

Caracterização geotécnica e análise probabilística da estabilidade de taludes do aterro sanitário em Rio Grande –RS

Lucas dos Santos Rocha¹

Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil, lsrochad@gmail.com

Ingrid Milena Reyes Martinez Belchior²

Professora Adjunta, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil, ingridbelchior17@gmail.com

Cezar Augusto Burkert Bastos³

Professor Titular, Universidade Federal do Rio Grande FURG, Rio Grande, Brasil, cezarbastos@furg.br

RESUMO: O crescente consumo da população tem gerado um aumento significativo na produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Diante desse cenário, é essencial adotar medidas ambientalmente sustentáveis para gerenciar adequadamente os resíduos, utilizando o aterro sanitário como uma solução de engenharia para essa demanda. Para construir e manter essa estrutura, é essencial realizar uma análise de estabilidade do talude, considerando o comportamento e as propriedades geotécnicas envolvidas. Este estudo analisa um dos taludes do Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos de Rio Grande - RS, utilizando análises determinísticas e probabilísticas para avaliar sua estabilidade. A caracterização do solo, ensaios de compactação e ensaios de cisalhamento direto, tanto em condição natural quanto inundada, foram conduzidos a partir das amostras coletadas no aterro. Os resultados apontaram a presença de areia siltosa na camada superior e intermediária, à medida que a camada inferior foi caracterizada como argila de baixa plasticidade. A camada de areia siltosa apresentou maiores parâmetros de resistência em comparação com a camada composta por argila de baixa plasticidade. Na análise do talude do aterro, duas interfaces foram consideradas: solo-solo, para as camadas contínuas de solo, e solo-RSU, representando o solo sobre os resíduos urbanos. Foram realizadas análises probabilísticas pelo método de Monte Carlo associada com a abordagem determinística pelo método de Morgenstern-Price. Na interface solo-solo em estado natural, o fator de segurança foi satisfatório, porém em estado saturado, a probabilidade de ruptura foi de 2,516%, indicando a necessidade de monitoramento e prevenção de escorregamentos. Na interface solo-RSU, o fator de segurança em estado natural foi adequado, mas em estado saturado a probabilidade de ruptura foi de 26,310%, indicando áreas com fator de segurança inferior a 1. Isso destaca a possibilidade de ruptura na camada intermediária, expondo resíduos urbanos e exigindo ações de remediação para prevenir problemas ambientais.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, Aterro sanitário, Métodos probabilísticos, Probabilidade de ruptura.

ABSTRACT: The population's increasing consumption has led to a significant increase in the production of Municipal Solid Waste (MSW). Given this scenario, it is essential to adopt environmentally sustainable measures to properly manage waste, using sanitary landfills as an engineering solution for this demand. The sanitary landfill, an engineering structure, is used to meet this demand. To build and maintain this structure, it is essential to carry out a slope stability analysis, considering the behavior and geotechnical properties involved. This study looks at the geotechnical properties of the slope of the Municipal Solid Waste Landfill in Rio Grande - RS, using deterministic and probabilistic analyses to assess its stability. Samples of three layers of soil from the landfill were collected at three representative points by means of fieldwork. Soil characterization, compaction tests and direct shear tests, both in natural and flooded conditions, were carried out on the samples collected. The results showed the presence of silty sand in the upper and middle layers, while the lower layer was characterized as low plasticity clay. The silty sand layer had higher resistance parameters compared to the other layer made up of low plasticity clay. In the analysis of the landfill slope, two interfaces were considered: soil-soil, for the continuous soil layers, and soil-MSW, representing the soil over the municipal waste. Probabilistic analyses were carried out using the Monte Carlo method combined

with a deterministic approach using the Morgenstern-Price method. At the soil-soil interface in the natural state, the safety factor was satisfactory, but in the saturated state, the probability of rupture was 2.516%, indicating the need for monitoring and slip prevention. At the soil-UWS interface, the safety factor in the natural state was adequate, but in the saturated state the probability of rupture was 26.310%, indicating areas with a safety factor of less than 1. This highlights the possibility of rupture in the intermediate layer, exposing urban waste and requiring remedial action to prevent environmental problems.

KEYWORDS: Slope stability, Landfill, Probabilistic methods, Probability of failure.

