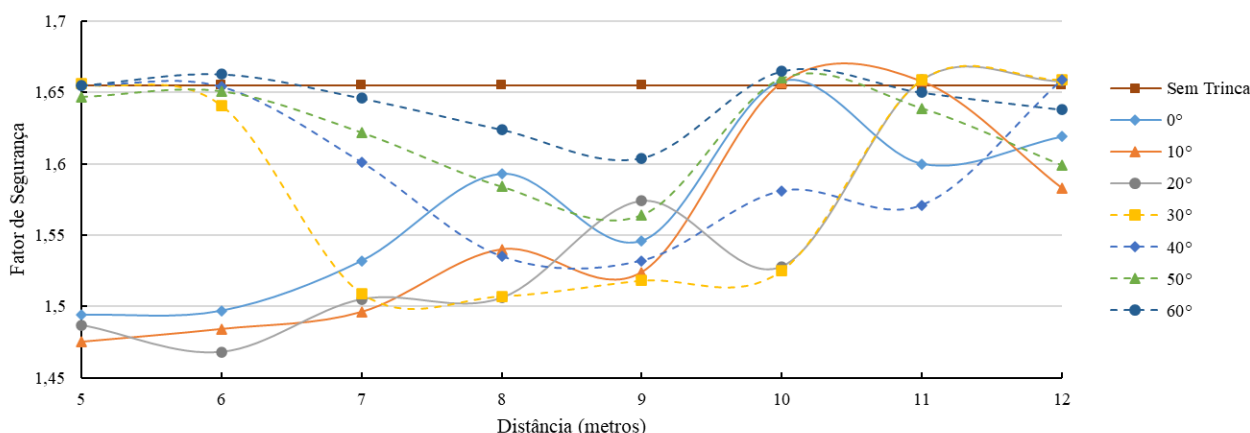


Figura 4. Gráfico de fator de segurança em relação a distância e inclinação.

Diante do exposto, percebeu-se que trincas de menor angulação, de 0° a 20°, tem um efeito mais prejudicial quando são próximas à crista do talude, de forma que uma notável diminuição do fator de segurança deu-se considerando tais angulações no intervalo de 5 a 9 metros de distância da crista do talude.

Analisando a trinca de 30° de angulação, que apresenta uma inclinação semelhante a formada pelo plano de ruptura sem a consideração de trincas, nota-se uma brusca variação do fator de segurança, que apresenta-se decrescido no intervalo de 7 a 10 metros, de forma que antes de tal intervalo, a trinca não apresenta efeito significativo por estar contida no plano de ruptura, e depois desse intervalo, deixa de interferir de maneira significativa na ruptura.

Verificando as trincas de maior grau de inclinação, percebe-se que no geral as mesmas tendem a apresentar o menor desvio entre os casos analisados, de forma que o pico da diminuição do fator de segurança ocorre aos 9 metros de distância. Também é percebido um agrupamento dos valores quando a trinca apresenta maiores distâncias da crista do talude, o que deve-se à interrupção da contribuição da trinca no plano de ruptura.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo teve como objetivo a análise da estabilidade de uma seção de um aterro sanitário através de um método de análise probabilístico, avaliando a mudança do fator de segurança com a adição de diferentes trincas, considerando como variáveis os parâmetros de resistência do RSU, da geomembrana e da base, além de variar os valores de propressão do RSU.

As análises realizadas revelaram uma maior influência negativa no fator de segurança (13,7% de diminuição do FS) ligada a trincas de pequena inclinação (0° a 20°) próximas à crista do talude, ao passo que trincas de média inclinação (30° a 40°) apresentam uma brusca variação do fator de segurança, enquanto as trincas com maior inclinação (50° e 60°) apresentaram apenas uma ligeira alteração do fator de segurança ligada a médias distâncias em relação a crista do talude.

Nos casos de trincas com inclinação menor que 30° a distâncias de 5 e 6 metros da crista do talude, é possível observar a possibilidade de existência de um fator de segurança menor que o normalizado para aterros sanitários (1,5), levando em conta as análises probabilísticas usadas no trabalho.

Por fim, salienta-se a necessidade do monitoramento contínuo do aterro sanitário, buscando fatores que impactem negativamente na estabilidade do maciço, de forma a prever o comportamento do AS, mantendo a elevada segurança socioambiental requerida por essas estruturas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR) pela disponibilização dos dados topográficos, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apaza, M. A. F., Barros, J. D. C. (2014). *Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes pelo Método de Monte Carlo*. In XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia, ABMS (pp. 1-8).
- Assis, A. P. (2020). Risk management for geotechnical structures: consolidating theory into practice. *Soils and Rocks*, 43(3 special issue), p. 311–336
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992). NBR 8419. *Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Bharati, A. K., Ray, A., Rai, R., Shrivastava, B. K. (2020). Effect of cracks on the stability of dump slope. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 68(7), p. 237-242.
- Boscov, M. E. G. (2008). *Geotecnia Ambiental*. São Paulo, 1º ed, Vol. 1. Oficina de Textos.
- Chiarello, G. P. (2022). *Interação de Interfaces entre Solo e Geomembranas por meio de Ensaio de Cisalhamento Direto*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.
- Gerscovich, D. M. S. (2012). *Estabilidade de Taludes* (2º ed). Oficina de Textos.
- Kaniraj, S. R., & Abdullah, H. (1993). Effect of berms and tension crack on the stability of embankments on soft soils. *Soils and foundations*, 33(4), 99-107.
- Lange, L. C., Cantanhade, Á. L., Teixeira, E. N. (2008). *Resíduos sólidos: projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários: guia do profissional em treinamento* (Vol. 2). ReCESA.
- Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 ago. 2010.
- Norberto, A.S.; Corrêa, C. L.; Mariano, M. O. H.; Jucá, J. F. T. (2020). Statistical analysis of the variability of shear strength parameters of landfills. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 5, n. 01x, p. 108-116.
- Salamoni, G. P. D. (2019). *Compressibilidade de Resíduos Sólidos Urbanos devido aos Processos de Biodegradação em um Aterro Sanitário*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.
- Verma, D., Kainthola, A., Gupte, S. S., Singh, T. N. (2013). A finite element approach of stability analysis of internal dump slope in Wardha valley coal field, India, Maharashtra. *American Journal of Mining and Metallurgy*, 1(1), 1-6.