



REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE ATERROS SANITÁRIOS

*Rafaella de Moura Medeiros¹
Alison de Souza Norberto¹
Maria Odete Holanda Mariano¹

AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE ATERROS SANITÁRIOS

Recibido el 28 de enero de 2019; Aceptado el 20 de enero 2020

Abstract

The increase in solid waste generation rates, as well as the lack of suitable waste disposal areas, has been demanding an increase in the useful life of landfills. This situation leads to the construction of progressively high landfills, alleviating the problem of waste demand but, on the other hand, generating major concerns about the stability of these constructions. The aim of this research was to evaluate the stability of slopes of municipal solid waste masses, by means of the retroanalysis, performing the modeling of landfills that had rupture, which had their rupture simulated and that did not show rupture, using the software SLOPE/W from GeoSlope International. Through the verification of the stability in conditions of efficient drainage and obstructed drainage, it was possible to evaluate the influence of the level of leachate in the stability, where a decrease of up to 39.18% in the safety coefficient was obtained in one of the cases.

Keywords: landfill, landfill rupture, retroanalysis, stability.

¹ Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Brasil.

* *Autor correspondente:* Universidade Federal de Pernambuco, Campus Acadêmico do Agreste. Rodovia BR 104 KM 59 s/n, Sítio Juriti, Nova Caruaru, 55002970 - Caruaru, PE – Brasil. Email: rafaellamouraa1@gmail.com

Resumo

O aumento nas taxas de geração de resíduos sólidos, atrelado ao fato da escassez de áreas adequadas para a disposição de resíduos, vem demandando o aumento da vida útil de aterros. Tal situação induz a construção de aterros cada vez mais altos, atenuando o problema da demanda de resíduos e, em contrapartida, gerando grandes preocupações quanto à estabilidade destes elementos. Assim, essa pesquisa objetivou-se em avaliar a estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos, através da retroanálise dos mesmos, realizando a modelagem de aterros que sofreram ruptura, que tiveram sua ruptura simulada e que não apresentaram ruptura, utilizando o software Slope/W da GeoSlope International. Através da verificação da estabilidade em condições de drenagem eficiente e drenagem obstruída foi possível avaliar a influência do nível de lixiviado na estabilidade, onde obteve-se um decréscimo de 39.18 % no FS quando comparada ambas a situações, para dos casos avaliados.

Palavras chave: aterro sanitário, rupturas de aterros, retroanálise, estabilidade.

Introdução

Um dos maiores desafios existentes na atualidade diz respeito à geração de resíduos sólidos, uma vez que a disposição de forma inadequada resulta em danos, tanto de ordem sanitária, quanto de ordem ambiental, social e econômica, não apenas para uma determinada localidade, como também para o seu entorno. Em todo o mundo, as taxas de geração de resíduos estão aumentando. Em 2016, foram gerados 2.01 bilhão de toneladas de resíduos sólidos, totalizando cerca de 0.74 kg de resíduos sólidos por pessoa por dia. Com o rápido crescimento da população e a urbanização, se espera que a geração de resíduos urbanos se eleve para 3.40 bilhões de toneladas até 2050 (Kaza *et al.*, 2018).

Em 2012, foram gerados 1.3 bilhão de toneladas de resíduos sólidos, totalizando cerca de 1.2 kg de resíduos sólidos por pessoa por dia. Com o rápido crescimento da população e a urbanização, se espera que a geração de resíduos urbanos se eleve para 2.2 bilhões de toneladas até 2025 (The World Bank, 2017).

Os aterros sanitários são uma das principais formas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no mundo, tendo em vista que é fundamentada em critérios de engenharia que objetivam evitar a poluição atmosférica, a poluição dos recursos hídricos e do solo, bem como danos a saúde pública (NBR 8419/1992).

Decorrente à crescente geração de resíduos sólidos urbanos, os aterros sanitários têm sido regularmente ampliados com o intuito de aumentar a sua vida útil visto que existe uma escassez de áreas adequadas, bem como uma dificuldade de licenciar novas áreas devido aos impactos ambientais que o empreendimento gera. Muitas dessas elevações são realizadas com alteamentos sucessivos, acarretando assim em análises de estabilidade mais complexas e rigorosas, além de campanhas de intenso monitoramento (Motta, 2011). Outro ponto de

destaque é em relação às drenagens de líquidos e gases, que podem influenciar no comportamento da massa devido ao aumento das poropressões.