1. INTRODUÇÃO

O constante crescimento da produção de resíduos, associado com o aumento do consumo da sociedade, influenciou diretamente no aporte de geração de resíduos (JUNIOR & FREIRE, 2013), dessa forma, são necessários métodos para tratamento e disposição desses Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Em virtude desse fato, os aterros sanitários são os métodos mais utilizados para a disposição desses resíduos. Segundo dados apresentados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, o Brasil gerou aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos no ano de 2022, à medida que foram coletadas 76,1 milhões de toneladas (ABRELPE, 2022).

As análises de estabilidade de taludes, considerando a abordagem determinística, são categorizadas fundamentalmente em duas teorias. A primeira abordagem é fundamentada na análise pela teoria de equilíbrio-limite, e a segunda é fundamentada na teoria de elementos finitos, considerando os conceitos de tensão-deformação (GERSCOVICH, 2016). Destaca-se que as análises determinísticas mais utilizadas em análise de estabilidade de taludes são os métodos de Bishop (1955), Spencer (1967), Morgenstern-Price (1965) e Jambu (1956), baseados na teoria de equilíbrio-limite (GERSCOVICH, 2016).

Em relação às abordagens probabilísticas para a análise de estabilidade de taludes, vale destacar que esse tipo de análise ocorre associada com os métodos determinísticos, em que é possível identificar quais e como a coesão, ângulo de atrito, poro-pressão, geometria entre outros parâmetros afetam na estabilidade, corrigindo algumas incertezas. Ao utilizar essa análise supracitada, é possível obter a probabilidade de ruptura e o índice de confiabilidade do talude, correlacionado com o fator de segurança obtido pelo método determinístico (FLORES, 2008; TORRES FILHO & ANDRADE, 2015; SHIMAZAKI, 2017).

Na região do Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos de Rio Grande – RS, um estudo realizado por Bruch (2020) por meio de levantamentos com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) e técnicas de álgebra de mapas destacou uma instabilidade externa, associada a movimentos de massa no aterro sanitário. O autor observou que o fator declividade exerce influência na identificação de áreas de alto risco, classificando as regiões do aterro com uma declividade superior a 40%, com curvaturas horizontais convergentes e verticais retilíneas. O estudo conclui que nas direções SE, S e SW do aterro, há um alto risco para perda de vidas humanas, danos materiais e ambientais (BRUCH, 2020).

Como a ruptura de taludes ocorre associada com processos externos e internos, essa pesquisa tem como objetivo realizar uma análise interna do comportamento dos taludes do Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos de Rio Grande - RS, motivado pelos resultados das análises externas realizadas por Bruch (2020), evidenciando o alto risco para movimento de massas. Torna-se, portanto, necessário a compreensão do comportamento interno desses taludes, realizando a caracterização geotécnica dos materiais e a análise probabilística da estabilidade dos taludes do aterro sanitário em Rio Grande - RS.

1.1 Localização da área de estudo

O aterro de Resíduos Sólidos Urbanos de Rio Grande - RS está instalado próximo à rodovia BR-392 e da malha ferroviária RMS (Rumo Logística Malha Sul)/Linha D - Cacequi - Rio Grande, entre o distrito Povo Novo e o distrito Quinta, em Rio Grande/RS. O município destaca-se por sua localização junto ao estuário da Laguna dos Patos, sendo também banhado pelo Oceano Atlântico. (Figura 1) (IBGE, 2021)

