

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Leonardo Alberto do Nascimento

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE UM ATERRO SANITÁRIO DE
GRANDE PORTE**

Santa Maria, RS
2022

Leonardo Alberto do Nascimento

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE UM ATERRO SANITÁRIO DE GRANDE
PORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Civil, da Universidade Federal de Santa
Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Magnos Baroni

Santa Maria, RS
2022

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha mãe,
Fabiana, que não mediu esforços
para me dar as melhores
oportunidades que pôde.*

AGRADECIMENTOS

Eu não chegaria até aqui sem as pessoas que me deram suporte para tal.

Agradeço à minha família por apoiar-me em todas decisões que tomei e vibrar comigo em minhas conquistas, especialmente à minha mãe, Fabiana, e seu companheiro, Juraci.

Agradeço à minha irmã, Nathália, que mesmo a distância, sempre esteve comigo para o que eu precisasse.

Agradeço aos meus amigos pelo auxílio e por momentos de descontração muito necessários.

Agradeço ao meu orientador, Magnos, por acreditar no meu potencial, pela disposição para compartilhar seu conhecimento e pelo excelente profissional que é.

Agradeço ao pessoal da Prémil, pelas oportunidades que me foram oferecidas e por serem flexíveis e compreensivos para que eu pudesse realizar este trabalho.

Agradeço ao pessoal da CRVR de Minas do Leão, pela disposição para me tirar dúvidas e pelos dados fornecidos.

Agradeço à Neyla, por estar sempre ao meu lado, me apoiar em todas decisões, aturar meu mau humor e corrigir meus vícios de português.

Agradeço a todos que me auxiliaram nessa jornada.

RESUMO

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE UM ATERRO SANITÁRIO DE GRANDE PORTE

AUTOR: Leonardo Alberto do Nascimento
ORIENTADOR: Prof. Dr. Magnos Baroni

Aterros sanitários têm grande importância para a manutenção das cidades, pois estas encaminham seus resíduos sólidos para deposição final de forma correta, uma vez que os aterros são projetados para proteger o ambiente contra os produtos destes resíduos e, devido ao risco para o meio, seu monitoramento geotécnico e ambiental são imprescindíveis. O projeto trata da modelagem tridimensional e análise de estabilidade de um aterro sanitário de grande porte através de ferramentas computacionais a fim de verificar a viabilidade do uso do software Rocscience Slide3 - 3D Limit Equilibrium Analysis for Slopes. A modelagem tridimensional do aterro sanitário tem como base o levantamento topográfico e o uso do software Autodesk AutoCAD Civil 3D para refinamento dos dados possibilitando a manipulação no Slide3. O trabalho contempla dois métodos de análise de estabilidade de taludes - Bishop Simplificado e Morgenstern-Price - visando a comparação entre os resultados obtidos frente ao comportamento do aterro sanitário quando atribuídos parâmetros geotécnicos arbitrários sobre a variação do coeficiente ru no maciço. As análises de estabilidade do aterro foram focadas no lado leste a fim de abrangerem três taludes diferentes - norte, leste e sul - possibilitando a comparação do comportamento em diferentes áreas frente ao mesmo coeficiente ru .

Palavras-chave: Modelagem tridimensional; Estabilidade de taludes; Aterros Sanitários; Slide3;

ABSTRACT

THREE-DIMENSIONAL MODELING OF A LARGE SANITARY LANDFILL

AUTHOR: Leonardo Alberto do Nascimento

ADVISOR: Prof. Dr. Magnos Baroni

Sanitary landfills are of great importance for the maintenance of cities, because they send their solid waste to final disposal correctly, once landfills are designed to protect the environment against the effluents of these wastes and, due to the risk to the environment, their geotechnical and environmental monitoring are essentials. The project is about the three-dimensional modeling and stability analysis of a large landfill through computational tools in order to verify the feasibility of using the software Rocscience Slide3 - 3D Limit Equilibrium Analysis for Slopes. The three-dimensional modeling of the landfill is based on the topographic survey and the use of Autodesk AutoCAD Civil 3D software to refine the data, enabling manipulation in Slide3. In this work are considered two methods of slope stability analysis - Bishop Simplified and Morgenstern-Price - aiming to compare their results in relation to the landfill behavior when arbitrary geotechnical parameters are assigned on the variation of the ru coefficient in the massif. The landfill stability analyzes were focused on the east side in order to cover three different slopes - north, east and south - allowing the observation of comparisons of behavior in different areas against the same ru coefficient.

Keywords: Three-dimensional modeling; slope stability; sanitary landfill; Slide3;

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2	OBJETIVOS	2
1.2.1	Objetivo geral.....	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	ESTRUTURA DO PROJETO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	ATERROS SANITÁRIOS.....	3
2.2	LEVANTAMENTO PLANIALTIMÉTRICO.....	5
2.3	TALUDES E MOVIMENTOS DE MASSA.....	5
2.4	ESTABILIDADE DE TALUDES	7
2.5	MÉTODOS DE ANÁLISES DE ESTABILIDADE	8
2.5.1	Método de Bishop	11
2.5.2	Método de GLE/Morgenstern-Price.....	13
2.6	PARÂMETROS DOS MATERIAIS	13
2.6.1	Resistência ao cisalhamento.....	14
2.6.2	Pressão na água	16
2.7	SOFTWARES UTILIZADOS	17
2.7.1	Autodesk Autocad Civil 3D.....	18
2.7.2	Rocscience Slide 3 – 3D limit equilibrium analysis for slopes.....	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1	ATERRO SANITÁRIO ANALISADO.....	19
3.2	DADOS TOPOGRÁFICOS.....	20
3.3	MODELAGEM DO MACIÇO	22
3.4	DADOS DE ENTRADA	24
4	RESULTADOS	26
4.1	MODELO TRIDIMENSIONAL	26
4.2	ANÁLISE DE ESTABILIDADE	27
5	CONCLUSÃO	38
5.1	MODELAGEM TRIDIMENSIONAL	38
5.2	ANÁLISES DE ESTABILIDADE	38
5.3	CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	38

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com a NBR 8419 (ABNT, 1992), os aterros sanitários são uma tecnologia de deposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) realizados de modo seguro, minimizando os impactos ao ambiente de implantação do projeto - assim, detendo importante função para a manutenção das cidades. Estruturas dessa magnitude de importância social e ambiental devem ser implementadas visando o máximo de cuidado possível, uma vez que seu colapso acarretará em severos danos ambientais, como a contaminação do lençol freático e dispersão superficial de resíduos. Portanto, é imprescindível as corretas análises para o funcionamento do aterro sanitário.

Neste tipo de estrutura, é essencial o monitoramento constante, mesmo em aterros projetados de modo correto, seguindo as normativas técnicas e ambientais. Contudo, como cita Berríos (2010), muitos aterros são erroneamente planejados e por vezes carentes de um acompanhamento técnico - principalmente se tratando de pluviometria - ocasionando o colapso da estrutura. A manutenção dos aterros sanitários engloba vários fatores como: monitoramento ambiental (águas subterrâneas e superficiais, qualidade do ar, poluição sonora, lixiviação, geração de chorume, gases e dados pluviométricos) e monitoramento geotécnico (poropressão, estabilidade, recalques verticais e deslocamentos horizontais).

Trabalhos nesta área, como o de Remédio (2014), chegam a resultados satisfatórios para análise de estabilidade através de softwares de análise bidimensional. Porém, como o mesmo cita, com limitações do software. Há uma grande deficiência no Brasil quanto a essas análises e como diz Benvenuto et al., (2019), a falta de planejamento e monitoramento de aterros sanitários atrelados a implantação empírica de taludes acaba por gerar catástrofes.

Trazendo uma alternativa aos métodos de análise de estabilidade atuais, que em grande parte são realizadas por modelagens bidimensionais, neste trabalho será utilizado o software *Rocscience Slide3 - 3D Limit Equilibrium Analysis for Slopes*, ainda pouco contemplado em literaturas nacionais, a fim de viabilizar a análise de estabilidade de taludes de um aterro sanitário de grande porte.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral a modelagem tridimensional de um aterro sanitário de grande porte, objetivando a análise de estabilidade de taludes.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do projeto englobam:

- Realizar a modelagem tridimensional do aterro sanitário com a utilização dos softwares: Autodesk AutoCAD Civil 3D e Rocscience Slide3 - 3D Limit Equilibrium Analysis for Slopes;
- Verificação da verossimilidade da modelagem obtida;
- Análise de estabilidade dos taludes por meio de Métodos de Equilíbrio Limite (MEL) e modelagem numérica;
- Avaliar a variação dos fator de segurança com a variação da poropressão;
- Verificar a viabilidade do uso do software Rocscience Slide3 para modelagem e análise de estabilidade;

1.3 ESTRUTURA DO PROJETO

O projeto é composto de cinco capítulos:

Capítulo 1 - Apresenta a introdução sobre o tema do trabalho, justificativa para realizá-lo e objetivos geral e específicos a alcançar.

Capítulo 2 - Traz a tona conceitos para a compreensão do trabalho realizado.

Capítulo 3 - Explica os materiais e seus parâmetros e os métodos utilizados para análise.

Capítulo 4 - Expõe os resultados alcançados com as análises do software e compara os métodos de análise.

Capítulo 5 - Conclusão sobre as análises realizadas e considerações para futuros trabalhos na área.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item serão apresentados brevemente os seguintes temas:

- Aterros sanitários;
- Levantamento planialtimétrico;
- Taludes e movimentos de massa;
- Estabilidade de taludes;
- Métodos de análise de estabilidade;
- Parâmetros dos materiais;
- Softwares utilizados;

Os quais darão embasamentos teóricos aos assuntos abordados na metodologia, resultados e conclusões deste trabalho.

2.1 ATERROS SANITÁRIOS

Resíduos sólidos são a matéria em estado sólido e semi-sólido oriundos de atividades antrópicas e possuem diferentes classificações quanto a sua origem (NBR 10004, 1992). Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são uma subcategoria que engloba o descarte de residências e similares e, como afirma Zanta e Ferreira (2003), de composição inerte a materiais de periculosidade ambiental, os quais devem ser corretamente destinados.

Os aterros sanitários (AS), dentre as formas de deposição final do RSU - lixões, aterros controlados e aterros sanitários -, são os que melhores apresentam uma solução segura pois, segundo a NBR 8419 (ABNT, 1992), os aterros são um método de deposição final de RSU de modo seguro e minimizam os impactos ao ambiente de implantação do projeto - assim, detendo importante função para a manutenção das cidades.

Toda infraestrutura de um AS deve ser projetada a fim da otimização do espaço e geografia para atender a segurança - da estrutura e da operação - e armazenamento do RSU pelo maior tempo possível. O projeto abrange a impermeabilização e drenagem em toda sua composição - superfície, camadas intermediárias e base - a fim de que os efluentes dos RSU (gases e lixiviados) tenham correta destinação e não haja a

contaminação do ambiente. (ZUQUETTE, 2015)

Atualmente a impermeabilização é realizada principalmente por uma geomembrana - material sintético de permeabilidade extremamente baixa - que deve resistir: às ações dos efluentes do RSU, tanto químicas quanto físicas; ao intemperismo do ambiente; aos esforços oriundos do trabalho exercido sobre o aterro e material deposto; e trabalhabilidade em condições extremas para reparos, uma vez que a falha da impermeabilidade gera danos severos ao meio. (LANGE et al., 2008)

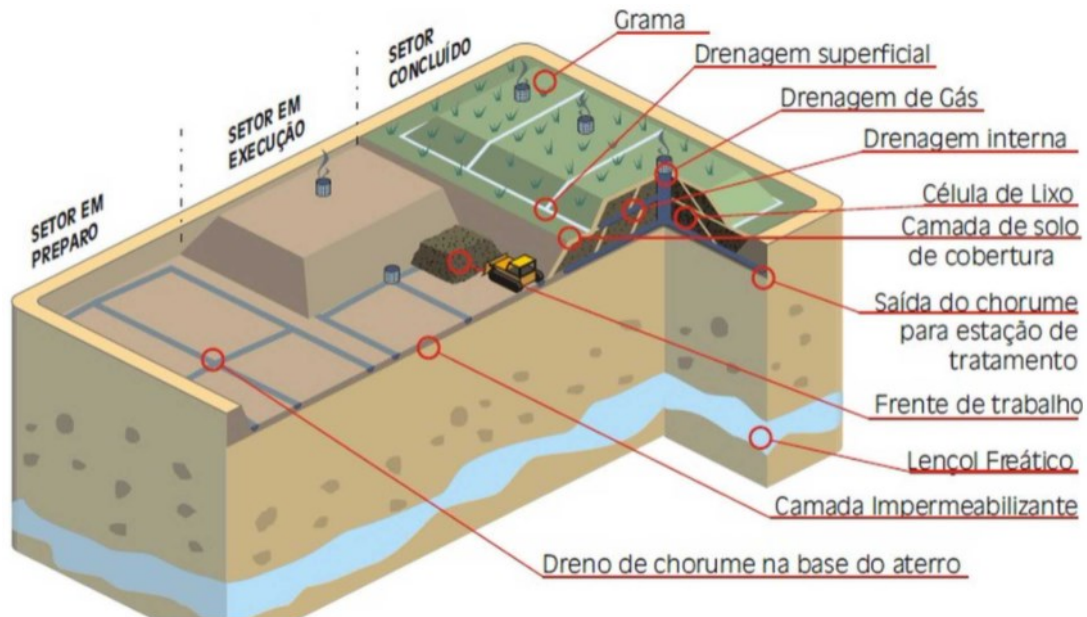
Ainda de acordo com Zuquette (2015, p. 213):

Além dos elementos componentes do aterro propriamente dito, um aterro sanitário deve incorporar instrumentos que permitam acompanhar o seu desempenho, como poços de observação para monitorar a qualidade das águas subterrâneas e instrumentos que possibilitem uma avaliação geotécnica do maciço formado, como medidores de deslocamentos e de pressões em razão dos gases e dos líquidos.