No Brasil, as principais propriedades mecânicas dos RSU são até então estimadas através de ensaios convencionais desenvolvidos para solos, fundamentando-se nas teorias e conceitos da Mecânica dos Solos. Tal situação é explicada por ausência de dados consistentes e de uma metodologia específica para a obtenção de dados experimentais para a análise dos RSU.

Assim, elevações de aterros acima do que se realmente aceita em situação de campo, inclinação e compactação inadequadas, juntamente com a falta de um sistema eficaz de drenagem, a ausência de um monitoramento geotécnico, entre outros, constituem fatores que propiciam a ocorrência de possíveis acidentes de escorregamento em aterros sanitários.

Com este panorama, o presente trabalho realizou modelagens de estabilidade de talude de aterros que sofreram o processo de ruptura, que tiveram a ruptura simulada, ou até mesmo que não romperam. Através da modelagem dos mesmos no software GeoSlope, com uso dos parâmetros geotécnicos, geometria e nível piezométrico, foi possível realizar a retroanálise da cunha de ruptura que cada um dos aterros apresentava, assim como a determinação do fator de segurança, sendo este de extrema importância para a verificação da estabilidade do talude do aterro sanitário.

Metodologia

Áreas de estudos

Foram utilizados neste trabalho dados de quatro aterros sanitários reportados pelas seguintes literaturas: IPT (1991), Strauss (1998) e Oliveira (2002). Os aspectos e características relativos aos aterros estão descritos nos itens seguintes.

Geometrias dos taludes avaliados

Para iniciar as avaliações foi necessária a implementação das geometrias dos taludes no software GeoSlope/W, 2018, em sua versão estudante. As Figuras 1, 2, 3 e 4 representam a disposição do Aterro Sanitário de Bandeirantes, do Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre, do Aterro Controlado de Canabrava e do Aterro Sanitário Metropolitano Centro, respectivamente, nas quais são identificadas a camada de resíduos e a camada de solo. Como não havia registros topográficos na região antes da ruptura do Aterro Controlado de Canabrava (Figura 3), Oliveira (2002) realizou algumas considerações para a determinação da geometria, tais como: se admitiu que as inclinações do talude eram 1V:2H, que é a usualmente utilizada em aterros sanitários; bem como foi considerado que existiam bermas a cada 5 metros de alturas; além de que a forma definida deveria gerar um volume de 1200 m³, que corresponde ao volume da ruptura.

Com as geometrias estabelecidas se realizou a determinação dos parâmetros geotécnicos de resistência nas camadas, como dispoto a seguir.

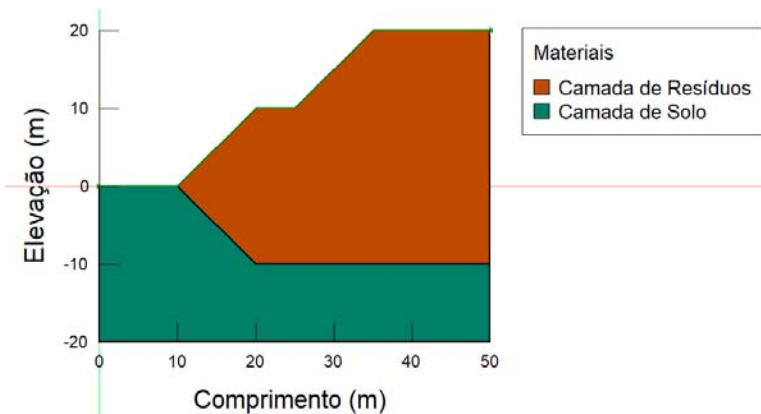


Figura 1. Geometria do Aterro Sanitário de Bandeirantes.

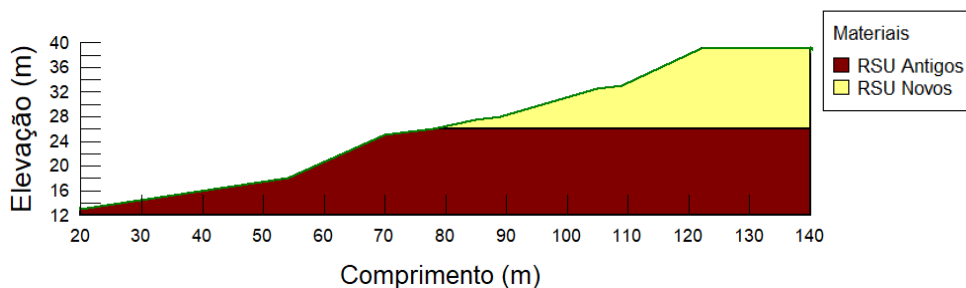


Figura 2. Geometria do Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre.