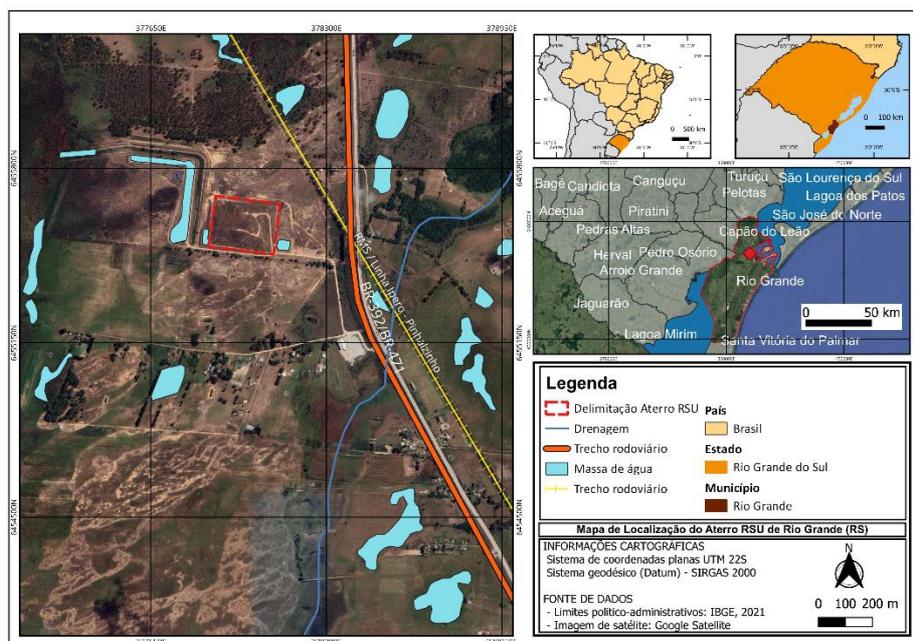


Figura 1 - Mapa de localização do Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) de Rio Grande – RS.

O projeto do Aterro RSU foi elaborado em 2005 pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia. Apresenta uma célula unitária, com previsão de execução em quatro alteamentos, com limite de 28 m acima do nível do terreno em taludes laterais com declividade de 33% (1V:3H). Foi definido em projeto uma geometria retangular com 236,5 m Leste-Oeste e 336,58 m norte-sul, possuindo uma área total de 79,091 m² (AZAMBUJA, 2006). O projeto apresentava uma vida útil estimada de 26 anos e 8 meses, além de operar com o peso específico do resíduo compactado equivalente a 0,95 t/m³, e um volume útil de 1.055.020 m³, associado com uma coleta sendo efetuada em 26 dias do mês (AZAMBUJA, 2006; CAMARGO et al. 2023). Atualmente o aterro está desativado, com funcionamento destinado apenas para a manutenção e monitoramento. São hoje realizados: queima de gases, vedação das lagoas de decantação, ajustes na cobertura de solo e monitoramento do nível de água (BRUCH, 2020).

2. MATERIAIS E METODOS

O estudo foi compartimentado em uma primeira etapa de Campo/ Experimental e uma etapa posterior de realização da análise de estabilidade, utilizando recursos computacionais. Na primeira etapa, através dos ensaios de laboratório, foi possível realizar a caracterização física e mecânica das camadas de solo do aterro, com a estimativa dos parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito, por meio do ensaio de cisalhamento direto. Foram obtidos outros parâmetros físicos como peso específico, densidade relativa dos grãos, índice de vazios, além de ser realizado o controle de umidade das amostras para o ensaio de compactação.

Posteriormente, foi realizado a análise de estabilidade de taludes na face leste do aterro RSU, realizando análises probabilísticas de estabilidade pelo método de Monte Carlo, associado com análises determinísticas pelos métodos de Morgenstern-Price.

2.1 Coleta de amostras

Para a coleta de amostras, deu-se ênfase em áreas identificadas por Bruch (2020) como mais suscetíveis à instabilidade externa e com maior potencial de impactos decorrentes dessa instabilidade. Dessa forma, as coletas foram localizadas na região SE e S do aterro. Para a construção da geometria e posterior análise foi considerado o talude da face leste do aterro no sentido S e SE. Durante o processo de coleta, observaram-se variações nas camadas, permitindo determinar a posição das três camadas que compõem o

aterro, e dessa forma, foram coletadas amostras em três pontos distintos ao longo da face leste do aterro, representando cada uma das camadas de solo (pontos ILTCC-01, ILTCC-02 e ILTCC-03).

Durante a amostragem, foram coletadas amostras indeformadas para determinar o peso específico aparente e a umidade das amostras em campo. Também foram coletadas amostras deformadas para classificar o tipo de solo das camadas observadas, determinar a densidade real dos grãos e posteriormente reproduzir o estado de compactação das amostras em campo. Essas amostras compactadas foram utilizadas para a avaliação dos parâmetros de resistência.

2.2 Caracterização física

A caracterização física das amostras iniciou com a determinação da densidade real dos grãos através do ensaio do picnômetro. A preparação das amostras para esse ensaio seguiu as recomendações do DNER – ME 093/64 e ABNT (NBR 6457: 2016). Utilizando o peso específico real dos grãos associado com o peso específico aparente seco foi possível encontrar o índice de vazios e a porosidade para cada ponto. Os resultados são mostrados na Tabela 1. Os três pontos apresentaram índices de vazios e porosidades que podem ser considerados médios, situando-se no intervalo de 0,80 a 0,55 para o índice de vazios e de 45% a 35% para a porosidade.