Lange et al., (2008) explica que o monitoramento tem dois parâmetros: ambiental, contemplado pela supervisão da qualidade da água e do ar, poluição sonora, líquidos e gases efluentes; e geotécnico. O acompanhamento geotécnico visa a obtenção de dados para análise da estabilidade dos taludes e a estimativa da vida útil do aterro através do controle de: deslocamentos verticais e horizontais do aterro com marcos superficiais; níveis de líquidos e gases presentes através de piezômetros; inspeções de campo com visitas técnicas a fim de encontrar patologias de ambos parâmetros de monitoramento; controle tecnológico dos insumos e ferramentas utilizados nas fases de implantação e operação;

Na Figura 1, é possível observar os principais constituintes de um aterro sanitário - sua impermeabilização, os drenos de chorume de base, interna, de gás e de escoamento superficial, células de resíduos e camada de cobertura - e as etapas de funcionamento: preparo, execução e conclusão. (MACHADO; FERREIRA, 2018)

Figura 1 - Corte da seção de um aterro sanitário.



Fonte: Machado e Ferreira (2018)

2.2 LEVANTAMENTO PLANIALTIMÉTRICO

O levantamento topográfico é decomposto em duas vertentes: o planimétrico, o qual determina pontos no eixo cartesiano simples - X e Y - e o altimétrico que objetiva numerar altitudes de pontos. A união dos dados destes dois, gera o levantamento topográfico planialtimétrico, que possibilita a visualização tridimensional das informações obtidas em campo.

A planialtimetria faz parte do acompanhamento do aterro sanitário em todas suas fases de operação. Os dados topográficos devem incluir o levantamento fundo da estrutura, das camadas intermediárias na fase de operação e da superfície final do AS, bem como seu levantamento após conclusão para controle de recalques superficiais.

Os levantamentos topográficos, principalmente em grande escala, são realizados através de veículos aéreos não tripulados (VANTs) e controlados remotamente, sendo drones os mais utilizados. Os VANTs possuem um sistema de posicionamento geográfico integrado além de sensores fotográficos, possibilitando a obtenção de dados de superfície terrestres de modo ágil e eficiente. (MELLO, 2020)

2.3 TALUDES E MOVIMENTOS DE MASSA

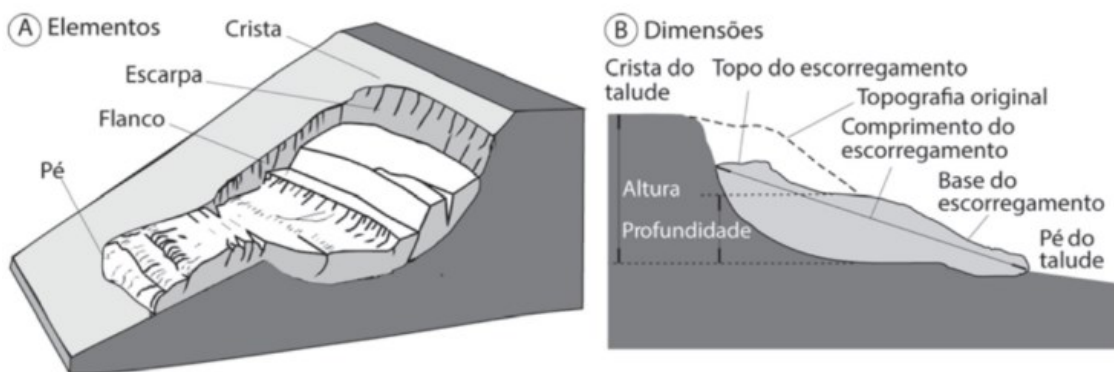
Segundo Gerscovich (2012), talude é o nome dado a superfícies de um maciço que tenham um ângulo de inclinação com o plano horizontal, podendo ter origem natural

ou antrópica, como montanhas e aterros, respectivamente. Estruturas de resíduos, como os aterros sanitários, requerem um cuidado adicional em sua concepção, uma vez que os rejeitos que fazem parte do material de construção da estrutura do talude possuem baixa resistência ao cisalhamento. Além disso, obras de taludes devem identificar a condição mais desfavorável da estrutura em questão de estabilidade, podendo ela ser durante a execução, operação ou após a conclusão dos trabalhos sobre o mesmo. Segundo Zuquette (2015), os movimentos gravitacionais de massas, vulgarmente designados por movimentos de terrenos, são fenômenos que frequentemente originam desastres ou catástrofes traduzidos por perdas econômicas e humanas, inúmeras vezes de grande envergadura.

Os movimentos de massa são deslocamentos de parte do volume de um solo, causado pela instabilidade de suas encostas, devido a formação de uma superfície através das tensões de cisalhamento. Esse plano é caracterizado pela perda das características do solo no ato da ruptura (GERSCOVICH, 2012).

Há diferentes propostas quanto à classificação dos movimentos de massa. No Brasil, uma classificação bem difundida é a de Augusto Filho (1992), que classifica os movimentos em rastejo, escorregamento, queda e corrida. O movimento que melhor se encaixa para o estudo de aterros sanitários é o escorregamento, observado na Figura 2, uma vez que possui uma superfície de ruptura bem definida, além de apresentar velocidade média (podendo ser alta) e ocorrência quando as tensões cisalhantes se equiparam a resistência de cisalhamento do solo e - podendo ser em cunha, circular, planar ou mistas.

Figura 2 - Componentes característicos de um volume escorregado.



2.4 ESTABILIDADE DE TALUDES

A estabilidade de taludes está ligada principalmente a três fatores: o peso do material, a presença de água em seu perfil e sua resistência ao cisalhamento, sendo os dois primeiros as principais causas dos movimentos de massas.

O estudo de estabilidade tem como objetivo final chegar a um valor do fator de segurança (FS), que segundo a NBR 11682 (2008) é dado pela razão entre a resistência ao cisalhamento oferecida pelo solo e as tensões cisalhantes exercidas sob a superfície, equação 1.

$$FS = \frac{S}{\tau} = \frac{c' + \sigma'.tg(\theta')}{\tau}$$

(1)

Onde:

S - Resistência ao cisalhamento do solo

τ - Tensão cisalhante

c' - Coesão efetiva

σ' - Tensão normal efetiva no plano de ruptura

θ' - Ângulo de atrito entre os grãos

Quando empregados modelos matemáticos para a avaliação de projetos de taludes, a NBR fornece valores padrões para o FS que, antes de ser realizada a análise, deve-se fazer o enquadro do projeto quanto ao risco contra vidas humanas e risco de danos materiais e ambientais:

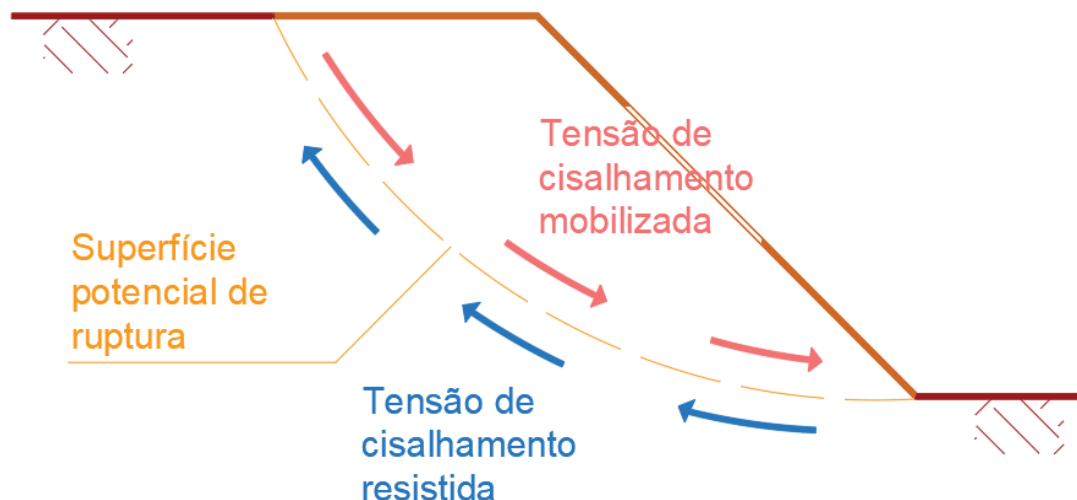
Tabela 1 - Fator de Segurança em Utilização de Modelos Matemáticos.

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1.5	1.5	1.4
Médio	1.5	1.4	1.3
Baixo	1.4	1.3	1.2

Fonte: Adaptado de ABNT, NBR 11682 (2008)

O fator de segurança igual a 1 acontece no momento da ruptura, onde as tensões cisalhantes se igualam a resistência ao cisalhamento do solo, podendo acontecer pelo aumento da primeira ou diminuição da segunda. A Figura 3 representa o que acontece na superfície no momento da ruptura (GERSCOVICH, 2012).

Figura 3 - Condição de ruptura por escorregamento.



Fonte: Adaptado de Gerscovich (2012)

2.5 MÉTODOS DE ANÁLISES DE ESTABILIDADE

As análises de estabilidade podem ser realizadas de dois diferentes modos: através do Método de Equilíbrio Limite (MEL) ou Método dos Elementos Finitos (MEF), como

mostra Sousa (2019). Este trabalho aborda dois métodos de análise de estabilidade por equilíbrio limite: o de Bishop e o de Morgenstern-Price.

A realização das análises de estabilidade através do MEL de acordo com Gerscovich:

O método consiste na determinação do equilíbrio de uma massa ativa de solo, a qual pode ser delimitada por uma superfície de ruptura circular, poligonal ou de outra geometria qualquer. O método assume que a ruptura se dá ao longo de uma superfície e que todos os elementos ao longo dessa superfície atingem simultaneamente a mesma condição de $FS = 1$. (Gerscovich, 2012. 87-88p)

Para o uso do MEL, é necessário o uso de hipóteses/simplificações, desde que não diminuam a confiabilidade do método e permitam chegar a análise de estabilidade (SOUSA, 2019).

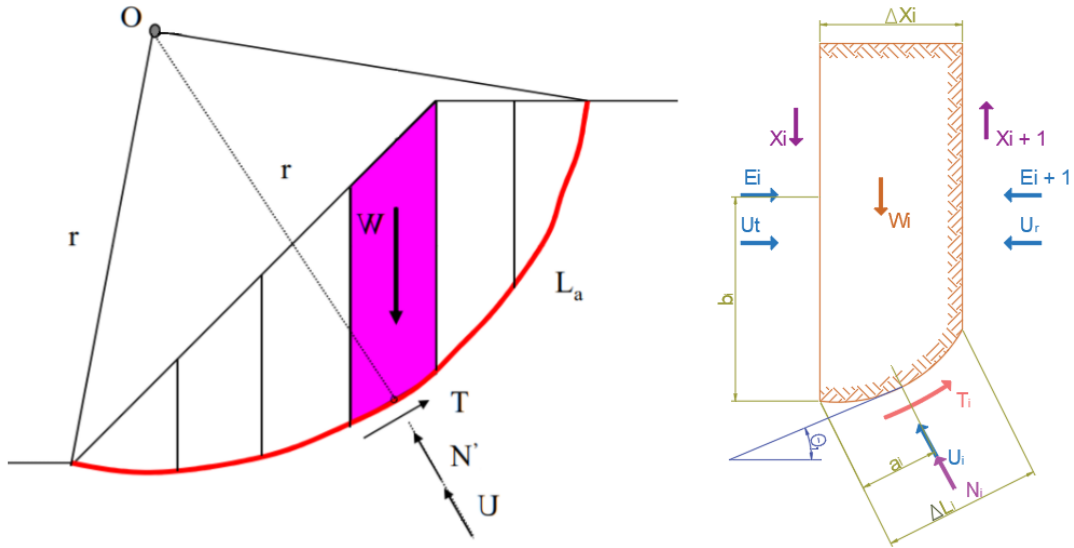
Dentro dos Métodos de Equilíbrios Limites, têm-se o métodos das fatias, Figura 4, onde a massa instável do solo é dividida em lamelas verticais e posteriormente realizada uma análise através de equações de equilíbrio de forças (1, 2 e 3) sobre cada fatia de modo individual a fim de definir os momentos resistido e atuantes na estrutura para o cálculo do fator de segurança, e não apresenta restrições quanto ao solo, forma do talude e análise, além de permitir a distribuição da poropressão a fim de encontrar a condição mais crítica da estrutura (GERSCOVICH, 2012).

$$\Sigma F_v = 0 \quad (2)$$

$$\Sigma F_h = 0 \quad (3)$$

$$\Sigma M = 0 \quad (4)$$

Figura 4 - Divisão do talude em fatias e forças atuantes em uma fatia.