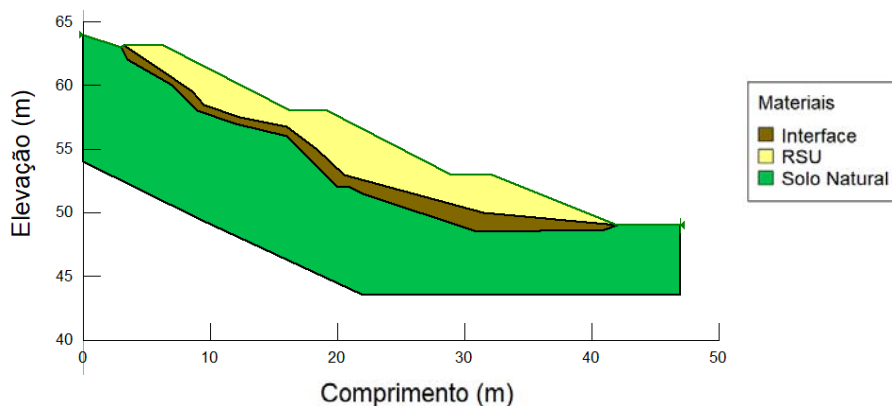


Figura 3. Geometria do Aterro Controlado de Canabrava.

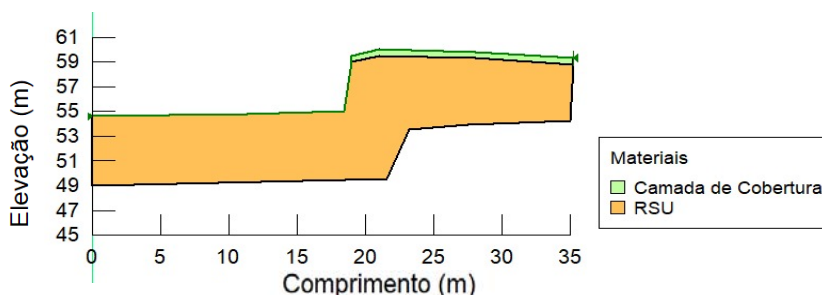


Figura 4. Geometria do Aterro Sanitário Metropolitano Centro.

Parâmetros geotécnicos

Nas Tabelas 1, 2, 3 e 4 são apresentados os parâmetros geotécnicos dos seguintes aterros: Aterro Sanitário de Bandeirantes – ITP (1991); Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre – Strauss (1998); Aterro Controlado de Canabrava – Oliveira (2002) e Aterro Sanitário Metropolitano Centro – Oliveira (2002).

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos da camada de resíduos e de solo do Aterro Sanitário de Bandeirantes.

Camadas	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Camada de Resíduos Sólidos	10	15	30
Camada de Solo	16	10	20

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos das camadas de resíduos do Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre.

Camadas	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
RSU Novos	7.50	0	35
RSU Antigos	7.50	0	31

Tabela 3. Parâmetros geotécnicos das camadas do Aterro Controlado de Canabrava.

Camadas	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Camada de Resíduos Sólidos	7.00	< 2	15° - 35
Camada de Interface	10.00	0	20
Solo Natural	12.00	20	30

Tabela 4. Parâmetros geotécnicos das camadas do Aterro Metropolitano Centro.

Camadas	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Camada de Resíduos Sólidos	11.60	4.2 – 7.9	15° - 35
Camada de Cobertura	16.00	5	28

Linha Piezométrica

A linha piezométrica que é a resultante da água de chuva percolada pela camada de cobertura e do chorume produzido pelo processo de decomposição de matéria orgânica, não teve a sua influência levada nas pesquisas do Aterro Sanitário de Bandeirantes e Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre, mas realizou-se a simulação tanto da situação em que tem-se a perfeita drenagem como a situação mais crítica, em que o sistema de drenagem é deficiente e existe um elevado nível piezométrico.

Para o Aterro Controlado de Canabrava houveram as situações em que a linha piezométrica passa na zona de iteração entre o solo e a massa de resíduos e a situação ideal, em que tem uma drenagem eficiente, portanto não há linha piezométrica. O mesmo fez-se para o Aterro Sanitário Metropolitano Centro, que mesmo tendo apresentado situação de boa drenagem, como relatou Oliveira (2002), teve a sua estabilidade avaliada com a elevação do nível de lixiviado.

Análise de estabilidade

As análises referentes à estabilidade dos taludes dos aterros de resíduos sólidos avaliados foram realizadas através do software SLOPE/W, da GeoSlope Internacional (2018), em sua versão de estudante. Vale destacar que o software não acopla análises da influência de biogás na estabilidade, e por isso a mesma não foi considerada, mas destaca-se a importância da mesma nos aspectos de estabilidade de talude de aterros de RSU.

Para a obtenção dos valores de FS (Fator de Segurança), utilizou-se o método que divide as superfícies dos taludes em fatias, escolhendo-se assim o de Bishop Simplificado (1955). Segundo Pereira (2013) o método de Bishop Simplificado apresenta um critério de confiança estatístico superior aos métodos de Janbu e Fellenius, justificando assim o uso deste método no presente trabalho.

Resultados

Análise do Aterro Sanitário de Bandeirantes

De acordo com o proposto no trabalho realizou-se a análise da estabilidade do Aterro Sanitário de Bandeirantes, que sofreu processo de ruptura, por meio do método de Bishop no GeoSlope. De acordo com a Figura 5, o talude com a simulação de perfeito funcionamento do sistema de drenagem, onde a camada de solo e a camada de resíduos não possuem seus componentes saturados, resultando em um fator de segurança de 1.677, com uma cunha de ruptura global apenas na massa de resíduos sólidos.

Já a Figura 6 representa a simulação da situação em que a linha piezométrica se encontra dentro da massa do aterro, seria uma situação onde o sistema de drenagem encontra-se obstruído. Utilizou-se a situação em que a linha piezométrica estava localizada a cerca de 2/3 da altura do

talude. Obteve-se assim, um fator de segurança de 1.055, em que a ruptura ocorreria não apenas na parte da massa de resíduos, como também parte da camada do solo sofreria o processo de ruptura.

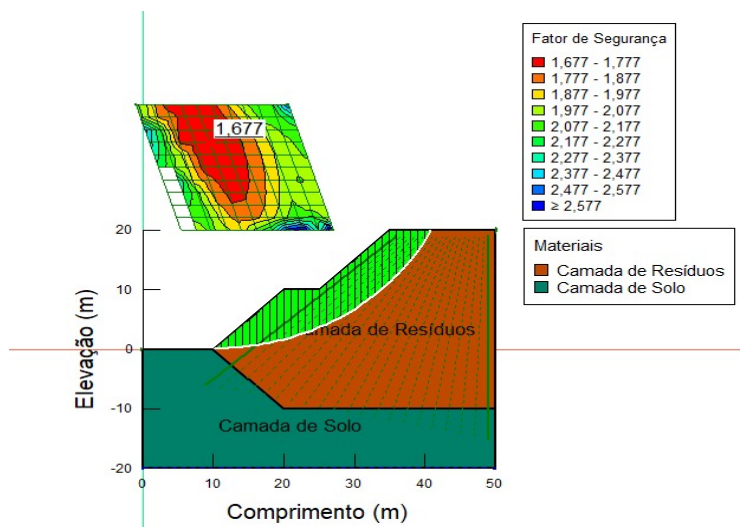


Figura 5. Cunha de ruptura do Aterro Sanitário de Bandeirantes para a situação com drenagem eficiente.

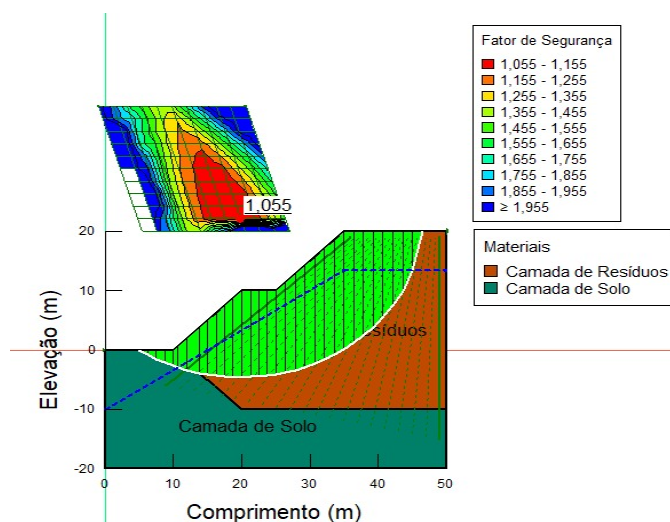


Figura 6: Cunha de ruptura do Aterro Sanitário de Bandeirantes para a situação com drenagem obstruída.

Ao se analisar os dois fatores de segurança encontrados pode-se verificar que o nível de piezométrico na massa do talude influencia na estabilidade do mesmo de modo a gerar uma diminuição no FS e um acréscimo na instabilidade do mesmo.

Análise do Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre

De modo semelhante, realizou-se a análise de estabilidade para o Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre, ressaltando-se que o mesmo não sofreu o processo de ruptura. Na Figura 7 está apresentado o FS encontrado através da análise no GeoSlope, para a condição de drenagem eficiente, o fator de segurança teve valor de 1.409 e a ruptura se apresenta de forma localizada, ocorrendo apenas na massa de resíduos sólidos mais antiga.

Como no caso do Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre a ruptura para o FS_{mín} apresentou uma superfície de ruptura de pequena espessura, foi necessária a avaliação da cunha de ruptura global para uma análise mais consistente da estabilidade do aterro. Na Figura 8, é apresentada uma cunha de ruptura geral, que ocorre para um fator de segurança de 3.106, e a mesma abrange tanto os resíduos sólidos antigos como os novos.

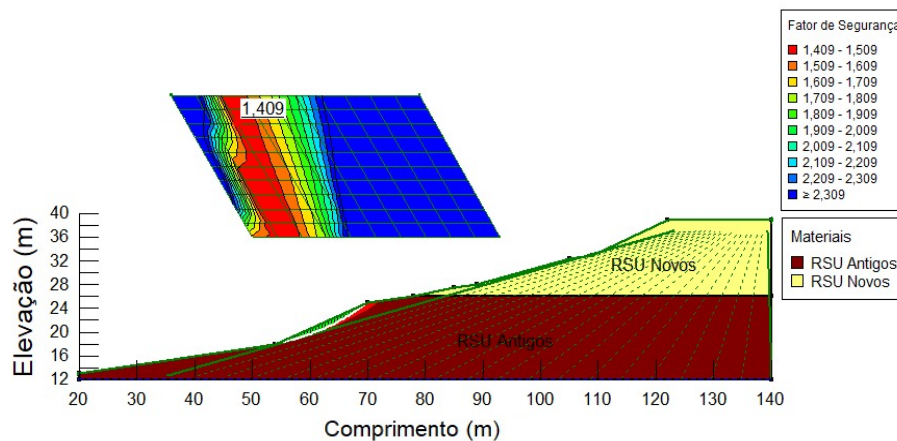


Figura 7. Cunha de ruptura local do Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre para a situação com drenagem eficiente.

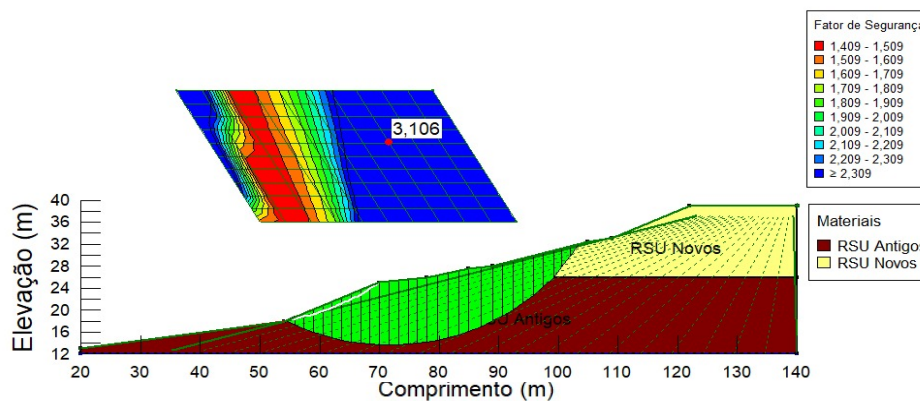


Figura 8. Cunha de ruptura global do Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre para a situação com drenagem eficiente.

Na sequência analisou-se também a situação em que o sistema de drenagem do aterro operaria de modo ineficiente, gerando um acúmulo de líquidos no interior da massa, onde a linha piezométrica se localiza a 2/3 da altura do talude. Para tal situação verificou que o fator de segurança sofre uma grande diminuição, que passa de 1.409 para 0.638.

Através da Figura 9 podemos ver o comportamento do talude, na qual a linha branca representa a o local por onde passa a cunha de ruptura da massa e as partes em vermelho, próximas a mesma, indicam a região que sofre influência, ou seja, ao ocorrer o processo de ruptura toda a massa de resíduos que se encontra abaixo da cunha de ruptura também será arrastada.

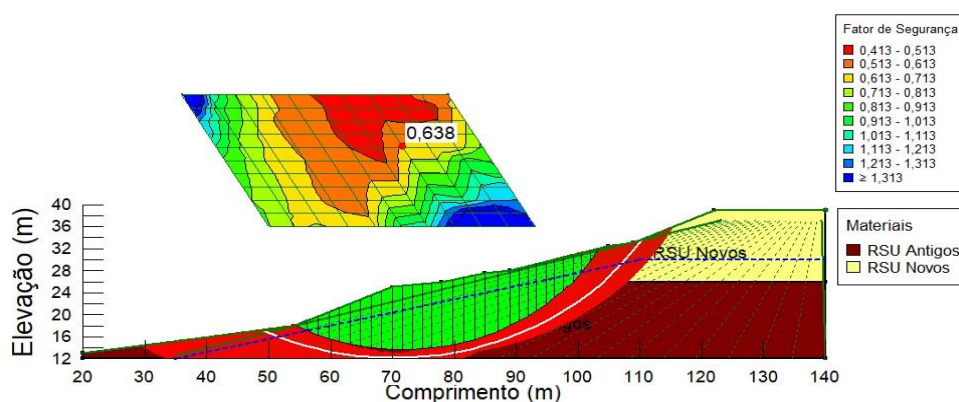


Figura 9. Cunha de ruptura do Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre para a situação com drenagem obstruída.

Nesse aterro o nível do acúmulo de lixiviado gera grande instabilidade do talude, porém o mesmo não sofreu o processo de ruptura, isso se deve ao sistema de drenagem eficiente que o aterro possui. Através dos resultados dessa análise vê-se a importância de um sistema de drenagem bem dimensionado e com funcionamento de forma eficiente.

Análise do Aterro Controlado de Canabrava

Para o Aterro Controlado de Canabrava, que sofreu o processo de ruptura, utilizou-se para a análise da estabilidade os parâmetros informados na Tabela 3, na qual a camada de resíduos sólidos apresenta uma variação com relação a coesão e ao ângulo de atrito, adotou-se respectivamente os valores de 1.5 kPa e 25°. A Figura 10 apresenta que o fator de segurança mediante análise no GeoSlope pelo método de Bishop, tendo o valor de 1.549, considerando uma situação de drenagem eficaz.

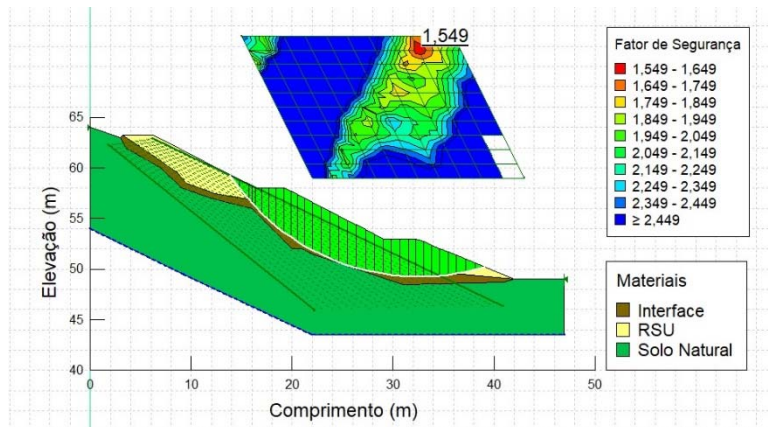


Figura 10. Cunha de ruptura do Aterro Controlado de Canabrava para a situação com drenagem eficiente.

Segundo Oliveira (2002), a camada de interface entre o solo natural e os RSU estava saturada, com isso realizou-se também a análise em que a linha piezométrica estaria localizada a 2/3 da altura do talude, a Figura 11 representa tal situação e nota-se que o fator de segurança diminuiu, sendo 1.145, e que a cunha de ruptura passa justamente na interface, indo de acordo com a situação ocorrida.

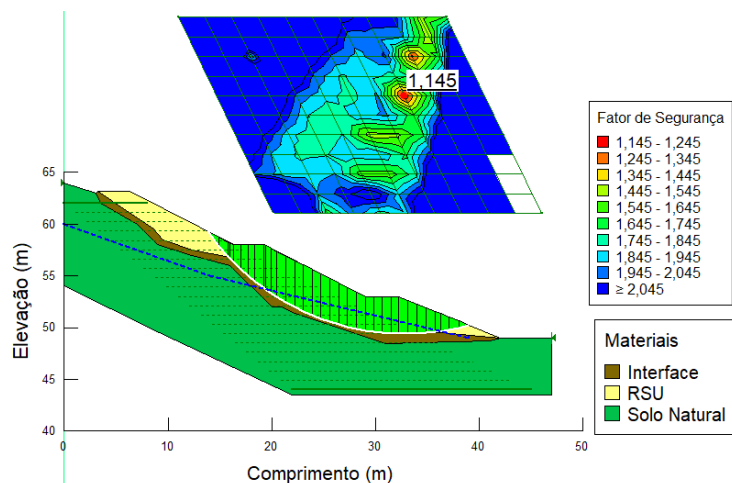


Figura 11. Cunha de ruptura do Aterro Controlado de Canabrava para a situação com drenagem obstruída.

Análise do Aterro Sanitário Metropolitano Centro

Para a análise da estabilidade do Aterro Sanitário Metropolitano Centro, foram utilizados como parâmetros para a camada de resíduos sólidos, a coesão com valor de 6.1 kPa e o ângulo de atrito

de 20º, ambos se encontram dentro do intervalo que Oliveira (2002) obteve na pesquisa desenvolvida no aterro. A Figura 12 apresenta a análise da estabilidade para o aterro, que teve a simulação da ruptura, nas condições da drenagem funcionando de modo eficaz.

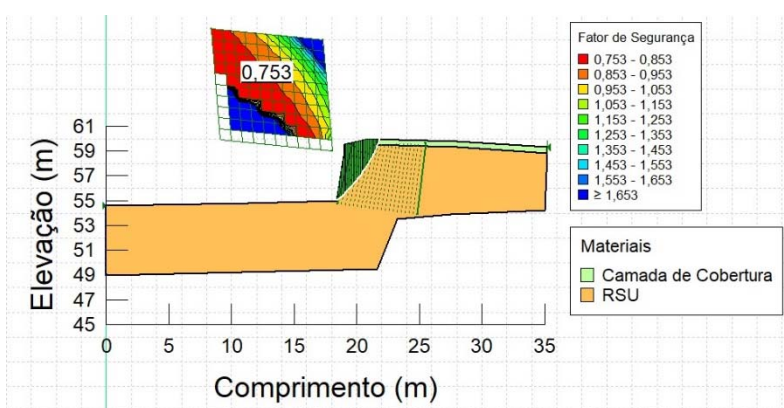


Figura 12. Cunha de ruptura do Aterro Sanitário Metropolitano Centro para a situação com drenagem eficiente.

Obteve-se o valor do fator de segurança de 0.753, caracterizando o talude como muito instável, e a ruptura se daria de modo localizado com uma cunha que ocorre justamente no local onde foi realizado o corte sub-vertical, porém possivelmente devido as trações que são adicionadas pelos materiais fibrosos tal ruptura não veio a ocorrer em campo.

Ao se realizar a análise com a situação da drenagem obstruída, ou seja, funcionando de modo ineficaz, o fator de segurança foi de 0.606, como mostra a Figura 13.

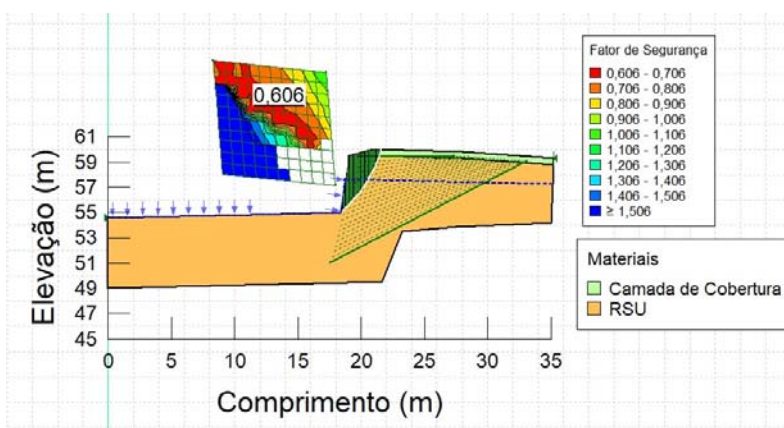


Figura 13. Cunha de ruptura do Aterro Sanitário Metropolitano Centro para a situação com drenagem obstruída.

A cunha de ruptura se deu de forma semelhante a situação com drenagem eficiente, isso pode ser explicado ao se analisar que o fator limitante na estabilidade dessa ruptura simulada é o corte que se deu de maneira praticamente vertical. Cabe ainda destacar que os valores encontrados representam um significado matemático, visto que para valores de FS menores que 1 a massa do talude já sofreu um processo de ruptura.

Comparação entre os fatores de segurança

De acordo com os fatores de segurança encontrados, montou-se a Tabela 5, que apresenta cada aterro estudados, os respectivos fatores de segurança com drenagem eficiente e drenagem obstruída, e a situação em que o aterro se encontrava em campo.

Tabela 5. Comparação entre os Fatores de Segurança.

Aterro estudado	FS com drenagem eficiente	FS com drenagem obstruída	Situação do Aterro
Aterro Bandeirantes	1.677	1.055	Rompido
Aterro Zona Norte de Porto Alegre	1.049	0.638	Não rompido
Aterro Canabrava	1.549	1.145	Rompido
Aterro Metropolitano Central	0.753	0.606	Não rompido (ruptura simulada)

Através da Tabela 5, foi realizada uma avaliação estatística da redução do FS nos aterros avaliados, o resultado é apresentado na Tabela 6, assim é possível analisar a redução que houve no fator de segurança com a elevação da linha piezométrica no aterro.

Tabela 6. Redução dos Fatores de Segurança.

Aterro estudado	Redução	Redução (%)
Aterro Bandeirantes	0.622	37.09
Aterro Zona Norte de Porto Alegre	0.411	39.18
Aterro Canabrava	0.404	26.08
Aterro Metropolitano Central	0.147	19.52

Analisando a Tabela 6, pode-se verificar que a redução no fator de segurança do aterro de Bandeirantes, que sofreu ruptura, foi de 37.09%; já para o aterro da Zona Norte de Porto Alegre, que não sofreu ruptura, a redução foi de 39.18%; para o aterro de Canabrava, que teve toda a sua massa de RSU rompida, a redução foi um pouco menor para o aumento do nível do lixiviado 26.08%; e para o Aterro Metropolitano Central a redução foi de 19.52%.

Com tais dados podemos perceber a influência direta que um sistema de drenagem ineficiente gera na estabilidade do aterro. Outro fato de destaque é a inclinação do talude, quanto mais íngreme maior a instabilidade do mesmo.

Conclusão

Diante dos resultados apresentados podemos destacar a importância que se tem o estudo do comportamento dos aterros de resíduos sólidos urbanos, tanto em sua condição de estabilidade, quanto em eventos de ruptura.

A importância da realização de retro-análises se dá pelo fato de que a compreensão elementos que culminaram em eventuais rupturas para aterros sanitários, possam ser utilizados como base para avaliação e monitoramento de futuros empreendimentos, reduzindo assim riscos ambientais e financeiros.

O presente trabalho realizou a retro-análise de quatro aterros e verificou a dificuldade que se tem em obter parâmetros geotécnicos que retratem o comportamento do aterro de forma fidedigna. Outro aspecto verificado foi o da influência que é gerada na estabilidade do talude devido ao acréscimo no nível de líquidos no interior da massa, em que as reduções tiveram a redução desde 19.52% para o Aterro Sanitário de Bandeirantes, 39.18% para o Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre, 26.08% para o Aterro Controlado de Canabrava e 19.52% para o aterro Sanitário Metropolitano Centro.

Referências bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) *NBR 8419: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=2584>
- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1991) *Relatório nº. 29956, Levantamento e análise das causas do escorregamento de massa de lixo no Aterro Bandeirantes – AS-1*. São Paulo.
- Kaza, S., Yao, L. C.; Bhada-Tata, P.; Van Woerden, F.(2018) *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development*; Washington, DC: World Bank. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Motta, E. Q. (2011) *Avaliação da Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos com Codisposição de Lodo de Tratamento de Esgoto através de Ensaios de Cisalhamento Direto de Grandes Dimensões*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 190 pp.
- Oliveira, D. A. F. (2002) *Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, Distrito Federal, 154 pp.
- Pereira, T. S. (2013) *Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra*, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, RS, 77 pp.
- Strauss, M. (1998) *Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 122 pp.