Tabela 1 - Índices físicos.

Ponto	Densidade real dos grãos (G_s)	Índice de vazios	Porosidade
ILTCC-01	2,45	0,78	44,08%
ILTCC-02	2,50	0,70	41,20%
ILTCC-03	2,52	0,58	36,39%

A análise granulométrica foi realizada fundamentada pelas normas ABNT (NBR 7181:2016) e ASTM D2487 (ASTM, 2017), utilizando a peneira n° 4, n° 10, n°40 e n° 200. Dessa forma, foi possível obter a porcentagem de fração pedregulho, areia e finos para cada ponto. As curvas granulométricas dos três pontos são mostradas na Figura 2.

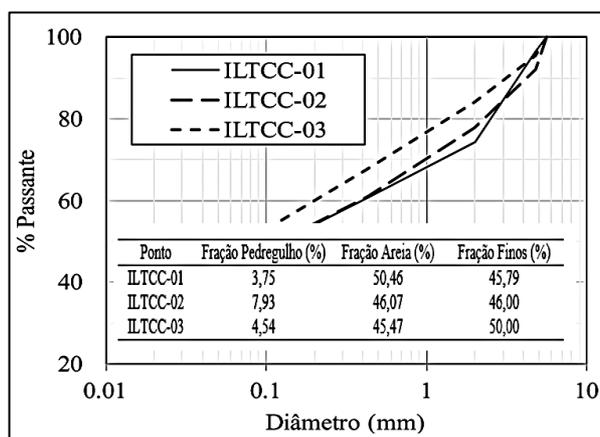


Figura 2 - Curvas granulométricas.

Para concluir a caracterização física das amostras, foram determinados os limites de consistência. O Limite de Liquidez foi estabelecido pelo método de Casagrande, conforme as diretrizes da ABNT (NBR 6459:2016). A determinação do Limite de Plasticidade seguiu as normas da ABNT (NBR 7180:2016) e da ABNT (NBR 6457:2016). Os resultados dos limites de consistência e do índice de plasticidade estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de consistência e índice de plasticidade.

Ponto	Limite de liquidez (LL) (%)	Limite de Plasticidade (LP) (%)	Índice de Plasticidade (IP)
ILTCC-01	42	30	12
ILTCC-02	38	26	12
ILTCC-03	35	24	11

Utilizando os dados de granulometria e os limites de consistência, os solos foram classificados de acordo com o Sistema de Classificação Unificada dos Solos. As amostras ILTCC-01 e ILTCC-02 foram classificadas como "Areia Siltosa (SM)", enquanto a amostra ILTCC-03 foi classificada como "Argila de Baixa Plasticidade (CL)".

2.3 Parâmetros de resistência do solo

As amostras coletadas do aterro foram analisadas de acordo com a ABNT (NBR 6457:2016) e ABNT (NBR 6458:2016), obtendo os valores de massa específica, massa específica aparente seca e peso específico. A determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento para as amostras ILTCC - 01, ILTCC - 02 e ILTCC - 03, foi realizada por ensaio de cisalhamento direto natural e inundado. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D3080 (ASTM, 2011), com tensões normais de 25, 50, 100 e 200 kPa e velocidade de cisalhamento de 0,1 mm/min. Dessa forma, foi possível obter os parâmetros coesão e ângulo de atrito para o solo natural e inundado (Tabela 3).

Tabela 3 - Parâmetros obtidos para o solo na condição natural.

Ponto	Condição Natural			Condição Saturada		
	c' (kPa)	ϕ' (°)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	γ (kN/m ³)
ILTCC-01	43,4	35,4	13,30	1,3	32,7	15,60
ILTCC-02	21,5	43,2	14,61	0	31,8	16,03
ILTCC-03	75,6	28,8	15,77	3,9	29,4	17,53

Os valores de coesão obtidos para a condição natural do solo foram consistentes com os resultados do índice de vazios. A amostra ILTCC-03, que apresentou a maior coesão, também teve o menor índice de vazios. Além disso, essa amostra mostrou o menor valor de ângulo de atrito interno na condição natural, o que pode ser atribuído à maior porcentagem de argila em sua composição. Na condição saturada, os parâmetros de resistência seguiram o mesmo padrão, com a amostra ILTCC-03 exibindo maior coesão e o menor valor de ângulo de atrito interno.