Fonte: Adaptado de Gomes (2013) e Lambe & Whitman (1969)

Onde:

O - centro geométrico da superfície de ruptura

r - raio do arco da ruptura

L_a - comprimento do arco de ruptura

N' - esforço normal

U - poropressão

T - tensão cisalhante

W_i - peso da fatia

E_i - Resultante das tensões normais efetivas na face esquerda da fatia

X_i - Resultante das tensões cisalhantes na face esquerda da fatia

$E_i + 1$ - Resultante das tensões normais efetivas na face direita da fatia

$X_i + 1$ - Resultante das tensões cisalhantes na face direita da fatia

T_i - Resultante da resistência ao cisalhamento mobilizada ao longo da base da fatia

N_i - Resultante das tensões normais efetivas atuantes na base da fatia

U_t - Resultante das poropressões atuantes na face esquerda da fatia

U_r - Resultante das poropressões atuantes na face direita da fatia

U_i - Resultante das poropressões atuantes na base da fatia

θ_i - Inclinação da base

Δl_i - Comprimento da base

Δx_i - Largura da fatia

a_i - Distância da face esquerda da fatia até o ponto de aplicação N_i

b_i - Distância da face esquerda da fatia até o ponto de aplicação E_i

2.5.1 Método de Bishop

O método de Bishop Simplificado, baseado no método das fatias, considera uma superfície de ruptura circular e as forças atuantes entre as fatias, sendo mais fidedigno à realidade que seu antecessor Fellenius que, por não considerar as interações entre as fatias, acabava por encontrar valores de FS mais baixos. Essa interação considerada por Bishop se dá pelas parcelas normais às laterais das fatias- esforços horizontais apenas, que contribuem com a relação de momentos no cálculo do FS do talude (GERSCOVICH, 2012). Mesmo realizada essas simplificações, o método de Bishop é um dos mais usados na realização de análises de estabilidade, uma vez que sua implementação é simples e erros consideráveis vem a acontecer apenas em casos particulares, como círculos profundos e acentuadas poropressões (FABRICIO, 2006).

Partindo da equação 1, substituindo os esforços mostrados na Figura 5:

$$FS = \frac{\sum(c' \cdot \Delta l_i + N_i \cdot \text{tg}(\phi'))}{\sum W_i \cdot \text{sen}(\theta_i)}$$

(5)

E a partir da equação 2:

$$N_i = \frac{W_i - U_i \cdot \cos(\theta_i) - \frac{c' \cdot \Delta l_i \cdot \text{sen}(\theta_i)}{FS}}{(\cos(\theta_i) + \frac{\text{tg}(\phi') \cdot \text{sen}(\theta_i)}{FS})}$$

(6)

Substituindo (6) em (5):

$$FS = \frac{\sum\{c'.. \Delta li + [(Wi - Ui \cdot \cos(\theta i))] \cdot tg(\phi')\}}{m_0 \cdot \sum Wi \cdot \sin(\theta i)}$$

(7)

Onde, por efeito de simplificação:

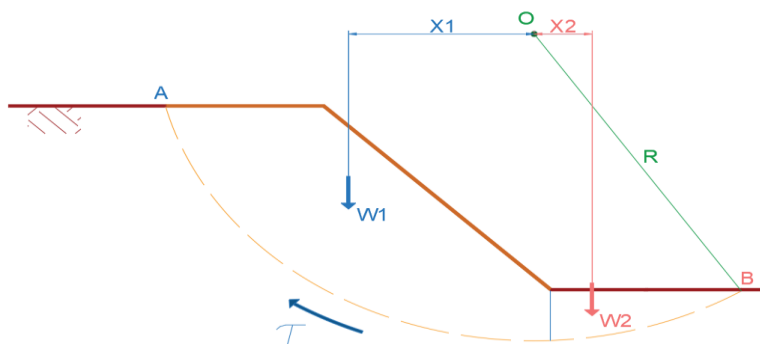
$$m_0 = \cos(\theta i) + \frac{tg(\phi') \cdot \sin(\theta i)}{FS}$$

(8)

Como há o FS como incógnita em (8) e este está presente em (7), o método de resolução é um processo de cálculo por iterações, realizado seguindo as etapas:

- Escolha da potencial superfície de ruptura circular de raio conhecido, vide Figura 5;
- Divisão do talude em fatias;
- Levantar os esforços e medidas da fatia, vide Figura 4;
- Calcular através de (7) o valor do FS até que o FS adotado inicialmente seja igual ao FS final; silva
- Traçar outras potenciais superfícies de ruptura;
- Adotar o menos FS entre as superfícies analisadas; (SILVA, 2013)

Figura 5 - Exemplo do método de Bishop.



Fonte: Adaptado de Gerscovich (2012)

Onde:

X1 e X2 - distância horizontal do centro geométrico da superfície de ruptura até o centro de gravidade das fatias

A e B - extremidades do arco da superfície de ruptura

2.5.2 Método de GLE/morgenstern-price

O método geral de equilíbrio (GLE) ou de Morgenstern-Price foi desenvolvido em 1945. É um método rigoroso e pode ser aplicado a qualquer geometria de superfície de ruptura (FABRÍCIO, 2016).

O método de GLE, assim como Bishop Simplificado, é resolvido por iterações. Porém, como o método atende todas as condições de equilíbrio e de fronteira, se trata de porções de tamanho infinitesimal e deve atender também a condições de contorno, o cálculo do fator de segurança é realizado com auxílio computacional devido sua complexidade (GERSCOVICH, 2012).

Para encontrar a tensão de cisalhamento (T) que exerce esforço na superfície de ruptura, uma relação entre esse esforço e os esforços normais nas laterais da fatia (E) é dada por:

$$T = \lambda \cdot f(x) \cdot E$$

(9)

Onde:

λ - Constante determinada pelo processo de cálculo iterativo

f(x) - Função arbitrada (recomenda-se a função arco seno, visto que é a que menor causa interferência nos valores de FS encontrados)

2.6 PARÂMETROS DOS MATERIAIS

Os resultados de análises de estabilidade de taludes, são obtidos em função dos parâmetros dos materiais constituintes e fatores do meio em que o mesmo está situado, sendo primordiais: o cálculo das máximas tensões cisalhantes resistidas pelo talude e a quantidade de água presente.

2.6.1 Resistência ao cisalhamento

De acordo com Pinto (2006), o cisalhamento - tensão gerada por forças tangenciais ao plano, tendendo a deformar o material - é majoritariamente a causa da ruptura dos solos, com exceção das rupturas por tensões de tração. A resistência ao cisalhamento é definida como a tensão cisalhante dada no momento em que ocorre a ruptura do plano e é função de dois fatores (GERSCOVICH, 2012): imbricamento (resistência ao deslocamento horizontal das partículas, proporcionalmente direta a densidade do solo) e a resistência dentre as partículas, dada por dois parâmetros: o ângulo de atrito entre os grãos e a coesão entre partículas do solo.

Pinto (2006) e Gerscovich (2012) analisam a coesão ou intercepto coesivo do material como uma cola, que atua entre as partículas e o atrito de forma análoga a um objeto sobre um plano, onde a força tangencial para mover o objeto depende da força aplicada sobre o mesmo e do coeficiente de atrito entre plano e objeto, fornecendo, no caso dos solos, a essência de sua resistência, em conjunto com a atração entre partículas. Esta atração entre partículas é vista de modo significativo apenas em solos argilosos e cimentados (por ação de intemperies ou antrópicas).

Há diferentes critérios que demonstram como se dá a ruptura do solo e como chegar a valores de tensões cisalhantes, os mais conhecidos são os de Mohr e Coulomb, que por serem equivalentes quanto a análise (PINTO, 2006), são expressos como o Mohr-Coulomb. A equação de Coulomb (10) mostra como chegar em valores de tensões cisalhantes e é expressa por:

$$\tau = c + \sigma \cdot tg(\phi) \quad (10)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento

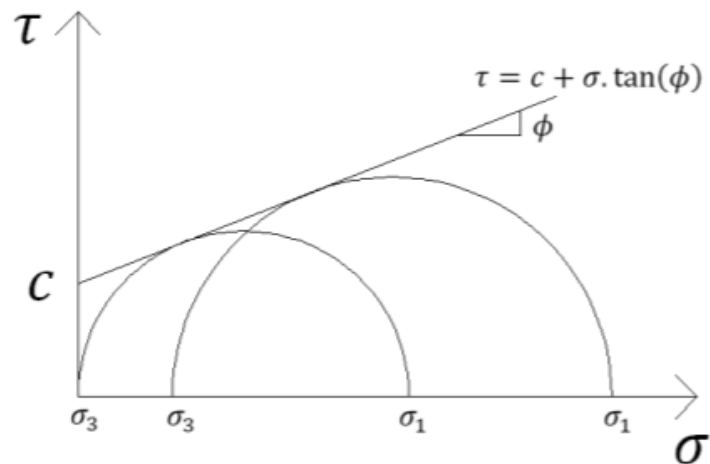
c = a coesão do material

σ = tensão aplicada na superfície

ϕ = ângulo de atrito entre os grãos

A equação de Coulomb é usada perante as envoltórias de Mohr, de forma a tornar sua análise, inicialmente complexa (por se tratar de curvas), uma reta, como demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Equação de Coulomb e envoltórias de Mohr.



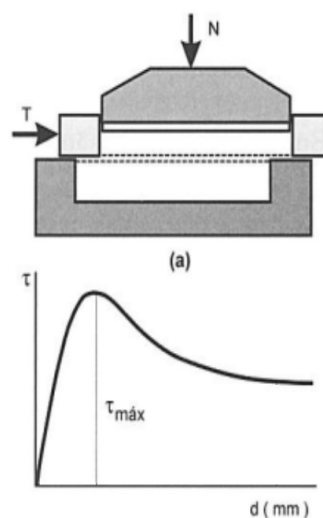
Fonte: Dias (2011)

Onde:

σ_1 e σ_3 são as tensões principais, pontos no eixo cartesiano onde a tensão de cisalhamento é igual a zero.

Para a obtenção da resistência ao cisalhamento do solo, o mesmo passa pelo ensaio de cisalhamento direto, ilustrado na Figura 7. É o método mais antigo para essa função e se baseia no critério de Coulomb. O ensaio é realizado colocando um corpo de prova do material dentro da prensa, aplicando uma força normal e posteriormente verificando a força cisalhante no momento da ruptura (PINTO, 2006).

Figura 7 - Ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: Pinto (2006)

Onde:

$\tau_{m\acute{a}x}$ = tensão máxima exercida na amostra antes da ruptura

Aplicados o esforço normal (N) e o esforço tangencial (T) acarretam em um deslocamento da parte superior da prensa, medido por uma prensa específica para o ensaio de cisalhamento direto. A força tangencial no momento da ruptura em razão da área do corpo de prova acaba por fornecer a tensão cisalhante máxima do material, o τ_{max} (PINTO, 2006).

2.6.2 Pressão na água

Os solos são um sistema trifásico constituídos por sólidos, ar e água. Parte dos esforços são transmitidos pelos grãos e dependendo da saturação do material, transmitidos pela água. Analisando, por um corte longitudinal - vide Figura 8 -, um terreno com a presença de água, há três zonas: saturada abaixo do nível de água, não saturada e saturada por capilaridade (GERSCOVICH, 2012).

Figura 8 - Perfil de poropressão.



Fonte: Gerscovich (2012)

Onde:

γ_w - peso específico da água

z - altura do perfil do solo

ψ - sucção

u - pressão neutra/poropressão

Em geral, é de interesse para a verificação da estabilidade de taludes a zona saturada, uma vez que a água gera pressões no maciço (em aterros sanitários essa pressão é gerada pelo chorume e biogás proveniente dos resíduos sólidos) que tendem a afastar os sólidos e ocasionam a diminuição da resistência do solo ao cisalhamento, pois, a água que preenche os vazios, não suporta tensões cisalhantes.

A consideração da pressão gerada pela água, poropressão, nas análises se torna mais viável através do uso do coeficiente ru , dado pela razão da pressão neutra frente às tensões verticais - provenientes do peso próprio-, demonstrado pela equação:

$$ru = \frac{u}{\sigma_v} = \frac{\gamma_w \cdot h_p}{\gamma_t \cdot Z} \quad (11)$$

Onde:

ru - razão de poropressão

σ_v - tensão vertical

h_p - nível de água do solo

γ_t - peso específico do solo

Devido sua facilidade de implementação e obtenção dos dados - através de piezômetros -, o uso do parâmetro de poropressão (ru) é amplamente usado em softwares de análises de estabilidade.

2.7 SOFTWARES UTILIZADOS

A seguir são brevemente descritos os dois softwares utilizados neste trabalho. Maiores informações sobre as potencialidades de utilização de ambos podem ser obtidas em <https://www.autodesk.com.br/products/civil-3d/overview> e <https://www.rocscience.com/software/slide3>.

2.7.1 Autodesk Autocad Civil 3D

Desenvolvido pela Autodesk, o software AutoCad Civil 3D é uma evolução do difundido AutoCAD. Usando a metodologia BIM (Building Information Modeling), voltado para projetos de engenharia civil, é focado em infraestrutura em grande escala (projetos de rodovias, terraplanagem, loteamentos, levantamentos topográficos e demais).

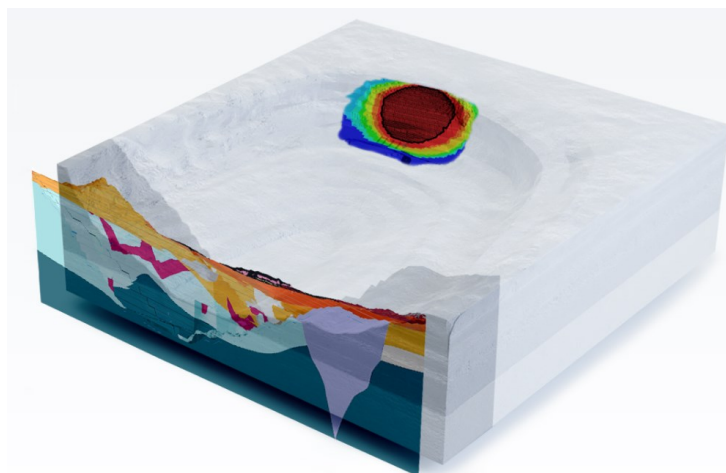
O software traduz dados topográficos, permitindo sua rápida manipulação, após levantamento em campo, com ferramentas como modelagem de superfícies e elevações, georreferenciamento, movimentação de terra, volumetria e possibilidade de instalação de plugins que aprimoram seu funcionamento.

2.7.2 Rocscience Slide 3 - 3d limit equilibrium analysis for slopes

Lançado em 2017 pela empresa Rocscience, o software Slide3 é baseado no software Slide2 (amplamente difundido em projetos) e é usado para verificar a estabilidade de taludes, modelando-os tridimensionalmente e tornando possível análises de geometrias complexas, Figura 9, que não são abrangidas por análises bidimensionais.

O programa conta com os seguintes métodos de análises: Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, GLE/Morgenstern-Price e Spencer. Com a possibilidade de inserção do fluxo de água em superfícies e redes, coeficiente ru (razão de poropressão); abalos sísmicos e escavações.

Figura 9 - Exemplo de Geometria Complexa Analisada no software.

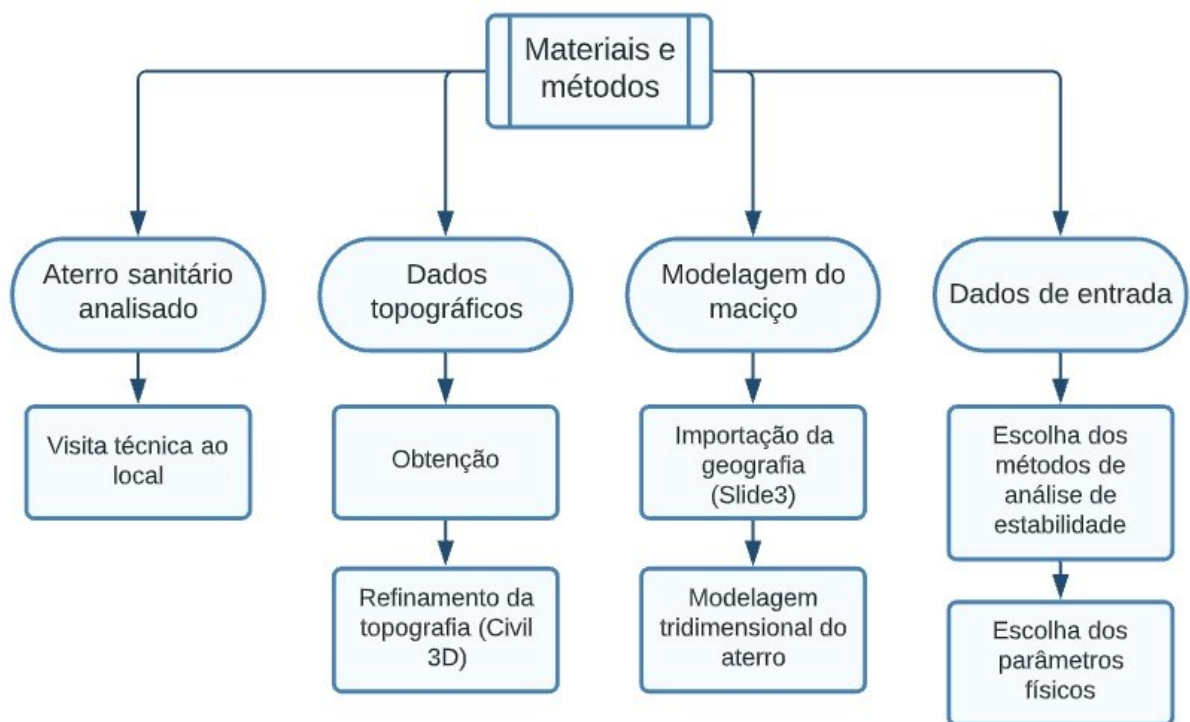


Fonte: Rocscience (2021)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os dados necessários e como foram tratados a fim de chegar na modelagem tridimensional do aterro sanitário e sua posterior análise. O fluxograma da Figura 10, elenca todas as etapas da pesquisa desenvolvida.

Figura 10 - Fluxograma das etapas de pesquisa.

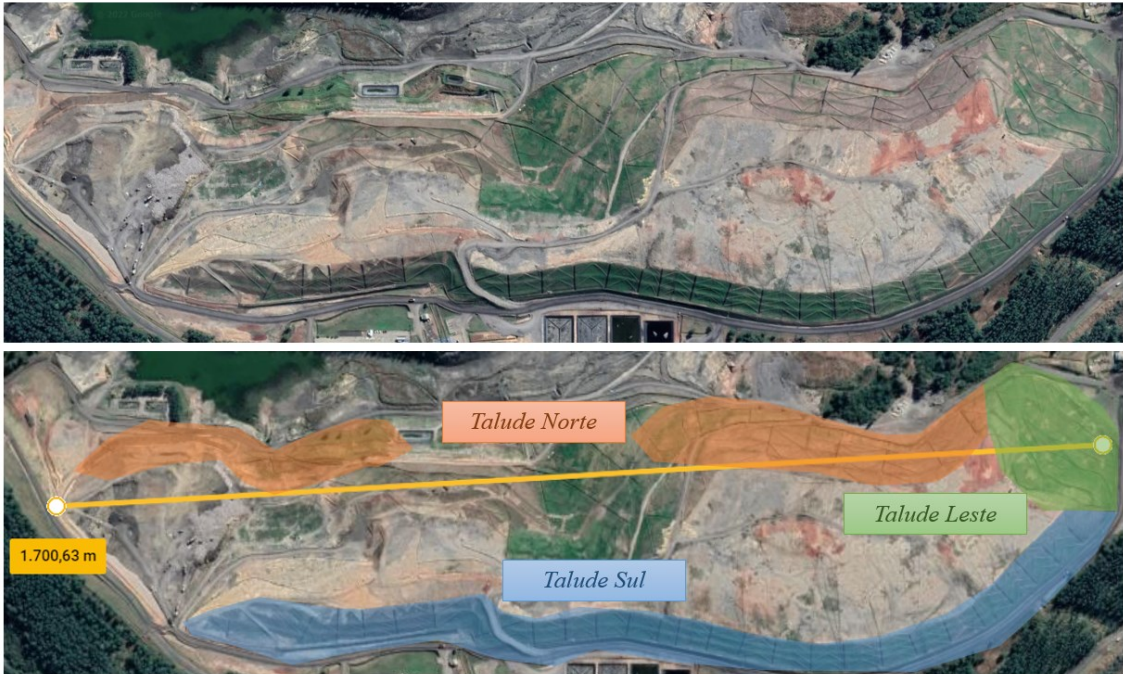


Fonte: Autor (2022)

3.1 ATERRO SANITÁRIO ANALISADO

O aterro sanitário (AS) de grande porte, que será modelado e analisado, é formado por diferentes fases de implantação, com resíduos sendo depositados em diferentes datas, em frentes de operação distintas, contando com locais onde a operação (depósitos de resíduos) já foi finalizada e regiões ainda em operação. Em ambos os locais, o aterro conta com monitoramentos diversos para garantir a segurança geotécnica e ambiental. Na Figura 11, é possível visualizar os taludes principais do aterro e sua extensão.

Figura 11 – (A) Fotografia da área do AS; (B) Divisões e comprimento do AS;



Fonte: Google Earth Web (2022) <<https://earth.google.com/web/>>. Acesso em: 21 jan. de 2022

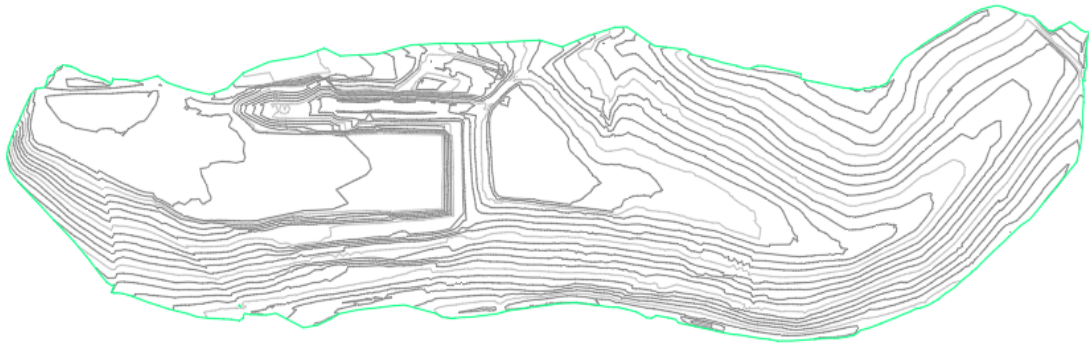
O AS conta com uma extensão de cerca de mil e setecentos metros. A realização da modelagem tridimensional da estrutura do AS é realizada apenas com os dados topográficos. A análise do aterro é feita posteriormente com a inserção dos parâmetros dos materiais e seleção dos métodos de análise

3.2 DADOS TOPOGRÁFICOS

Foi utilizado o levantamento topográfico planialtimétrico, empregado para o acompanhamento e monitoramento geotécnico dos deslocamentos superficiais do AS. A partir destes dados e com a utilização do software Civil 3D, foram extraídas as seguintes superfícies - Figuras 12, 13 e 14 - utilizadas como base da modelagem tridimensional:

Fundo do Aterro:

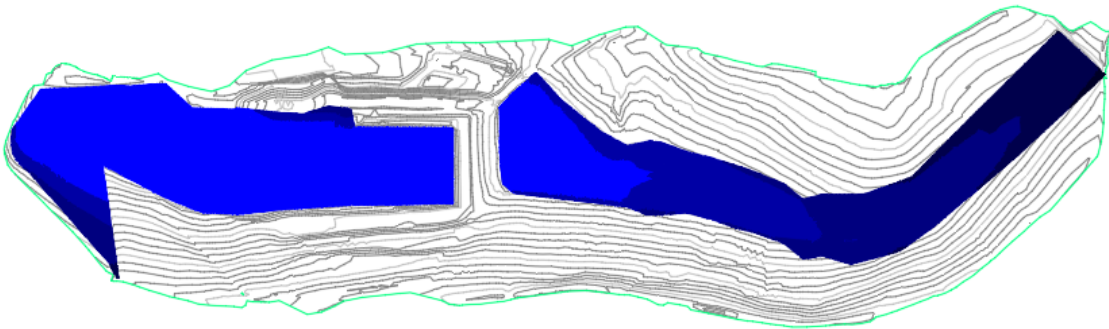
Figura 12 - Superfície de Fundo.



Fonte: Autor (2022)

Localização das Geomembranas no Fundo do Aterro:

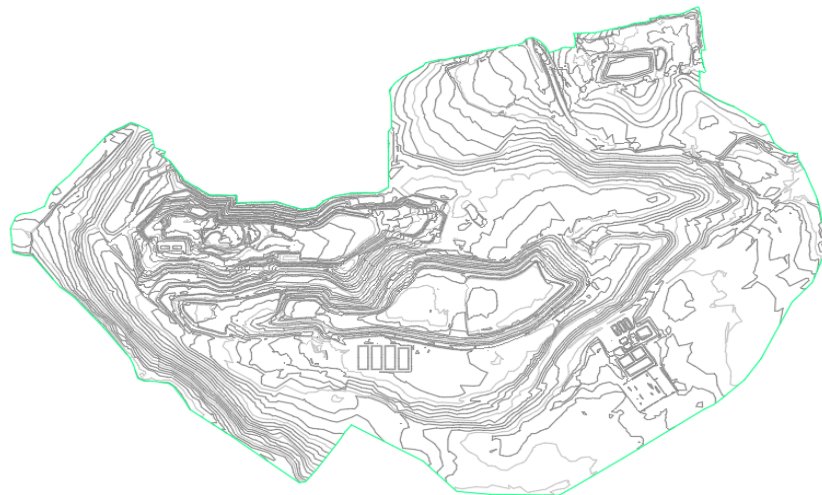
Figura 13 - Geomembranas do Aterro.



Fonte: Autor (2022)

Atual do Aterro:

Figura 14 - Superfície Atual.



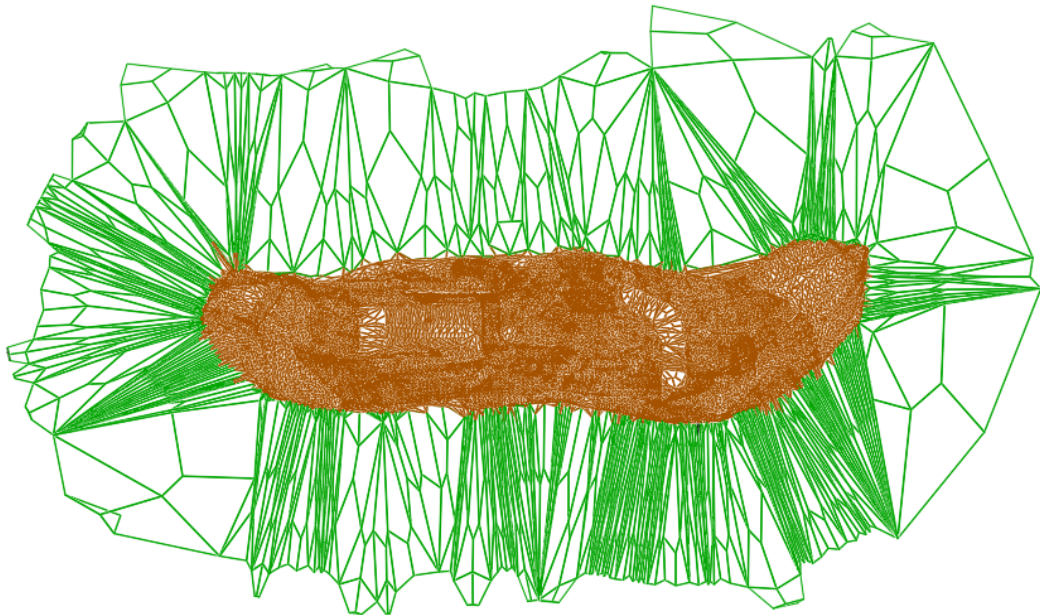
Fonte: Autor (2022)

As superfícies extraídas não podem ser lidas pelo software Slide3, uma vez que não são um objeto 3D, apenas a base para o software Civil 3D realizar a superfície tridimensional para importação.

3.3 MODELAGEM DO MACIÇO

Antes de iniciar a modelagem do aterro sanitário, é realizado um refinamento de todos os dados topográficos, ainda no software Civil 3D, a fim de os tornarem legíveis para o Slide3. Importada a topografia, é feito um deslocamento do limite da topografia e sua reclassificação, inicialmente tida como *SUPERFÍCIE TIN* - um grupo de curvas de nível - para uma *MALHA* - um sólido 3D. Na Figura 15, observa-se o fundo do aterro (linhas marrons) já como uma malha e com sua superfície expandida (linhas verdes).

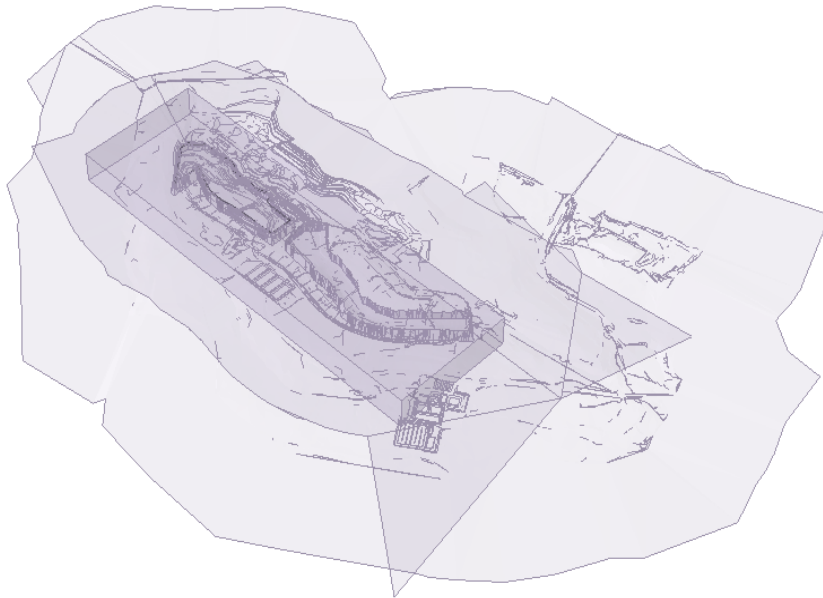
Figura 15 - Superfície refinada.



Fonte: Autor (2022)

A seguir é realizada a exportação dos dados para o software Slide3, a superfície sendo caracterizada como um sólido 3D, possibilita a leitura do arquivo pelo programa e a extrusão da sua curva de nível limite promove a correta criação dos volumes que representam os materiais entre as superfícies, evidenciado na Figura 16.

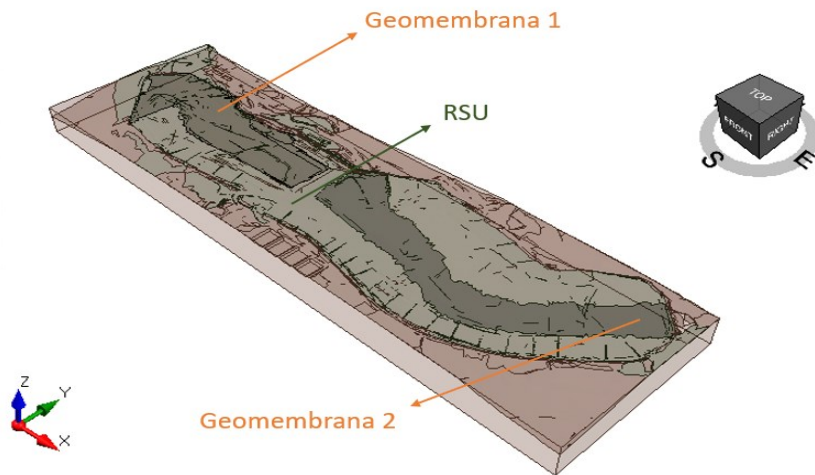
Figura 16 - Superfícies extrudadas para encaixe no volume externo.



Fonte: Autor (2022)

Após exportação e criação dos volumes externos, o software retira as arestas das superfícies não contempladas e gera os volumes. A “escavação do aterro”, pelo volume ocupado acima de sua estrutura, é realizada, não sendo atribuída a esta parte nenhum material e desligando sua visualização, chegando por fim a modelagem do aterro sanitário. Na Figura 17, as camadas que compõem o aterro sanitário estão com opacidade acentuada, fazendo com que se possa observar as geomembranas no fundo do AS e a superfície atual.

Figura 17 - Modelagem Finalizada do Aterro Sanitário.

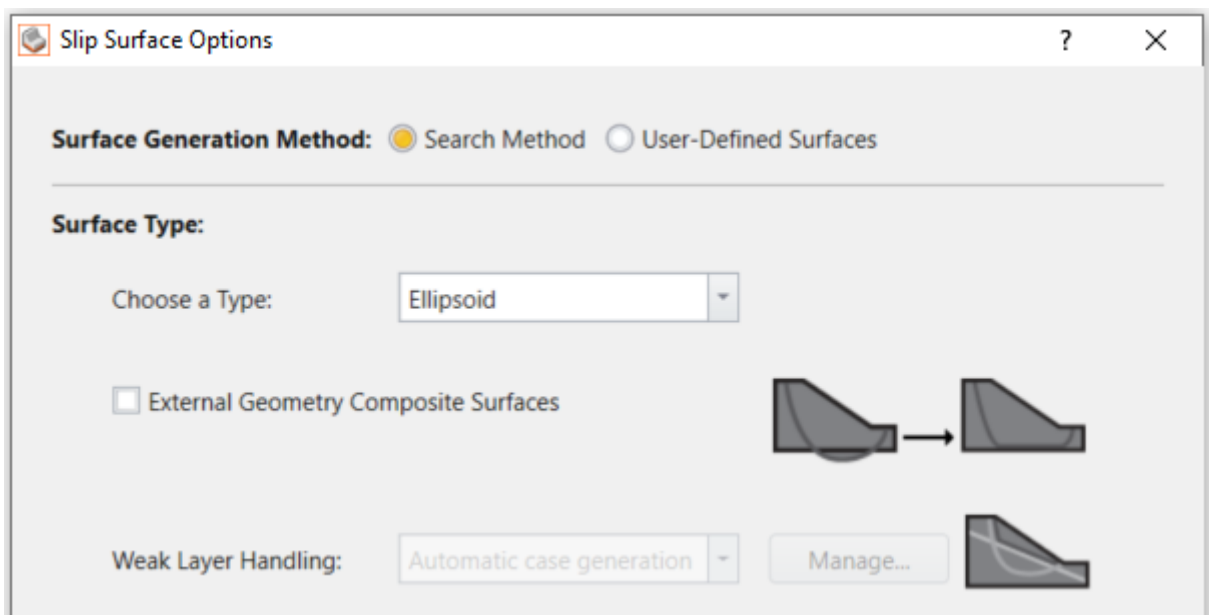


Fonte: Autor (2022)

3.4 DADOS DE ENTRADA

Na última etapa antes da análise, é realizada a definição e atrelamento dos materiais e seus parâmetros aos volumes do modelo - peso específico, coesão, ângulo de atrito interno e poropressão -, a seleção dos métodos de análise desejados, neste trabalho, selecionados os métodos de Bishop Simplificado e GLE/Morgenstern-Price e a configuração da superfície de ruptura - Figura 18.

Figura 18 - Configurações da superfície de ruptura.






Fonte: Autor (2022)

A superfície é configurada escolhendo o tipo de ruptura, para o estudo foi

adotada a superfície circular. Para uma análise mais fidedigna da estrutura de um aterro sanitário, pode ser realizada a configuração da superfície de ruptura através de definições particulares do projetista, onde a superfície de ruptura é configurada para priorizar a interface entre superfície e RSU e/ou geomembrana e RSU.

A escolha para os parâmetros dos materiais teve como base diversos autores que realizaram ensaios no RSU, reunidos por Teche (2021), ensaios realizados por Rebelo (2003) para as geomembranas e para a fundação valores baseados no estudo de Magalhães (2015), a fim de apresentar resultados mais próximos à realidade, pois não foi possível a realização de ensaios *in situ*. Os valores adotados para realização dos testes na modelagem tridimensional estão listados na tabela 2 gerada automaticamente pelo Slide3.

Tabela 2 - Parâmetros de Materiais Adotados.

Name	Colour	Unit Weight (kN/m ³)	Failure Criterion	Cohesion (kPa)	Phi (°)
RSU		10	Mohr Coulomb	19	28
Geomembrana		10	Mohr Coulomb	0	15
Fundação		19	Mohr Coulomb	15	25

Fonte: Autor (2022)

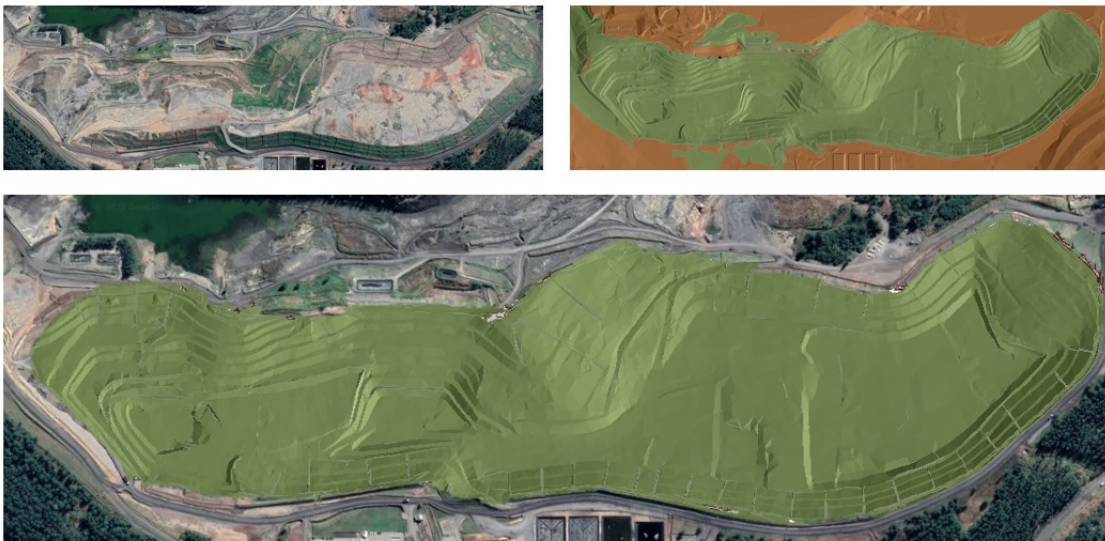
4 RESULTADOS

Antes da apresentação dos resultados obtidos neste trabalho, é necessário deixar claro que as modelagens realizadas foram feitas com dados topográficos reais, fruto de extensos levantamentos topográficos, efetuados pela equipe gestora do aterro. Já as interpretações de estabilidade realizadas, os parâmetros geotécnicos utilizados e os valores de estabilidade obtidos, são um mero exercício acadêmico, que não representam de forma alguma o comportamento real do aterro sanitário.

4.1 MODELO TRIDIMENSIONAL

A modelagem tridimensional finalizada - Figura 17 do item 3.3 deste trabalho, foi sobreposta em uma fotografia de satélite a fim de comparações da planialtimetria local, visualizada na Figura 19.

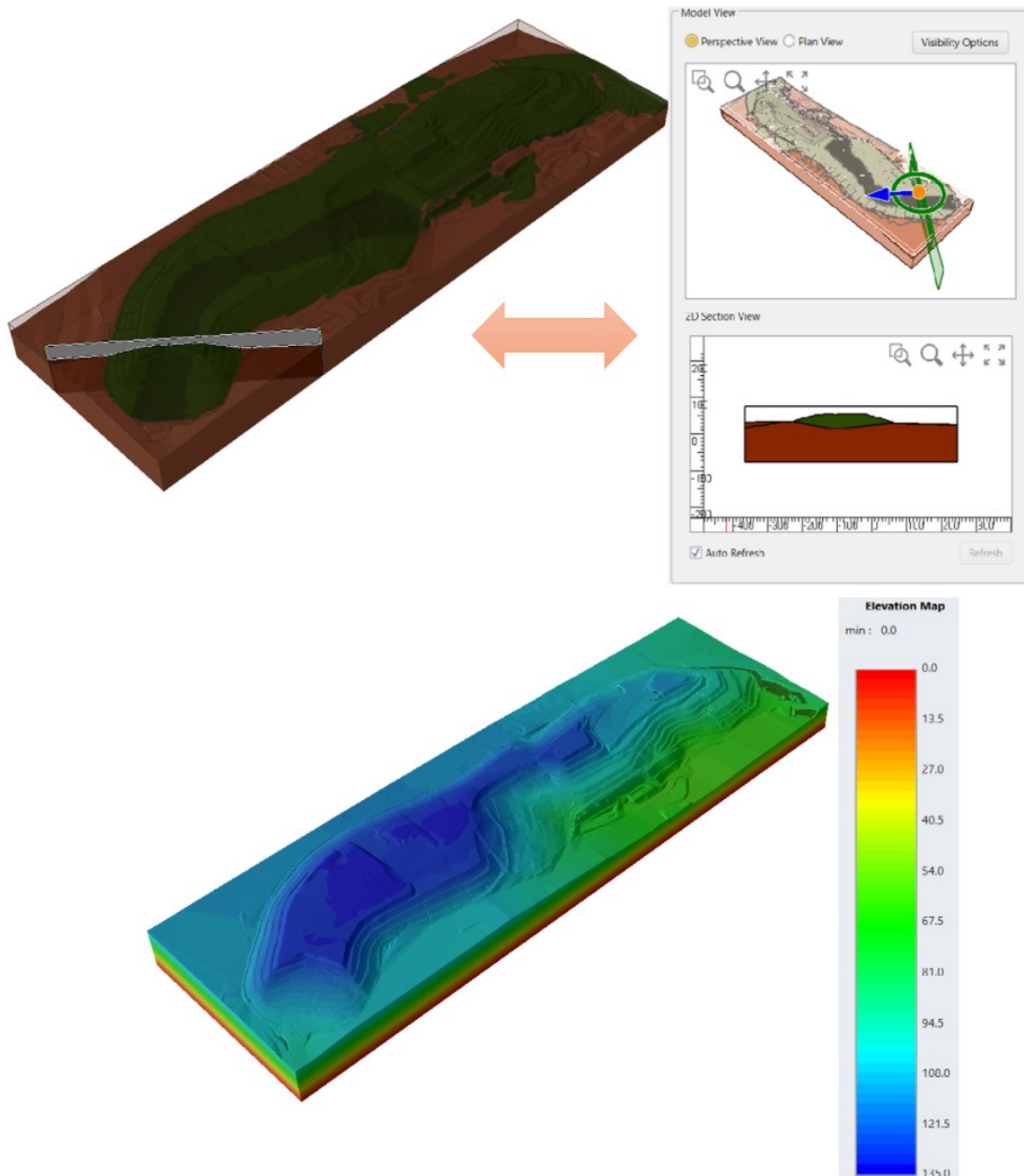
Figura 19 - Sobreposição da Modelagem em Fotografia por Satélite.



Fonte: Autor (2022)

A partir da modelagem tridimensional, podem ser realizados cortes de seções em qualquer sentido do aterro sanitário, escolhendo o local pelo modelo de vista, e o levantamento altimétrico do aterro, tendo como referência inicial o volume extrudado e final a superfície do aterro - Figura 18. Ambas ferramentas possibilitam a agilização de processos e suporte para outras atividades como análises pontuais e criação de mapas, vistos na Figura 20.

Figura 20 - A) Local de corte de seção; B) Seção; C) Levantamento altimétrico;



Fonte: Autor (2022)

4.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

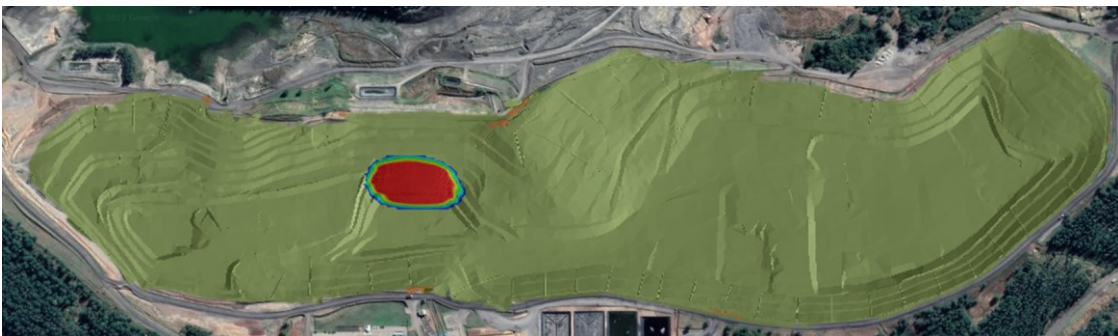
Tendo pronto o modelo tridimensional e realizado a configuração dos materiais - de acordo com a tabela 2 do item 3.4 deste trabalho, a análise de estabilidade de toda estrutura pelo método de Bishop Simplificado, observada na Figura 21, chegou ao fator de segurança de 2,595 no talude norte. A sobreposição da análise na fotografia de satélite, observada na Figura 22, demonstra onde a superfície de ruptura está localizada.

Figura 21 - Análise de Estabilidade do Aterro Sanitário.



Fonte: Autor (2022)

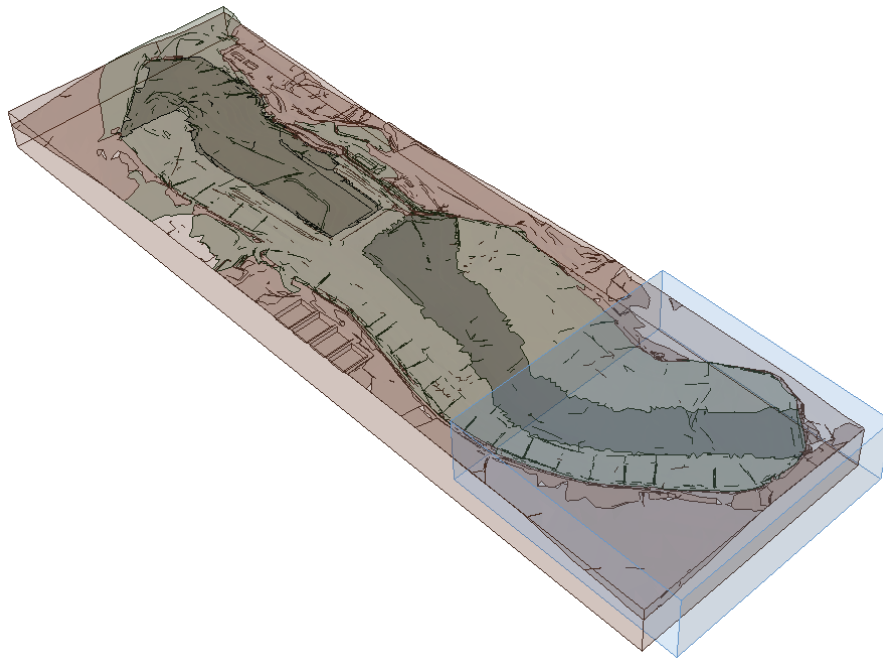
Figura 22 - Sobreposição da Análise em Fotografia por Satélite.



Fonte: Autor (2022)

Devido a grande extensão do aterro sanitário, as demais análises de estabilidade foram realizadas na porção leste da estrutura, na Figura 23 é possível observar a área a ser analisada.

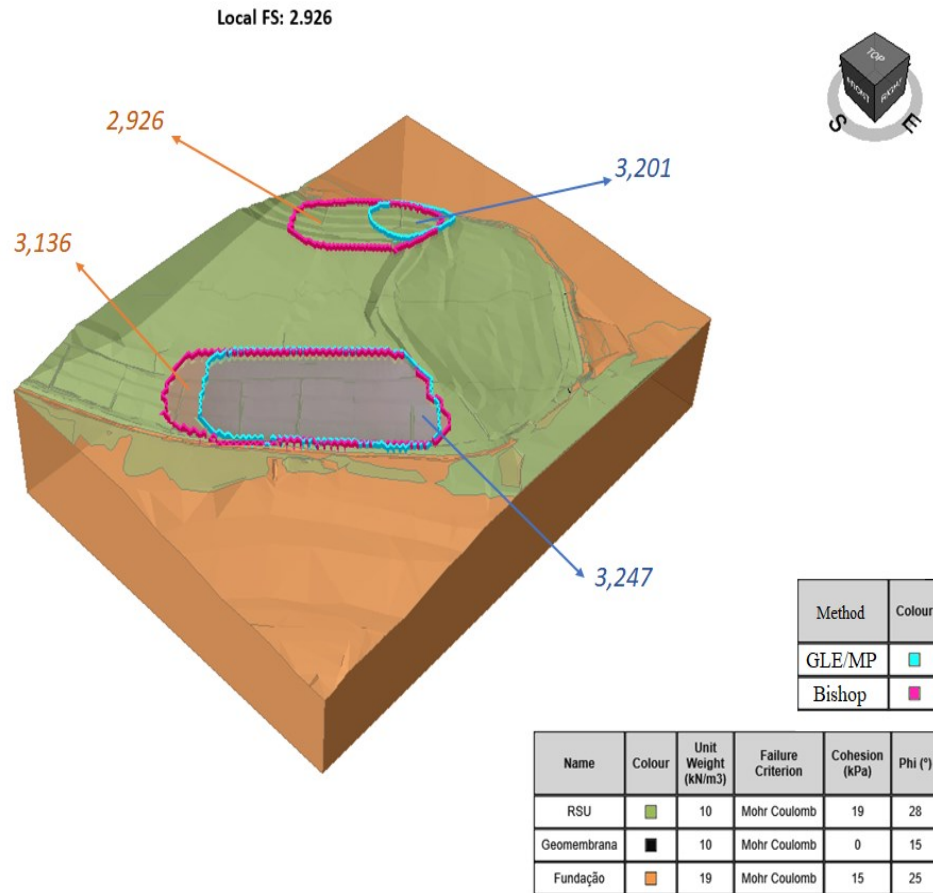
Figura 23 - Volume de Foco Sobre Área a Ser Analisada.



Fonte: Autor (2022)

Foram realizadas 6 análises de estabilidade no lado leste do aterro sanitário, com variações do coeficiente r_u de 0 a 0,5 pelos métodos de GLE/Morgenstern-Price e Bishop Simplificado. Os resultados da primeira análise de estabilidade, considerando um fator de r_u de 0 para todos os materiais, podem ser vistos na Figura 24.

Figura 24 - Superfícies com menor FS.



Fonte: Autor (2022)

O menor FS obtido foi de 2,926 no talude norte, da região leste do aterro sanitário, para o método Bishop Simplificado. Através de Morgenstern-Price, o valor de FS encontrado foi 3,201 no mesmo local. A variação entre os métodos na superfície de menor FS foi de 8,5%, sendo o método mais conservador o de Bishop Simplificado, mantendo o mesmo padrão para a superfície do talude sul. A Figura 25 mostra a sobreposição das superfícies de ruptura na geometria real do aterro.

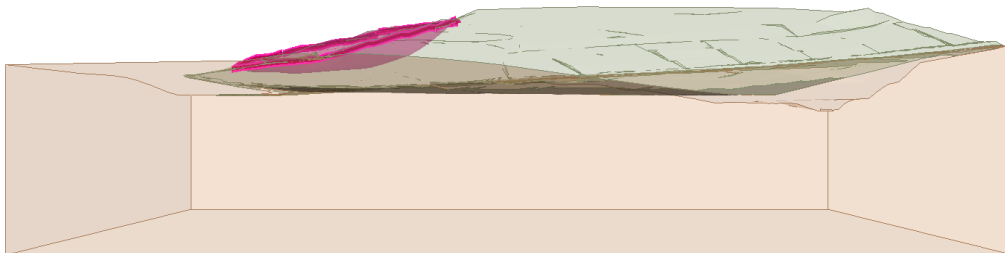
Figura 25 - Sobreposição das Superfícies com Menor FS na Fotografia por Satélite.



Fonte: Autor (2022)

Observando a estrutura pela vista lateral, Figura 26, é possível identificar a superfície ruptura circular bem definida identificada pelo método de Bishop e indo ao encontro das configurações realizadas no item 3.4 deste trabalho (Figura 18), indicando que o software apresenta uma análise coerente para os dados de entradas atrelados ao modelo.

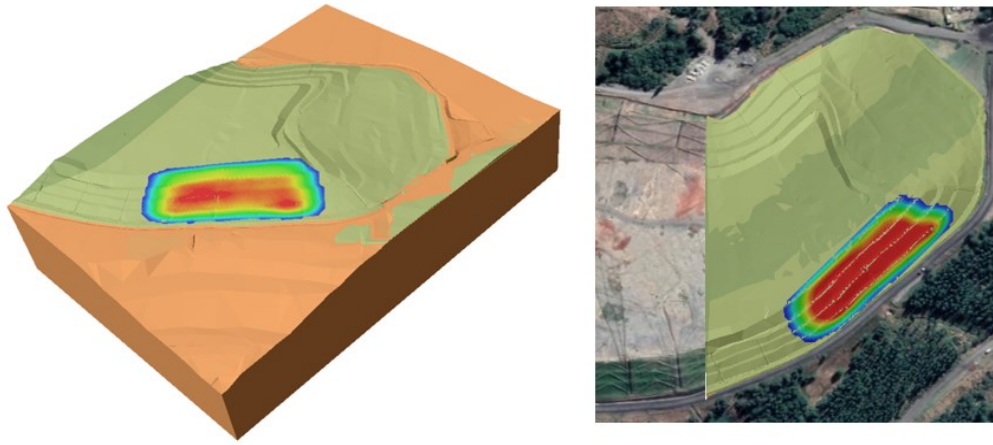
Figura 26 - Superfície de ruptura do método de Bishop.



Fonte: Autor (2022)

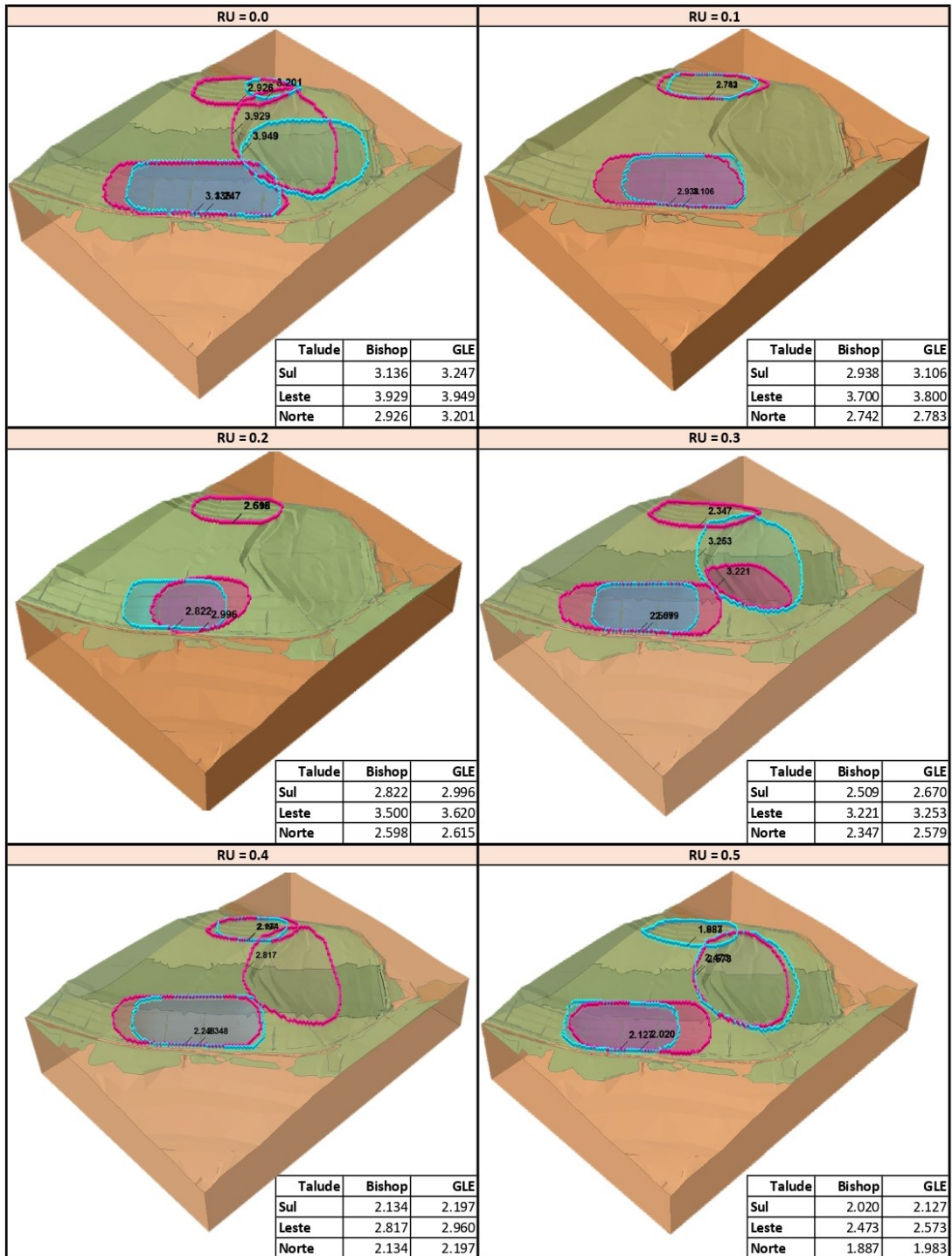
Para a mesma superfície de ruptura, é possível averiguar a distribuição das tensões normais, onde no centro a superfície é mais carregada e nas bordas os valores dos esforços são menores, análise coerente com a Figura 27.

Figura 27 - Mapa de tensões normais e sobreposição.



Fonte: Autor (2022)

Realizadas as análises de estabilidade mantendo a topografia e os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais e variando a poropressão, foram obtidas as superfícies com os menores fatores de segurança, mostradas na tabela 3.

Tabela 3 - Variação dos FS x ru .

Fonte: Autor (2022)

Em todas as superfícies, o método de Bishop Simplificado se mostrou mais conservador do que o método de Morgenstern-Price quanto ao FS. Os valores em destaque na tabela 4 - em negrito - foram alcançados através do mapa de superfície de segurança, uma vez que não foram contemplados diretamente como superfícies na

análise.

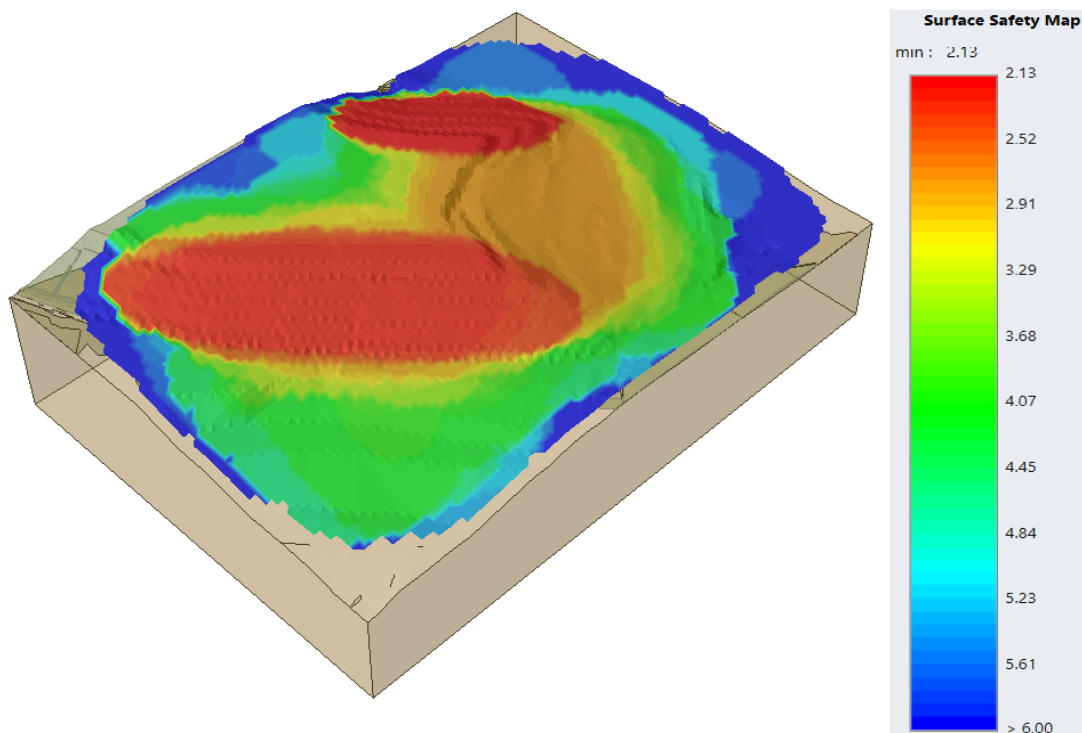
Tabela 4 - Variação dos FS x r_u .

	Talude	Norte			Sul			Leste		
	Método	Bishop	GLE	Δ	Bishop	GLE	Δ	Bishop	GLE	Δ
RU	0	2.926	3.201	8.59%	3.136	3.247	3.42%	3.929	3.949	0.51%
	0.1	2.742	2.783	1.47%	2.938	3.106	5.41%	3.700	3.800	2.63%
	0.2	2.598	2.615	0.65%	2.822	2.996	5.81%	3.500	3.620	3.31%
	0.3	2.347	2.579	9.00%	2.509	2.670	6.03%	3.221	3.253	0.98%
	0.4	2.134	2.197	2.87%	2.248	2.348	4.26%	2.817	2.960	4.83%
	0.5	1.887	1.983	4.84%	2.020	2.127	5.03%	2.473	2.573	3.89%
		$\Delta M_e =$		4.57%	$\Delta M_e =$		4.99%	$\Delta M_e =$		2.69%

Fonte: Autor (2022)

Na Figura 28, está representado o mapa de superfície de segurança da porção leste do AS pelo método de análise de Bishop Simplificado, considerando um r_u de 0,4.

Figura 28 - Mapa de Superfície de Segurança.



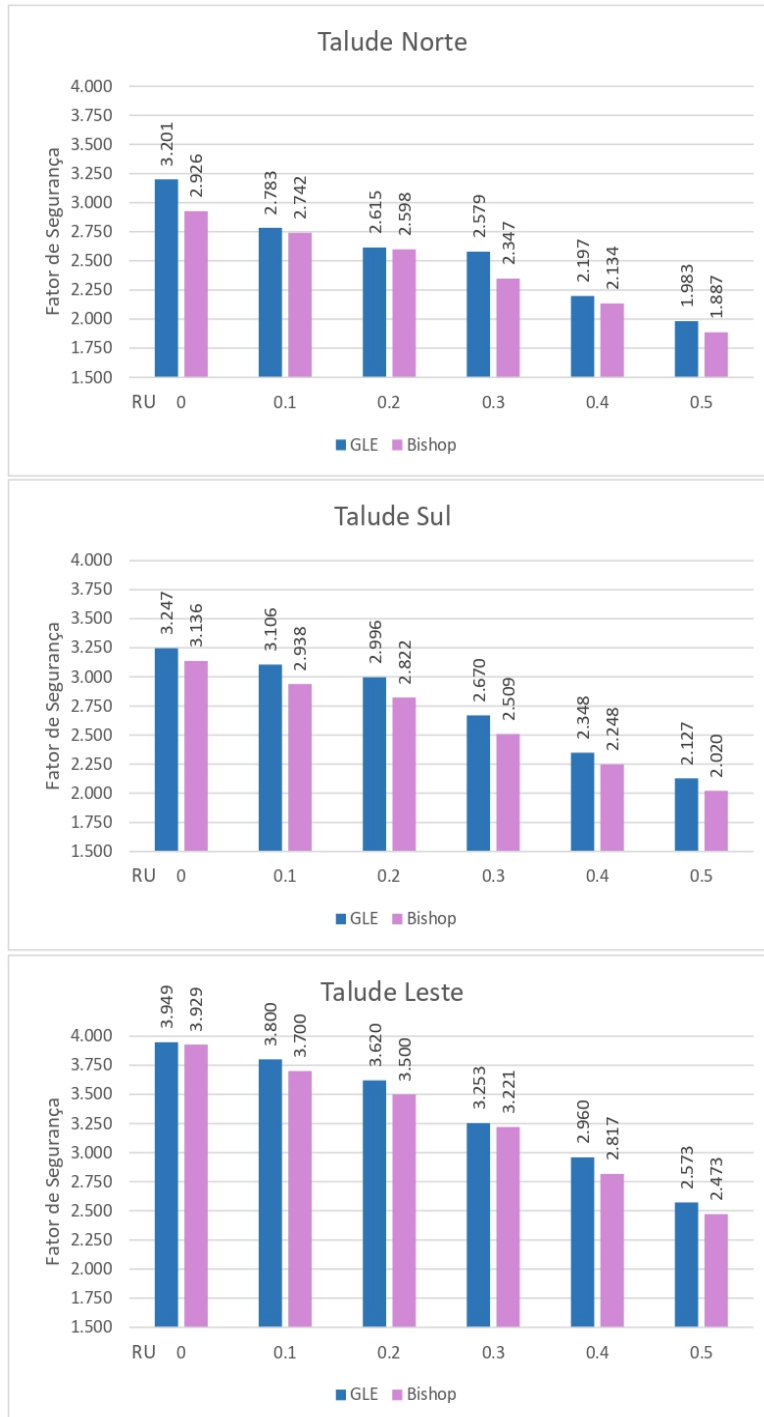
Fonte: Autor (2022)

É observado, pelo talude sul da Figura, a premissa de que os métodos de análise utilizados no trabalho mantêm um mesmo fator de segurança em toda a superfície de ruptura.

Os dados obtidos pelas análises e resumidos na tabela 4 foram plotados na figura 29, onde é possível observar a diminuição do fator de segurança em contrapartida ao

aumento do coeficiente ru .

Figura 29 - Fator de segurança X ru , Talude Norte; Talude Sul; Talude Leste;

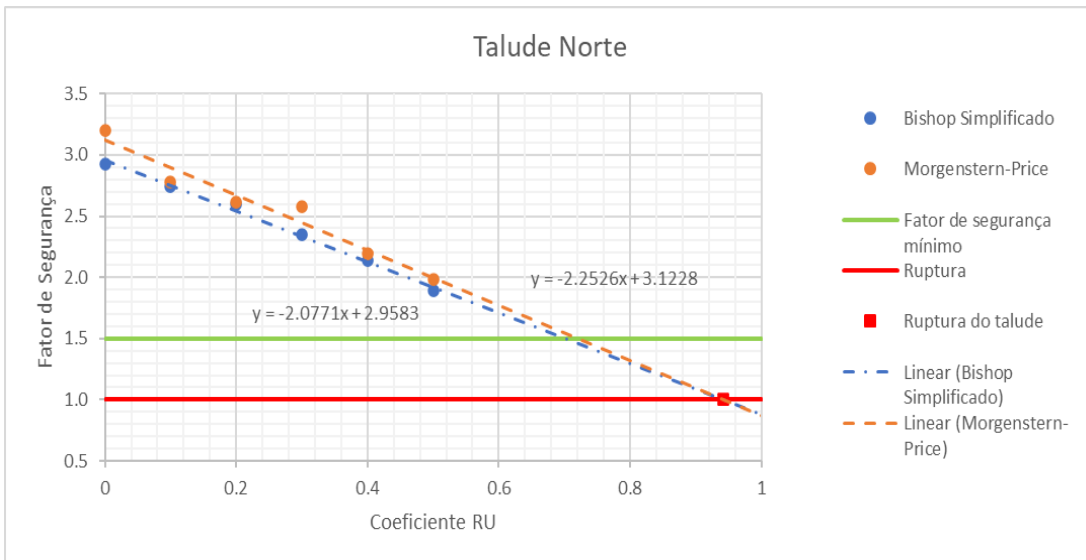


Fonte: Autor (2022)

Realizando regressões lineares para prever o comportamento dos taludes para outros valores de propressão, foram encontrados os valores de ru onde os taludes atingem o fator de segurança mínimo e a ruptura.

No talude norte, os métodos de Bishop Simplificado e Morgenstern-Price chegaram a valores iguais de ru (0,94) para a situação de ruptura da superfície do talude (FS = 1).

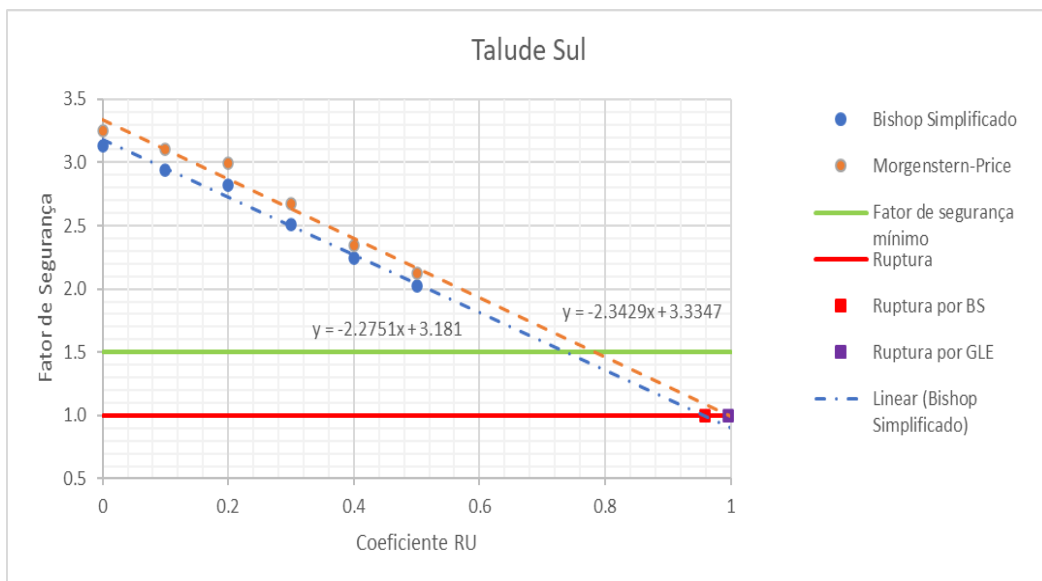
Figura 30 - FS x ru para o Talude Norte.



Fonte: Autor (2022)

No talude sul os valores para a ruptura dos taludes foram de 0,74 por Bishop Simplificado e 0,78 para Morgenstern-Price, uma diferença de 5%.

Figura 31 - FS x ru para o Talude Sul.

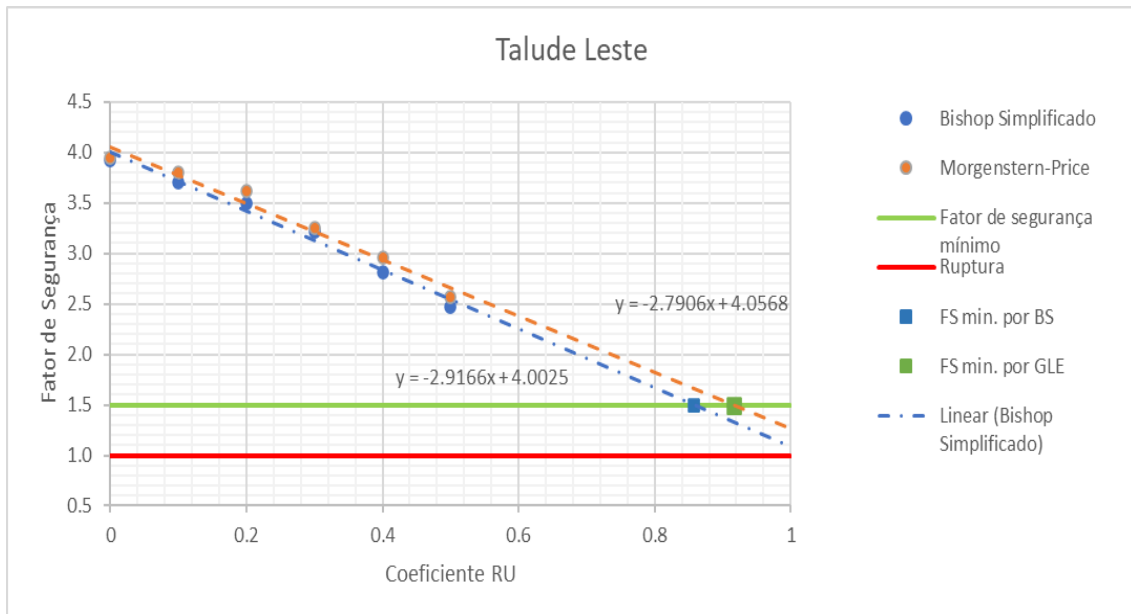


Fonte: Autor (2022)

O talude leste apresentou maior diferença entre os métodos quanto ao ru no fator

de segurança mínimo. Bishop Simplificado apresentou um valor de 0,86 e Morgenstern-Price 0,92, diferença de 6,5%.

Figura 32 - FS x r_u para o Talude Leste.



Fonte: Autor (2022)

Salienta-se novamente que as análises realizadas e os resultados apresentados são um exercício acadêmico e não são representativos da análise de estabilidade real de um aterro sanitário.

5 CONCLUSÃO

Após a apresentação dos resultados, conclui-se que os objetivos - modelagem tridimensional de um aterro sanitário de grande porte e análise de estabilidade de taludes da estrutura - foram atendidos.

5.1 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL

O modelo tridimensional gerado pelo software Slide3 demonstra ser compatível com a geografia do local, principalmente na área do aterro sanitário onde a operação está concluída (lado leste do AS) e se pode observar, na Figura 19 do item 4.1 deste trabalho, os drenos superficiais no talude sul e a estrada de acesso ao topo do aterro no talude norte.

O procedimento inicialmente exige, além do conhecimento prévio de conceitos sobre geotecnia, um estudo do software e suas funcionalidades - que, por ser complexo, toma um certo tempo até seu domínio completo -, porém, uma vez que se detém estes requisitos para implementação do software, seu emprego como ferramenta o torna viável não apenas para dimensionamento, mas também para o monitoramento e verificações pontuais de estruturas como essa.

5.2 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

O comportamento apresentado pelos taludes analisados frente aos diferentes métodos adotados e a variação da poropressão é coerente, uma vez que o resultado é linear e decrescente, assim como o esperado. O método de Bishop Simplificado se mostrou mais conservador que o de Morgenstern-Price (comportamento esperado desta comparação) e a redução da resistência dos taludes apresentou o esperado comportamento linear, uma vez que é proporcional ao aumento do coeficiente ru , e essa relação de proporcionalidade depende da quantia de água no solo, como observado nos gráficos 2, 3 e 4 do item 4.2 deste trabalho.

5.3 CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Notando a viabilidade do uso do software Slide 3 para modelagem e análises de estabilidade de taludes, sugere-se para trabalhos futuros seguir com a utilização desta ferramenta; a estratificação das camadas presentes na estrutura a ser analisada - dados estes que podem ser retirados dos levantamentos topográficos de monitoramento ou por

sondagens do local; análises tridimensionais utilizando a ferramenta *Weak Layers* (Camadas Fracas) do software para “forçar” rupturas em locais esperados; utilizar métodos probabilísticos de análise dos resultados de estabilidade, como por exemplo, o Método Monte Carlo.

Em paralelo ao uso do software, realizar o levantamento em campo dos parâmetros dos materiais e retroanálises de pontos onde ocorreram falhas estruturais para obtenção dos parâmetros que levaram a ruptura da superfície em questão.

Realizar estudos da resistência na interface dos diversos materiais geossintéticos utilizados atualmente em aterros sanitários, objetivando estimar parâmetros de resistência baseados em ensaios de laboratório e adotá-los nas análises de estabilidade, em substituição aos valores atribuídos pela literatura técnica, utilizados atualmente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: **Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos**. Rio de Janeiro, 1992. 1p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: **Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro, 2008. 17p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: **Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 1992. 1p.

AUTODESK. **Autodesk AutoCad Civil 3D**. Califórnia, 2022. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/products/civil-3d/overview>. Acesso em 17 de janeiro de 2022.

BENVENUTO, C., et. al. Revista Limpeza Pública. **Instrumentação Geotécnica e Monitoramento da Estabilidade de Aterros Sanitários**. São Paulo, 2019. 3p.

BERRÍOS, M. R. VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física. **Riscos Apresentados pelos Aterros de Resíduos Sólidos em Áreas de Rede Urbana Densa no Brasil**. Universidade de Coimbra, 2010. 5p.

BISHOP, A. W. **Test requirements for measuring the Coefficient of Earth Pressure at Rest**. In: CONFERENCE ON EARTH PRESSURE PROBLEMS. 1958, Proceedings, Brussels, Belgium, 1958. 2-14 p.

DIAS, T G. S. **Avaliação do Comportamento de Poços de Grande Diâmetro Para Fins de Infraestrutura Subterrânea**. Universidade de Brasília. 2011. 44p

FABRICIO, J. V. F. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contenções**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO. Rio de Janeiro, RJ. 2006. Cap. 2, 5-30p.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 15-172 p.

GOMES, C. R. **Notas de Aula - Aula 3 - Método das Fatias das Análises de Estabilidade**. Universidade Federal de Ouro Preto - Ouro Preto, MG. 11p.

LAMBE, T. W., WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. Massachusetts Institute of Technology. 1969. 363p.

LANGE, L. C., et. al. **Resíduos Sólidos: Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários: Guia do Profissional em Treinamento: Nível 2**. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Belo Horizonte, MG. 2008. 64-65p.

MACHADO, B. G., FERREIRA, L. F. **Aterro Sanitário**. Virapuru Engenharia e Sustentabilidade LTDA. Belém , PA. 2013. 1p.

MAGALHÃES, M. S. **Dimensionamento de Estruturas de Contenção Atirantadas Utilizando os Métodos de Equilíbrio Limite e de Elementos Finitos**. PUC-RIO - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. RJ. 2015. Cap. 6. 2p.

MELLO, C. C. S. **Aerofotogrametria com VANT: Aplicações no Monitoramento Operacional de Aterros Sanitários**. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, MG. 2020. 31-33p.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 363 p.

REBELO, K. M. W. **Resistência de Interface entre Geomembranas e Solos Através do Ensaio de Ring Shear**. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2003. 76-149p.

REMÉDIO, F. H. **Análise de Estabilidade de Taludes de Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos Utilizando Parâmetros Geotécnicos de Propostas Bibliográficas e Correlações com Nsppt**. Rio Claro - SP, 2014. 120p.

ROCSCIENCE. **Rocscience Slide3 - 3D Limit Equilibrium Analysis for Slope**. Toronto, 2022. Disponível em: <https://www.rocscience.com/software/slide3> . Acesso em: 17 jan. 2022.

SILVA, V. C. **Métodos Analíticos para Avaliar a Contribuição de Estacas para o Fator de Segurança de Taludes**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2013. 11-18p.

SOUSA, F. D. M. **Estudo da Influência da Sucção na Estabilidade do Talude de Montante da Barragem do Cauhipe Realizada por Meio de Análises de Equilíbrio Limite e Elementos Finitos**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE. 2019. 54-57p.

TECHE, J. H. T. **Análises Estatística e Probabilística de Parâmetros de Resistência e de Estabilidade de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**. Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2021. 39-44p.

ZANTA, V. M., FERREIRA, C. F. A. **Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2003. 3p.

ZUQUETTE, L. V. **Geotecnia Ambiental**. Elsevier Editora Ltda. 1ª ed. Rio de Janeiro. 2015. 80-213p.