2.4 Parâmetros de resistência do RSU para análise de estabilidade

Para a modelagem da análise de estabilidade, foram consideradas duas interfaces para avaliar o talude leste do aterro RSU nos sentidos S e SE. A primeira interface, solo-solo, está associada com a modelagem geométrica do aterro, considerando as camadas de solo contínuas (Figura 3, itens a e b). Já a segunda interface, solo-RSU, refere-se às camadas de solo sobrepostas ao resíduo sólido urbano depositado (Figura 3, itens c e d). Para o peso específico natural do RSU, foi utilizado o valor de 9,4 kN/m³ e para o peso específico saturado foi considerado o valor de 11,4 kN/m³, baseado em estudos de Oweis (1993), que evidenciou o valor do peso específico para um RSU com boa a excelente compactação. Os valores de coesão e o ângulo de atrito do RSU foram baseados no estudo de Nascimento (2007), que realizou ensaios de cisalhamento direto não drenado, tanto na condição natural quanto inundado, para amostras de um aterro em Salvador/BA com idades distintas. Dessa forma, para o cenário natural considerou-se a coesão de 25,8 kPa e ângulo de atrito de 45,45°, à medida que para o cenário do aterro saturado, utilizou-se coesão nula e 24,9° de ângulo de atrito.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos parâmetros de resistência e nos dados de caracterização física do solo obtidos nas três amostras, foram realizadas análises de estabilidade e probabilísticas utilizando o software Slide 2 da Rocscience. A análise probabilística foi realizada em conjunto com uma análise determinística, empregando o método de Morgenstern-Price para a parte determinística e o método de Monte Carlo para a análise probabilística da estabilidade do talude.

A análise probabilística pelo método de Monte Carlo evidenciou um fator de segurança médio de 3,635, enquanto obteve-se um fator de segurança mínimo de 3,543 pelo método determinístico Morgenstern - Price. O cenário que considera o aterro com camadas contínuas de solo em estado natural apresenta uma probabilidade de ruptura de 0% considerando 10.000 amostras, evidenciando que nenhuma das amostras atingiu valores de fator de segurança inferior a 1 (Figura 3, item a). O índice de confiabilidade normal obtido foi de 3,895, indicando que o desvio padrão do fator de segurança encontra-se distante do fator de segurança crítico. Avaliando os resultados da análise probabilística da estabilidade do talude em condição natural, é possível interpretar que o talude apresenta uma garantia mínima de segurança. Segundo USACE (1995), o valor de índice de confiabilidade normal de 3,895 atrelado com 0% de probabilidade de ruptura, permite caracterizar que o talude da face leste do aterro RSU na condição natural de saturação apresenta boa condição de estabilidade.

Para o cenário do talude saturado, na interface solo-solo, foi obtido um fator de segurança médio de 1,272 e um fator de segurança mínimo de 1,271. A probabilidade de ruptura encontrada foi de 2,516% em 10.000 amostras, representando assim que 251 superfícies analisadas apresentaram um fator de segurança inferior a 1 (Figura 3, item b). O índice de confiabilidade normal nesse cenário foi de 1,876, explicitando que o fator de segurança encontra-se relativamente próximo do fator de segurança crítico. De acordo com USACE (1995), para o valor de índice de confiabilidade normal de 1,876 obtido associado com 2,516% de probabilidade de ruptura, o talude no estado saturado, na interface solo-solo, apresenta uma situação categorizada como abaixo da média. Destaca-se que esse talude não encontra-se em um estado de risco de ruptura generalizado, porém, pode apresentar um grau de instabilidade em porções locais.

No cenário do talude natural na interface solo-RSU, através do método de Monte Carlo, foi possível encontrar um fator de segurança médio de 4,635, e um fator mínimo de 4,414 obtido pelo método de Morgenstern - Price. A probabilidade de ruptura obtida foi de 0% para uma análise de 10.000 amostras (Figura 3, item c). O índice de confiabilidade normal obtido foi de 3,419, indicando que o fator de segurança encontra-se distante do fator de segurança crítico, caracterizado como 1. Para o valor de índice de confiabilidade normal e probabilidade de ruptura encontrados nesse cenário supracitado, o talude na condição natural é caracterizado por USACE (1995) como um talude em boa performance de estabilidade.

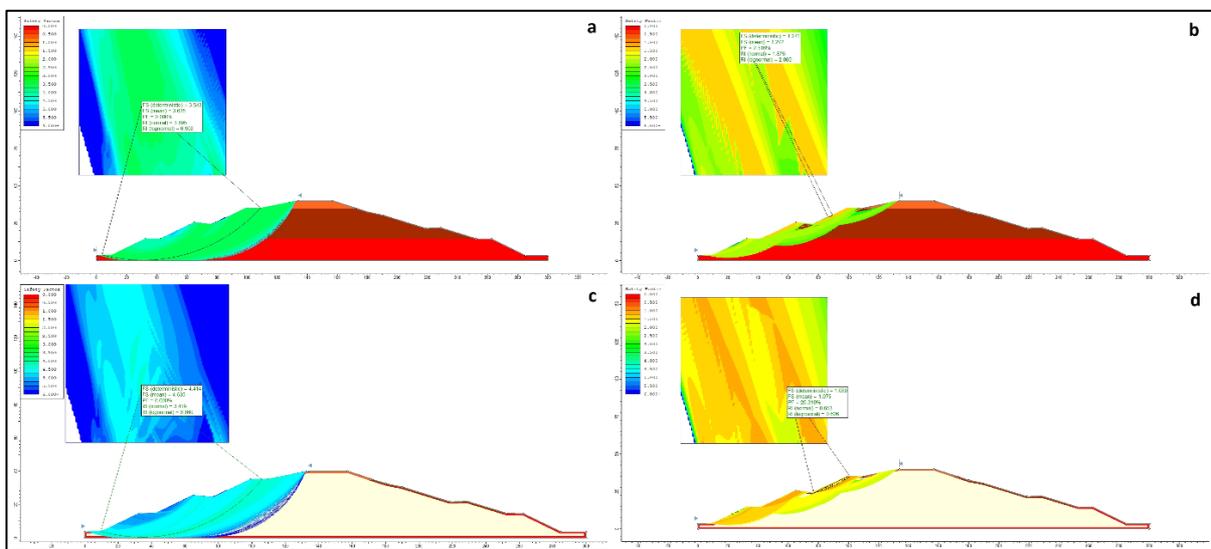


Figura 3 - Análise probabilística de Monte-Carlo. a) Interface solo-solo na condição natural; b) Interface solo-solo na condição saturada; c) Interface solo-RSU na condição natural; d) Interface solo-solo na condição saturada.

Ao efetuar a análise probabilística pelo método de Monte Carlo na interface solo-RSU, considerando o talude saturado, foi possível obter um fator de segurança médio de 1,075, e um fator mínimo de 1,069 pelo método determinístico de Morgenstern – Price. A probabilidade de ruptura obtida foi de 26,310 % para uma análise de 10.000 amostras, demonstrando que 2.631 superfícies apresentaram fator de segurança inferior a 1 (Figura 3, item d). O índice de confiabilidade normal obtido foi de 0,653, indicando que o fator de segurança encontra-se próximo do fator de segurança crítico, caracterizado como 1. Para o valor de índice de confiabilidade normal e probabilidade de ruptura encontrados nesse cenário supracitado, o talude em condição saturada é caracterizado por USACE (1995) como um talude com performance não satisfatória de estabilidade.

4. CONCLUSÕES

Através do Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), os solos das amostras ILTCC-01 e o ILTCC-02 foram classificadas como uma Areia Siltsosa, enquanto o solo do ponto ILTCC-03 foi classificado como uma Argila de Baixa Plasticidade. Ao mesmo tempo a camada de solo ILTCC-03 apresentou a maior coesão das três amostras no ensaio de cisalhamento direto na condição natural e inundado. O ângulo de atrito interno das três camadas de solo obteve valores entre 28,8° e 43,2° na condição natural e, entre 29,4° e 32,7° no estado inundado.

A análise probabilística de estabilidade de taludes na condição natural, realizada pelo método de monte Carlo na interface solo-solo, evidenciou um satisfatório fator de segurança, atrelado com uma probabilidade de ruptura de 0%, caracterizando essa porção como uma zona de segurança. No entanto, a análise dessa interface na condição saturada, apresentou um fator de segurança também satisfatório, porém com uma probabilidade de ruptura de 2,516%. Destaca-se que é uma superfície de ruptura pequena ao longo do talude, porém, é necessário um monitoramento para evitar acidentes com escorregamentos de solo. Ao analisar a estabilidade da interface solo-RSU na condição saturada, também se conclui a necessidade de monitoramento contínuo e a implementação de medidas mitigatórias para prevenir acidentes envolvendo trabalhadores, devido ao risco potencial de deslizamentos de solo. Mesmo que a área de ruptura ao longo do talude seja pequena, é necessário evitar a instabilidade das camadas de solo do aterro. As análises na interface solo-RSU revelam uma potencial ruptura em toda a espessura da camada 2, o que poderia expor uma parte dos Resíduos Sólidos Urbanos do aterro, resultando em possíveis problemas ambientais e necessidade de imediatas medidas de remediação.

O estudo atingiu seu objetivo ao fornecer uma visão geral da condição dos taludes na face leste do aterro, no entanto, ressalta-se inerentes incertezas associadas à geometria, aos parâmetros de resistência dos Resíduos Sólidos Urbanos, entre outros fatores.

AGRADECIMENTOS

À Prefeitura do Rio Grande - RS pelo acesso concedido ao aterro, à Rocscience pela licença provisória do programa Slide 2, à Universidade Federal de Pelotas pela estrutura para efetuar os ensaios, à Universidade Federal do Rio Grande – FURG, através do Laboratório de Geotecnia e Concreto, por abrir as portas e permitir a realização dos ensaios de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR 11682: Estabilidade de encosta. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 6457: Amostras de Solo–Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4, 8 mm- Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica.
- ABRELPE. (2022). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo, Brasil: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.
- ASTM International. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) 1. USA: D2487 – 00: Committee D-18 on Soil and Rock.
- ASTM International. (2011). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. USA: D3080/D3080M, v.3, n.9.
- AZAMBUJA. (2006). Projeto do aterro sanitário de Rio Grande. Porto Alegre: Projeto de engenharia Azambuja Engenharia e Geotecnia LTDA.
- Bastos, C. A. B.; Souza, E.; Camargo, K. R. (2008). Avaliação da permeabilidade de solos compactados no litoral sul do Rio Grande do Sul e adjacências para uso como barreiras impermeáveis em obras de aterros de resíduos. Recife/PE: Anais do 12º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, UFPE.
- Bruch, A. F. (2020). Avaliação do risco potencial a movimentos de massa no aterro de resíduos sólidos do município de Rio Grande/RS. Universidade Federal do Pelotas: Trabalho de Conclusão de Curso em Geografia Bacharelado. 77.
- Camargo, K. R.; Bruch, A. F.; Rodrigues, M. L.; Retzlaff, A. S. (2023). Impermeabilização de fundo do aterro sanitário de Rio Grande/rs: considerações históricas, geológicas e geotécnicas. Interdisciplinary Studies: Revista Foco. e1728–e1728p. v.16, n.5.
- Flores, E. A. F. (2008). Análises probabilísticas da estabilidade de taludes considerando a variabilidade espacial do solo. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Gerscovich, D. M. (2016). Estabilidade de Taludes (2ª edição). São Paulo: Oficina de Textos.
- IBGE. (2021). Base Cartográfica Contínua do Brasil na escala de 1:250 000. Brasil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IBGE. (2022). Base Dados Espacial 1:250.000, no recorte ao milionésimo para uso em Sistemas de Informação Geográfica sobre o tema da Geomorfologia: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- Junior, E., Freire, R. (2013). Os impactos Ambientais decorrentes da produção de resíduos sólidos urbanos e seus riscos à saúde humana. Brasil: Revista Eletrônica da Faculdade José Augusto Vieira, ANOVI, n.8.
- Nascimento, J. C. F. (2007). Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Oweis, I. S. (1993). Stability of landfills. Switzerland: Springer. Geotechnical practice for waste disposal, 244 268p.
- Shimazaki, L. R. (2017). Análise de estabilidade de aterros de Resíduos Sólidos Antigos. São Paulo: Monografia apresentada ao curso de Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos na Universidade de São Paulo.
- Torres Filho, R. J. A., Andrade, V. C. (2015). Comparação entre análises determinísticas e probabilísticas de estabilidade de taludes em barragens: estudo de caso. Curitiba, Paraná - SC: Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- USACE. (1995). Introduction to Probability and Reliability Methods for Use In Geotechnical Engineering. Washington, DC 20314-1000: Engineering Technical Letter ETL 1110-2-547, Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers.