

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

Gabriel Augusto Feyh

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRIDIMENSIONAL EM TALUDE DE
ATERRO SANITÁRIO ESTABILIZADO COM DIQUE DE SOLO-LETA**

Santa Maria, RS
2024

Gabriel Augusto Feyh

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRIDIMENSIONAL EM TALUDE DE ATERRO
SANITÁRIO ESTABILIZADO COM DIQUE DE SOLO-LETA**

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

Orientador: Prof. Dr. Magnos Baroni
Coorientador: Leonardo Alberto do Nascimento

Santa Maria, RS
2024

Gabriel Augusto Feyh

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRIDIMENSIONAL EM TALUDE DE ATERRO
SANITÁRIO ESTABILIZADO COM DIQUE DE SOLO-LETA**

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

Aprovado em 05 de agosto de 2024

**Magnos Baroni, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)**

**Leonardo Alberto do Nascimento, Eng. (UFSM)
Coorientador**

Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr. (UFSM)

Patricia Rodrigues Falcão, Ma. (UFSM)

Santa Maria, RS
2024

À minha Mãe, que me ensinou a contar
nos dedos,
Ao meu pai, que me ensinou a contar de
cabeça,
À minha avó, que me ensinou a contar
com Deus,
E à minha família e amigos, que são com
quem eu conto.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus por me conceder a vida e por sempre me iluminar e me guiar perante todas as adversidades.

Aos meus pais, Leandro e Rosemeri, pelo exemplo de amor e dedicação, por sempre me apoiar em todas as minhas decisões e que fizeram de tudo para me proporcionar o estudo que hoje eu tenho.

Ao meu irmão, Daniel, pela presença, por acreditar em mim e pelo qual eu tanto me esforço.

Aos meus avós, Sueli e Eligio, por me mostrarem o valor da educação e do trabalho duro e por sempre me lembrarem a importância da união de nossa família. À toda minha família, que mesmo de longe se fez presente, em especial aos meus primos, Arthur, Raphaela e Valentina, por todo amor e carinho.

Aos meus amigos-irmãos, Bernardo, Felipe, Guilherme, Luísa, João e Pedro por sempre me apoiarem e fornecerem um ombro amigo quando eu mais precisava.

À minha querida e amada namorada, Ana Paula, por todo amor, incentivo, compreensão e paciência, por sempre buscar extrair o melhor que há em mim, por sempre acreditar nos meus sonhos e buscá-los comigo.

À banca, em especial ao meu orientador e coorientador, Magnos e Leonardo, por todo o conhecimento compartilhado durante esse projeto e outros projetos, pelo compromisso comigo e com a educação, pela paciência e dedicação em todas as explicações e conversas para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus colegas e amigos de laboratório, Angelo, Dêreck, Luigi, Luiz, Paula, Patricia, Mariana, Amanda, Enzo, João e José por toda parceria, congressos, confraternizações e ensaios laboratoriais durante toda a minha graduação. Vocês são uma segunda família para mim.

RESUMO

ANÁLISE DE ESTABILIDADE TRIDIMENSIONAL EM TALUDE DE ATERRO SANITÁRIO ESTABILIZADO COM DIQUE DE SOLO-LETA

AUTOR: Gabriel Augusto Feyh
ORIENTADOR: Magnos Baroni
COORIENTADOR: Leonardo Alberto do Nascimento

Este trabalho investiga o aumento do fator de segurança de um aterro sanitário de grande porte utilizando um dique composto por uma mistura de Solo-LETA através de análises de estabilidade de taludes tridimensionais. A pesquisa foca na modelagem detalhada do aterro e na implementação de diques como medida preventiva para aumentar a segurança geotécnica e ambiental da estrutura. Foram utilizados os softwares Autodesk AutoCAD Civil 3D e Rocscience Slide3 para a modelagem tridimensional do aterro, tendo como base os dados topográficos e parâmetros geotécnicos e de poropressão reportados em pesquisas anteriores e na literatura. Os resultados da análise de estabilidade, com os parâmetros adotadas pelo autor, revelaram áreas críticas no talude norte do aterro, em que os fatores de segurança calculados estavam abaixo dos valores recomendados pela norma NBR-11682/2009. Como alternativa de solução, foram modelados diques de 3 m, 5 m e 7 m de altura utilizando a mistura composta de 85% de solo local e 15% de LETA, baseando-se em estudos anteriores que demonstraram sua eficácia na impermeabilização de aterros sanitários. As análises subsequentes mostraram que os diques propostos melhoraram significativamente os fatores de segurança do aterro sanitário, especialmente para a configuração do dique de 7 m, que apresentou para as três variações de poropressão (0,15; 0,30 e 0,60) valores de fator de segurança de 2,70, 2,51 e 2,03. Os resultados indicam que a modelagem tridimensional pode ser utilizada para a verificação da estabilidade dos taludes e que a utilização de diques de Solo-LETA é uma alternativa interessante para a estabilização de aterros sanitários, garantindo a disposição segura de resíduos sólidos urbanos.

Palavras-chave: Modelagem tridimensional. Estabilidade de taludes. Aterros Sanitários. Solo-LETA.

ABSTRACT

THREE-DIMENSIONAL STABILITY ANALYSIS OF A LANDFILL SLOPE STABILIZED WITH A WTS-SOIL DIKE

AUTHOR: Gabriel Augusto Feyh
ADVISOR: Magnos Baroni
CO-ADVISOR: Leonardo Alberto do Nascimento

This work investigates increasing the safety factor of a large landfill using a WTS-soil mixture through three-dimensional slope stability analysis. The research focuses on the detailed modeling of the landfill and the implementation of dikes as a preventive measure to increase the geotechnical and environmental safety of the structure. Autodesk AutoCAD Civil 3D and Rocscience Slide3 software were used for the three-dimensional modeling of the embankment, based on real topographic data and specific geotechnical parameters. The results of the initial stability analysis revealed critical areas on the northern slope of the embankment, where the calculated safety factors were below the values recommended by the NBR-11682 standard. As a solution, 3 m, 5 m and 7 m high dykes were modeled using a mixture composed of 85% local soil and 15% LETA, based on previous studies that demonstrated its effectiveness in waterproofing landfills. Subsequent analysis showed that the proposed dikes significantly improved the safety factors of the landfill, especially for the 7 m dike configuration, which showed safety factor values of 2.702, 2.519 and 2.037 for the three pore pressure variations (0.15, 0.30 and 0.60). The results indicate that three-dimensional modelling combined with the use of WTS-soil dykes is a promising approach for stabilizing large landfills, guaranteeing the safe disposal of solid urban waste.

Keywords: Three-dimensional modeling. Slope stability. Landfill. WTS-soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Limpeza dos decantadores tradicionais em ETAs.....	17
Figura 2 – Diagrama esquemático de um aterro sanitário.....	25
Figura 3 – Elementos que caracterizam um volume escorregado.....	27
Figura 4 – Divisão do talude em fatias e forças atuantes em uma fatia	29
Figura 5 – Círculo de Mohr.....	32
Figura 6 – Envoltória de resistência Mohr-Coulomb.....	33
Figura 7 – Perfil de poropressão	34
Figura 8 – Fluxograma das etapas de pesquisa.....	35
Figura 9 – Exemplo de geometria complexa analisada no software	37
Figura 10 – Divisão das áreas do aterro sanitário	38
Figura 11 – Superfície de fundo	38
Figura 12 – Localização das geomembranas no fundo do aterro.....	39
Figura 13 – Superfície atual	39
Figura 14 – Sólido 3D do fundo do aterro	40
Figura 15 – Superfícies extrudadas para encaixe no volume externo.....	41
Figura 16 – Modelagem finalizada da superfície de fundo	42
Figura 17 – Modelagem finalizada da geomembrana	42
Figura 18 – Modelagem finalizada da superfície atual	43
Figura 19 – Configurações da superfície de ruptura	43
Figura 20 – Função MMO.....	44
Figura 21 – Adaptação do método a jusante do dique	45
Figura 22 – (a) Dique de 3 m; (b) Dique de 5 m; (c) Dique de 7 m.....	46
Figura 23 – Sobreposição da Modelagem em Fotografia por Satélite.....	49
Figura 24 – Análise de Estabilidade Inicial do Aterro Sanitário, em (a) FS = 1,329; e (b) FS = 1,213	50
Figura 25 – Superfície de Ruptura do Método GLE: FS = 1,329.....	51
Figura 26 – Superfície de Ruptura do Método GLE: FS = 1,213.....	51
Figura 27 – Variação do FS x r_u para o Dique de 3 m: (a) RSU:0,30 e Geomembrana 0,15; (b) RSU: 0,30 e Geomembrana 0,30; (c) RSU:0,60 e Geomembrana 0,30	52
Figura 28 – Variação do FS x r_u para o Dique de 5 m: (a) RSU:0,30 e Geomembrana 0,15; (b) RSU:0,30 e Geomembrana 0,30; (c) RSU:0,60 e Geomembrana 0,30	53

Figura 29 – Variação do FS x r_u para o Dique de 7 m: (a) RSU:0,30 e Geomembrana 0,15; (b) RSU:0,30 e Geomembrana 0,30; (c) RSU:0,60 e Geomembrana 0,30	55
Figura 30 – Fator de segurança X r_u para os Diques de 3 m, 5 m e 7 m	57
Figura 31 – Variação do FS x r_u para o Dique Ampliado de 5 m: (a) RSU:0,30 e Geomembrana 0,15; (b) RSU:0,30 e Geomembrana 0,30; (c) RSU:0,60 e Geomembrana 0,30	57
Figura 32 – Variação do FS x r_u para o Dique Ampliado de 7 m: (a) RSU:0,30 e Geomembrana 0,15; (b) RSU:0,30 e Geomembrana 0,30; (c) RSU:0,60 e Geomembrana 0,30	59
Figura 33 – Fator de segurança X r_u para os Diques de 3 m, 5 m e 7 m modificados	61
Figura 34 – Regressões lineares para (a) no Dique de 3 m; (b) no Dique de 5 m; (c) no Dique de 7 m	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrão adotado para cada condição e energia de compactação.....	19
Tabela 2 – Resultado de ensaios de compactação de lodo de ETA realizados	19
Tabela 3 – Resultado dos ensaios de compactação e permeabilidade em misturas de solo-lodo.....	20
Tabela 4 – Resumo de aplicação do lodo por diferentes autores.....	21
Tabela 5 – Formulações baseadas no Método das Fatias	30
Tabela 6 – Parâmetros de materiais adotados.....	43
Tabela 7 – Parâmetros de materiais adotados para o dique.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	14
2.1.1	Propriedades Geotécnicas	18
2.2	APLICAÇÕES DE SOLO-LETA NA ENGENHARIA CIVIL	21
2.3	ATERROS SANITÁRIOS.....	24
2.3.1	Levantamento Planialtimétrico	26
2.4	TALUDES E MOVIMENTOS DE MASSA.....	26
2.5	ESTABILIDADE DE TALUDES	27
2.5.1	Métodos de Análise de Estabilidade	28
2.6	PARÂMETROS DOS MATERIAIS.....	31
2.6.1	Resistência ao cisalhamento	31
2.6.2	Pressão na água	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS	36
3.1.1	AutoCad Civil 3D	36
3.1.2	Rocscience Slide 3 – 3D limit equilibrium analysis for slopes	36
3.2	ATERRO SANITÁRIO	37
3.2.1	Dados Topográficos	38
3.2.2	Modelagem tridimensional do maciço	40
3.3	ANÁLISES DO ATERRO POR INTERMÉDIO DO SLIDE3	41
3.3.1	Análise De Estabilidade Inicial	44
3.3.2	Modelagem Dos Diques	44
3.3.3	Análise de Estabilidade após os Diques	47
4	RESULTADOS E ANÁLISES	49
4.1	MODELO TRIDIMENSIONAL	49
4.2	ANÁLISE DE ESTABILIDADE INICIAL.....	50
4.3	ANÁLISES DE ESTABILIDADE APÓS OS DIQUES	51
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1 INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários são fundamentais para a deposição segura de resíduos sólidos urbanos (RSU), minimizando os impactos ambientais e contribuindo para a manutenção das cidades, conforme estabelece a NBR 8419 (ABNT, 1992). No entanto, a implantação e manutenção desses aterros exigem análises técnicas rigorosas para garantir a estabilidade e segurança das estruturas. A falha em atender essas exigências pode resultar em sérios danos ambientais, como contaminação do lençol freático e dispersão superficial de resíduos, conforme destaca Berríos (2010).

Além das normativas técnicas e ambientais, o monitoramento contínuo de fatores geotécnicos e ambientais é essencial para a operação segura dos aterros sanitários. Estudos como o de Remédio (2014) demonstram a eficácia das análises de estabilidade através de softwares bidimensionais, embora com limitações do software. No Brasil, há uma lacuna significativa no planejamento e monitoramento adequado dos aterros sanitários, frequentemente resultando em catástrofes, como ressaltam Benvenuto et al. (2019).

Paralelamente, o tratamento adequado e a disposição final do LETA também representam desafios ambientais significativos. O LETA é um resíduo composto por uma mistura de materiais orgânicos e inorgânicos provenientes do tratamento da água, que pode causar severos impactos ambientais se não gerenciado corretamente. A utilização do LETA em camadas de aterros sanitários tem sido uma prática recorrente em diversos países, oferecendo vantagens como a melhoria da qualidade dos lixiviados e a aceleração da decomposição dos resíduos, conforme observado por Granato (2010).

No contexto brasileiro, a execução de coberturas de aterros sanitários depende frequentemente da exploração de jazidas de argilas locais, o que pode ser economicamente inviável devido aos altos custos de transporte. A mistura de LETA com solo local pode se apresentar como uma solução técnica e economicamente viável para a construção dessas camadas, além de proporcionar benefícios ambientais significativos.

Desse modo, expandindo o uso do LETA em aterros sanitários (AS), o presente trabalho propõe verificar o uso do Solo-LETA na estabilização de um aterro sanitário de grande porte através da análise de estabilidade tridimensional, com a finalidade de

encontrar soluções sustentáveis e eficazes para a construção e manutenção de destas estruturas, assegurando a estabilidade dos taludes e a minimização dos impactos ambientais.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo analisar a estabilidade de taludes de um aterro sanitário de grande porte com a implementação da mistura Solo-LETA em seus diques.

São objetivos específicos deste trabalho:

- Avaliar o comportamento geotécnico do aterro sanitário utilizando modelagem tridimensional com os softwares Autodesk Civil 3D e Rocscience Slide3 - 3D Limit Equilibrium Analysis for Slopes.;
- Verificação da verossimilidade da modelagem obtida frente a topografia existente;
- Estudar a viabilidade da aplicação da mistura composta de Solo-LETA (85% solo + 15% LETA) como material de diques de diferentes alturas;
- Análise tridimensional da estabilidade de taludes por meio do Método de Equilíbrio Limite (MEL);
- Avaliar a variação dos fatores de segurança com a variação da poropressão.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

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 à tona conceitos para a compreensão do trabalho realizado.
- Capítulo 3: Explica os materiais, seus parâmetros e os métodos utilizados para análise.
- Capítulo 4: Expõe os resultados alcançados com as análises do software e as modificações que foram feitas para tal.
- Capítulo 5: Conclusão sobre as análises realizadas e considerações para futuros trabalhos na área.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item serão abordados os conceitos necessários para entendimento do estudo proposto, abordando acerca do LETA e suas aplicações, com ênfase em aterros sanitários; diferentes temáticas que envolvem aterros, como: levantamento planialtimétrico; estabilidade de taludes e movimentos de massa; métodos de análise de estabilidade e softwares que podem ser aplicados nesta área.

Através destes tópicos, serão fornecidos os fundamentos teóricos para embasamento dos temas discutidos na metodologia, nos resultados e nas discussões deste trabalho.

2.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

O tratamento da água torna-se crucial para garantir a qualidade e segurança do abastecimento hídrico, sendo uma etapa essencial na proteção da saúde pública e na preservação do meio ambiente. No entanto, as estações de tratamento de água (ETA) enfrentam desafios significativos no gerenciamento dos resíduos gerados durante esse processo, com destaque para o lodo.

Este resíduo, conforme relatado por Souza (2009), é uma complexa mistura de materiais orgânicos e inorgânicos, incluindo sedimentos, micro-organismos, produtos químicos e metais pesados. A gestão adequada do lodo de ETA é crucial para minimizar os impactos ambientais e sanitários, porém, sua composição variável e características desafiadoras tornam esse processo complexo e demandam soluções integradas e eficazes para seu tratamento e disposição final.

De acordo com *American Society of Civil Engineers* (ASCE, 1996), nas estações de tratamento de água os resíduos podem ser divididos em quatro categorias:

- Lodo: gerado nas descargas dos decantadores, removidos em flotores, na lavagem de filtros, no abrandamento e na remoção de ferro e manganês na água bruta;
- Concentrado salino: resultante do tratamento de água por técnicas de membrana, osmose reversa, eletrodialise e troca iônica;
- Carvão ativado e resinas de troca iônica desgastada e material filtrante usado;

- Emissões gasosas de unidades de controle de odor ou de técnicas de air stripping (processo de transferência de componentes voláteis de um líquido para uma corrente de ar).

Nas ETAs, os processos que mais possuem representatividade são os resíduos gerados nas lavagens dos filtros e na descarga de decantadores (ASCE, 1996). Os resíduos sólidos encontrados no lodo da estação de tratamento de água são constituídos por uma mistura de matéria orgânica e inorgânica que são provenientes da água bruta. Segundo Grandin, Alem Sobrinho e Garcia Júnior (1993), esta água bruta pode conter uma variedade de impurezas como algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, coloides, areia, argila, lodo, cálcio, magnésio, ferro e manganês. Além desses componentes presentes nela, o lodo pode conter floculantes, hidróxidos de alumínio e ferro e polímeros utilizados em processos de potabilidade da água.

Contudo, conforme Carneiro et al. (2013), a qualidade da água bruta está diretamente ligada à composição e quantidade de resíduos gerados, como também a concentração e o tipo de produto químico que deve ser utilizado na coagulação, do tipo de decantadores, dos polímeros empregados no desaguamento, da forma de limpeza dos filtros, entre outros.

Desse modo, os resíduos gerados nas estações de tratamento de água (ETAs) podem contribuir para o grau de contaminação dos corpos hídricos receptores devido às suas características variáveis. Isto contribui diretamente para a degradação ambiental, reduzindo assim a qualidade de vida das comunidades a jusante do ponto de emissão do efluente. Dada a diversidade de propriedades dos lodos produzidos pela ETA, Cordeiro (1999) enfatizou a importância de abordar este problema de resíduos individualmente em cada estação.

A caracterização do lodo desempenha um papel vital no fornecimento de informações sobre o impacto potencial das emissões no meio ambiente e no auxílio na seleção dos métodos de desidratação e disposição final mais adequados. Cordeiro (2001) através de sua classificação dos resíduos, qualificou o lodo baseado na sua importância e nos quesitos ambientais e geotécnicos. Em relação às questões ambientais, o autor enfatizou a gestão de resíduos, salientando a necessidade de conhecer os principais parâmetros para sua análise: pH, sólidos, metais, DBO (demanda bioquímica de oxigênio), biodegradabilidade, toxicidade, pesticidas,

fertilizantes, compostos voláteis e orgânicos. No âmbito geotécnico, foram destacados os potenciais métodos de remoção da água e os usos futuros desses resíduos, ressaltando que os principais parâmetros para estas análises incluem: granulometria das partículas, limite de plasticidade, limite de liquidez, resistência específica, comportamento térmico e sedimentabilidade.

A NBR 10004 (ABNT, 2004) aborda a classificação dos resíduos sólidos. De acordo com essa norma, os lodos provenientes de estações de tratamento de água (LETAs) são considerados resíduos sólidos, enquadrados na Classe II A, ou seja, não perigosos e não inertes. Os resíduos não inertes apresentam características como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Já os resíduos inertes, ao entrarem em contato com a água, não solubilizam nenhum de seus constituintes em concentrações superiores aos padrões de potabilidade estabelecidos para a água (BRASIL, 2010). Para gestão desses resíduos, é preciso seguir as diretrizes estabelecidas pela Lei nº 12.305 de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Essa lei determina que os resíduos e os rejeitos devem ter uma destinação ambientalmente adequada, devendo ser encaminhados para aterros sanitários.

Considerando a quantidade de lodo proveniente de estações de tratamento de água, diversas pesquisas fornecem informações significativas sobre o LETA. Conforme Richter (2001) e Cordeiro (2001), os resíduos das Estações de Tratamento de Água são predominantemente compostos por partículas de solo, matéria orgânica integrada à água bruta e subprodutos resultantes da aplicação de produtos químicos e água. A utilização do coagulante sulfato de alumínio, que tem por função desestabilizar as partículas coloidais e suspensas na água, resulta na formação de um lodo gelatinoso e não newtoniano, composto por sólidos ricos em hidróxido de alumínio, partículas inorgânicas e orgânicas, coloides, bactérias e outros organismos. A concentração total de sólidos nos tanques de decantação pode variar de 1.000 mg/L a 40.000 mg/L, dos quais entre 75% e 90% encontram-se na forma de sólidos suspensos e de 20% a 35% na forma de sólidos voláteis (RICHTER, 2001).

Embora resulte em um grande volume de lodo com baixa concentração de sólidos, o uso do sulfato de alumínio como coagulante facilita a sedimentação, segundo Richter (2001). A quantidade de coagulante usada e a quantidade de sólidos presentes no lodo estão diretamente ligadas à eficácia do processo de desidratação do lodo. Lodos de águas com alta turbidez, que requerem doses maiores de hidróxido

de alumínio, tendem a compactar mais facilmente do que aqueles de águas com baixa turbidez, que requerem doses menores. A limpeza de um decantador tradicional em uma estação de tratamento de água é mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Limpeza dos decantadores tradicionais em ETAs



Fonte: SAAE Mantena MG (2014)

Os serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário do estado do Rio Grande do Sul fornecidos pela Companhia Riograndense de Saneamento estão disponíveis em 317 municípios do estado, apesar da sua sede central estar localizada em Porto Alegre, RS. Assim, com um alcance de aproximadamente 6,3 milhões de clientes, a Corsan mantém uma posição dominante no mercado estadual (CORSAN, 2021).

De acordo com dados do ano de 2021 da Corsan (2021), a empresa atendeu 3.038.000 economias no estado, fornecendo um equivalente de volume de água de 619.077.605 m³. Portanto, conforme as estimativas de Richter (2001), na qual a produção máxima de LETA pode chegar a 5,0% do volume total de água tratada, somente no ano de 2021, estima-se que um volume de aproximadamente 31.000.000 m³ de lodo possa ter sido gerado.

Os eventos mencionados anteriormente reiteram a importância de uma destinação adequada para o LETA, a fim de minimizar os danos ambientais causados pelo resíduo e promover uma abordagem sustentável, reduzindo o uso de recursos naturais em projetos de engenharia.

2.1.1 Propriedades Geotécnicas

Não há normas específicas sobre como caracterização do lodo de Estações de Tratamento de Água para uso em obras geotécnicas. As normas vigentes para a caracterização do solo são usualmente adotadas devido a essa carência (XIA, 1994; BASIM, 1999; O'KELLY, 2008; CANIANI et al., 2013). As necessidades e particularidades de cada aplicação determinam os ensaios de caracterização.

Segundo estudos de O'Kelly (2008), é indicado desidratar os lodos antes de sua aplicação na engenharia para facilitar tanto o manuseio quanto o transporte do material. Entretanto, mesmo com o uso de métodos mecânicos, essa tarefa é desafiadora devido à presença de coagulantes nos processos de tratamento de água.

A resistência ao cisalhamento é uma das propriedades mais importantes no comportamento mecânico dos LETAs. Isso ocorre porque os parâmetros de resistência impactam diretamente na estabilidade dos taludes e na capacidade de suporte. Além disso, essas propriedades também são aplicáveis aos LETAs utilizados em obras geotécnicas.

É amplamente reconhecido que os parâmetros de resistência podem ser avaliados por meio de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais, sendo o ensaio de compressão triaxial o mais utilizado. Hsieh e Raghu (1997) realizaram uma investigação usando o ensaio de cisalhamento direto em condições naturais para avaliar onze tipos distintos de lodos provenientes de Estações de Tratamento de Água nos Estados Unidos. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, incluindo ângulo de atrito e coesão, foram avaliados. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos em termos de tensão total.

Com base nos dados apresentados na Tabela 1, observa-se que Hsieh e Raghu (1997) identificaram que para alguns tipos de lodo com teor de umidade variando entre 33,9% e 89%, os valores de coesão situaram-se na faixa de 3,1 a 45,1 kPa. Por outro lado, para os lodos com teores de umidade compreendidos entre 150,6% e 549,4%, os valores de coesão oscilaram entre 2,4 e 11,4 kPa. Além disso, os valores do ângulo de atrito variaram de 3 a 26°, sendo os valores mais altos associados aos maiores teores de sólidos. Na literatura foram identificados poucos estudos específicos sobre o lodo proveniente de ETAs, conforme demonstrado na Tabela 2. Ressalta-se a pesquisa conduzida por Basim (1999), que realizou ensaios de compactação sob duas

condições distintas: (a) aplicando umedecimento no lodo após sua prévia secagem, e (b) submetendo o lodo à secagem a partir de sua umidade inicial. O autor observou que durante o processo de prévia secagem, os teores de umidade ótima foram mais baixos (variando de 25% a 80%), enquanto as massas específicas foram mais elevadas (variando de 720 a 1388 kg/m³). Resultados semelhantes foram obtidos por Xia (1994). Quanto à permeabilidade do lodo analisado por Caniani et al. (2013), os valores variaram entre 10⁻⁸ e 10⁻⁶ m/s. Os autores sugeriram que o material poderia ser uma alternativa à argila, uma vez que a faixa de permeabilidade ficou próxima à caracterização da argila local, que varia entre 10⁻⁹ e 10⁻⁴ m/s.

Tabela 1 – Padrão adotado para cada condição e energia de compactação

Teor de sólidos (%)	Teor de umidade (%)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
15,4	549,4	4,2	3
19,8	405,1	2,4	7
24,6	306,5	10,6	6
34,6	189	11,4	9
38,9	157,1	3,4	20
39,9	150,6	4	9
52,9	89	20,7	19
59,7	67,5	15,5	26
64,1	56	3,1	20
72,6	37,7	17,7	16
74,7	33,9	45,1	24

Fonte: HSIEH; RAGHU (1997).

Tabela 2 – Resultado de ensaios de compactação de lodo de ETA realizados

Autores	Coagulante	Umidade ótima (%)	MEAS máxima (kg/m ³)	Umidade ótima (%)	MEAS máxima (kg/m ³)
		Seco a úmido		Úmido a seco	
Basim (1999)	Alumínio	75	722	130	408
	Cal	27	1.388	57	910
	Ferro	25	1.335	110	590
	Cal	80	753	86	698
	Polímero	35	1.216	46	1.030
	Alumínio	62	858	94	630
Xia (1994)	-	20,5-75	580-1.430	25-100	540-1450
Rodriguez et al. (2011)	Ferro	36	1.360	-	-
		38,5	1.320	-	-

Fonte: Elaboração própria

A prática de incorporar lodo em solos ou adicionar aditivos que resultam em misturas de solo-lodo é bastante frequente. A Tabela 3 contém os resultados de

diversas pesquisas realizadas, muitas delas conduzidas no Brasil. Nas pesquisas desenvolvidas no Grupo de Pesquisa em Geotecnia e Meio Ambiente (GEOMA) da UFSM com a mistura de solo e lodo, verificou-se uma tendência de redução da massa específica aparente seca máxima e aumento da umidade ótima, conforme se aumenta a porcentagem de lodo na mistura. Este fato deve-se provavelmente, à baixa massa específica dos sólidos do lodo e das misturas, além do alto poder de absorção de água do lodo, justificada pela alta umidade natural do material (SANTOS, 2017; SANTOS; SCAPIN; PINHEIRO, 2018; KNIERIM, 2020).

Na maioria dos estudos é relatado que os parâmetros de permeabilidade e compactação são influenciados pela quantidade e pelo tipo de lodo proveniente de ETA. O tipo de solo em questão e a presença ou ausência de aditivos, como cimento ou cal, também determinam essas variações. Como demonstrado por Santos (2017) e Knierim (2020), é comprovado que os valores de permeabilidade diminuem com o aumento da proporção de lodo nas misturas.

Tabela 3 – Resultado dos ensaios de compactação e permeabilidade em misturas de solo-lodo

Autores	Traço	Solo aditivo	Umidade ótima (%)	MEAS Máxima (kg/m ³)	K (m/s)
Xia (1994)	1:1	Argiloso	31,8	1.450	3,1 x 10 ⁻¹⁰
	1:0,25	Arenoso	14,5	1.800	5,2 x 10 ⁻⁹
Fadanelli e Wiecheteck (2010)	3%	Cimento	15,0	1.790	-
	5%	Cimento	15,8	1.790	-
	7%	Cimento	16,0	1.760	-
Rodriguez et al. (2011)	1:1	-	31,0	1.460	3,1 x 10 ⁻¹⁰
	1:2	-	31,5	1.450	6,3 x 10 ⁻¹⁰
Coelho (2015)	1:1	Argiloso	31,0	1.460	-
	1:1	Arenoso	14,5	1.800	-
Montalvan (2016)	3:1	-	29,5	1.570	7,0 x 10 ⁻⁹
	4:1	-	19,2	1.730	4,3 x 10 ⁻⁷
	5:1	-	15,3	1.760	1,0 x 10 ⁻⁶
Gonçalves et al (2017)	1:0,5	Argiloso	32,8	1.440	6,3 x 10 ⁻¹⁰
Santos (2017)	15%	Siltoso	25,6	1.550	4,0 x 10 ⁻¹⁰
			26,6	1.455	
			27,8	1.445	
	35%	Siltoso	35,9	1.265	2,0 x 10 ⁻⁹
			35,6	2.275	
			33,4	1.342	
Knierim (2020)	15%	Argiloso	39,0	1.302	7,8 x 10 ⁻¹⁰
	30%	Argiloso	43,5	1.218	3,5 x 10 ⁻⁹
	50%	Argiloso	48,1	1.170	2,5 x 10 ⁻⁶

Fonte: Elaboração própria

2.2 APLICAÇÕES DE SOLO-LETA NA ENGENHARIA CIVIL

A análise de misturas de solo com lodo será discutida neste tópico. Destaca-se que um dos focos principais desta área são as barreiras impermeabilizantes em aterros sanitários. No entanto, com o objetivo de avaliar sua aplicabilidade em diferentes projetos de engenharia civil, pesquisas adicionais sobre misturas de solo com LETA são realizadas, além de estudos direcionados a aterros sanitários. Na Tabela 4 é fornecido um resumo dos estudos identificados na literatura nacional e internacional referentes à utilização de LETA em aterros, cobertura de aterros sanitários, pavimentação e outras aplicações na engenharia.

Tabela 4 – Resumo de aplicação do lodo por diferentes autores

Autor	País	Material	Aplicação
Xia (1994)	EUA	Lodo ETA, Solo Cal, Cinza volante	Cobertura de aterro
Fadanelli e Wiechet (2010)	EUA	Lodo ETA, Solo, Cimento	Pavimentação Rodoviária
Rodriguez et al. (2011)	Brasil	Lodo ETA, Solo	Impermeabilização de fundo e cobertura de aterro
Coelho et al. (2015)	Brasil	Lodo ETA, Solo arenoso, Solo argiloso, Cimento	Pavimentação Rodoviária
Montalvan (2016)	Brasil	Lodo ETA, Solo arenoso	Qualidade geotécnica (aterros, barragens)
Gonçalves (2017)	Brasil	Lodo ETA, Solo arenoso, Solo argiloso	Barreiras impermeabilizantes de aterros
Santos (2017)	Brasil	Lodo ETA, solo siltoso	Impermeabilização de fundo e cobertura de aterro
Knierim (2020)	Brasil	Lodo ETA, Solo argiloso laterítico	Impermeabilização de fundo e cobertura de aterro

Fonte: Elaboração própria

Xia (1994) conduziu uma análise de dez tipos de lodo provenientes de Estações de Tratamento de Água nos Estados Unidos, observando uma considerável variação em suas propriedades devido a diversos fatores, tais como a qualidade da água bruta, o tipo de tratamento empregado, o método de desidratação do lodo, o tipo e a quantidade de produtos químicos utilizados, a quantidade de matéria orgânica presente, as condições climáticas, a idade do lodo, entre outros. O propósito principal desse estudo foi determinar as propriedades geotécnicas de diferentes tipos de lodos de ETA, com vistas ao aprimoramento dos projetos, construção e operação de aterros para resíduos.

Duas técnicas diferentes foram utilizadas durante o processo de compactação das amostras: inicialmente, as amostras foram secas ao ar até que a umidade higroscópica fosse alcançada, e assim, posteriormente a água foi gradualmente adicionada na sua compactação; no segundo método, o autor começou o ensaio com a umidade natural das amostras antes de passar gradualmente à secagem ao ar. No segundo ensaio, foi demonstrado que a diminuição do teor de umidade levou a um aumento na densidade seca. Este fenômeno ocorre depois que os vazios entre os flocos se unem para formar novas ligações inter-particulares. Como resultado, a estrutura em flocos é desfeita e o tamanho das partículas aumenta, tornando o material semelhante à areia seca.

Um estudo conduzido por Fadanelli e Wiecheteck (2010) em Ponta Grossa/PR explorou o uso do lodo proveniente da ETA Pitangui, que emprega sulfato de alumínio como coagulante, na composição de uma mistura de solo-cimento destinada à pavimentação rodoviária. Para determinar a dosagem adequada da mistura solo-cimento, os pesquisadores seguiram as normas do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) e realizaram uma série de ensaios, incluindo granulometria, densidade real dos grãos, limite de liquidez, limite de plasticidade e compactação. Após alcançar os valores ideais de compactação para a mistura de solo e cimento, o solo foi gradualmente substituído pelo lodo da ETA em proporções de 3%, 5% e 7%, e os ensaios foram repetidos. Os resultados indicaram que, devido à presença de partículas mais finas no lodo, a resistência ao cisalhamento da mistura solo-cimento foi reduzida em comparação com a mistura sem lodo. Além disso, foi observado que a densidade e a massa específica do lodo eram inferiores às do solo, devido a um maior índice de vazios e a um percentual de umidade mais elevado (0,33% para o solo e 32,40% para o lodo, ambos os materiais secos ao ar). Essas diferenças afetaram a durabilidade do pavimento e aumentaram o índice de retração volumétrica do material contendo lodo.

Rodriguez et al. (2011) conduziram um estudo na cidade de Londrina/PR, para comparar o comportamento mecânico do lodo proveniente da ETA Cafezal, que utilizava cloreto férrico como coagulante, com uma mistura de solo-lodo. O campo experimental foi estabelecido na Universidade Estadual de Londrina, em que o material foi empregado para impermeabilização do fundo e cobertura de um aterro. Os pesquisadores realizaram a caracterização física do solo, do lodo e das misturas

solo-lodo em proporções 1:1 e 2:1, por via seca, por meio de ensaios de massa específica, granulometria e limites de consistência. Através de seus resultados, o lodo estudado apresentou uma umidade de 2000% imediatamente após ser retirado da ETA. Posteriormente, quando foi depositado em leitos de secagem, em que ficou ao longo de 30 dias, alcançou uma umidade de 15%. Os autores constataram que as misturas atenderam aos critérios mínimos de permeabilidade exigidos e demonstraram potencial para serem empregadas em aterros sanitários, tanto como material para revestimento de fundo e cobertura, quanto como barreiras verticais.

Gonçalves et al. (2017), através do mesmo lodo estudado por Coelho et al. (2015), examinaram as características físico-químicas de misturas feitas com lodo de ETA e solos argilosos e arenosos. O objetivo da pesquisa era usar essas misturas como barreiras impermeabilizantes para impedir a percolação de líquidos lixiviados em aterros sanitários. Foram usados solos argilosos e lodos em proporções de 1:0,5 e 1:1, respectivamente, e solos arenosos e lodos em proporções de 1:0,25. Os pesquisadores descobriram que todos os materiais examinados tinham baixa permeabilidade, o que significa que podem ser usados em projetos de aterros sanitários.

Santos (2017) e Knierim (2020) investigaram o lodo da ETA de Santa Maria/RS, com o objetivo de usá-lo como cobertura de aterros sanitários e camadas de impermeabilização. Os pesquisadores testaram misturas compostas de lodo, solo siltoso (na área do aterro sanitário de Santa Maria) e solo argiloso (na área do aterro de Giruá). Os resultados mostraram que a adição de até 15% de lodo ao solo forneceu parâmetros adequados para essas aplicações.

Portanto, as pesquisas apresentadas neste capítulo elucidam as tendências nos estudos apresentados. A adição de LETA ao solo geralmente leva a uma diminuição no peso específico real dos grãos da mistura, bem como uma redução no peso específico aparente seco máximo, além de aumentar a umidade ótima. Os resultados de absorção mencionados correlacionam esta tendência de aumento da umidade ótima com o LETA. Isso indica que conforme há o incremento do LETA ao solo, a absorção de água tende a crescer.

Os estudos mostram que a permeabilidade diminui com proporções pequenas de LETA e aumenta com teores mais altos do material. A resistência à compressão simples pode diminuir com a inclusão de LETA, dependendo do tipo de solo; no

entanto, a maioria dos estudos mostra que este parâmetro tende a aumentar com teores menores e a diminuir com teores maiores (CASTÃO, 2017; FIGUEIREDO, 2004).

Por fim, foi possível observar que a incorporação de lodo da Estação de Tratamento de Água ao solo aumenta o ângulo de atrito e diminui a coesão da mistura. No entanto, ressalta-se que o LETA apresenta características diferentes de uma estação para outra e de um lote para outro, o que pode resultar em comportamentos diferentes dos mencionados anteriormente.

2.3 ATERROS SANITÁRIOS

Conforme descrito pela norma NBR 8419 (ABNT, 1992, p.01), um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos é definido como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT, 1992, p.01).

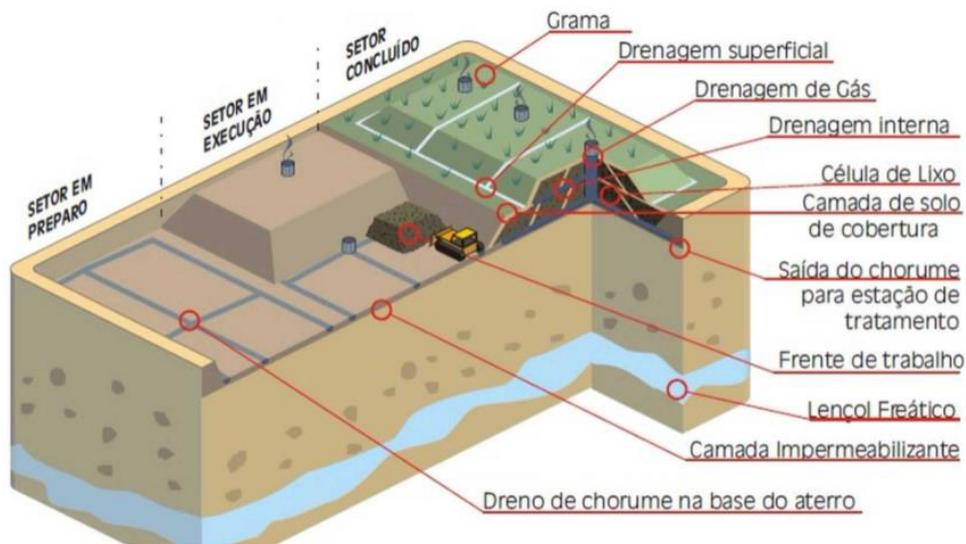
Os aterros são o método mais simples, econômico e vantajoso para a disposição final de resíduos, em comparação com métodos mais complexos como a incineração (COLOMER-MENDOZA, 2013). No futuro, os programas de redução da geração de resíduos e reciclagem podem remover uma grande parte dos resíduos dos aterros, mas ainda será necessário usar os aterros para o descarte adequado dos rejeitos.

Segundo dados divulgados no Panorama da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2023), o Brasil gerou no ano de 2022, um montante de 77,1 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos no país. Desse montante, somente 93% foi coletado e apenas 56,8% tiveram sua destinação correta em aterros sanitários. Evidenciando que aproximadamente 33,3 milhões de toneladas de resíduos não tiveram sua disposição adequada, oferecendo riscos ao meio ambiente e à saúde pública.

Os resíduos sólidos urbanos que são depositados em aterros sanitários formam um maciço heterogêneo e poroso que apresentam características particulares

(TAPAHUASCO, 2009). Os gases e o chorume são gerados como resultado da degradação química, física e biológica dos RSU nos aterros. O lixiviado, um líquido percolado do aterro, é formado por substâncias com alta demanda biológica de oxigênio (DBO). Esse líquido quando infiltrado no solo acaba contaminando as águas subterrâneas (BORGATTO, 2010). Os aterros sanitários representam um considerável risco ambiental e para a saúde humana se não forem planejados, estabelecidos e operados corretamente. Através da NBR 8419 (ABNT, 1992) e NBR 13896 (ABNT, 1997), são estabelecidos os requisitos mínimos para o desenvolvimento de projetos de aterros de RSU, bem como os critérios para o planejamento, instalação e operação desses aterros. A Figura 2 apresenta um esquema de como um aterro sanitário deve ser projetado.

Figura 2 – Diagrama esquemático de um aterro sanitário



Fonte: Machado e Ferreira (2018)

Os aterros sanitários são estruturas geotécnicas complexas, embora sejam considerados uma opção ambientalmente viável para a disposição final de RSU. Isso se deve principalmente ao fato de que os RSU são componentes essenciais da estrutura e devem atender às exigências ao longo dos processos de construção, operação e pós-fechamento dos aterros (DACIOLO, 2020).

2.3.1 Levantamento Planialtimétrico

O levantamento planialtimétrico é a combinação de informações planimétricas e altimétricas em uma única representação, seja uma planta, carta ou mapa. Através dele, há maior facilidade no planejamento e na execução de projetos, pois fornece uma visão abrangente da superfície estudada. A planimetria registra os elementos geográficos em relação às coordenadas planas (x, y), enquanto a altimetria inclui a dimensão vertical através das coordenadas (z), que representam pontos cotados ou curvas de nível.

Em todas as fases de operação do aterro sanitário deve ser incluída a planialtimetria. O levantamento de fundo da estrutura, as camadas intermediárias durante a fase de operação e a superfície final do AS são incorporados aos dados topográficos para controle de recalques superficiais e de deposição de resíduos ao longo do tempo.

Através dos drones, que são veículos aéreos não tripulados (VANTs) controlados remotamente, são realizados os levantamentos topográficos, especialmente de grande escala. Esses VANTs, equipados com sistemas de posicionamento geográfico e sensores fotográficos, podem obter dados da superfície terrestre de forma rápida e eficiente (MELLO, 2020).

2.4 TALUDES E MOVIMENTOS DE MASSA

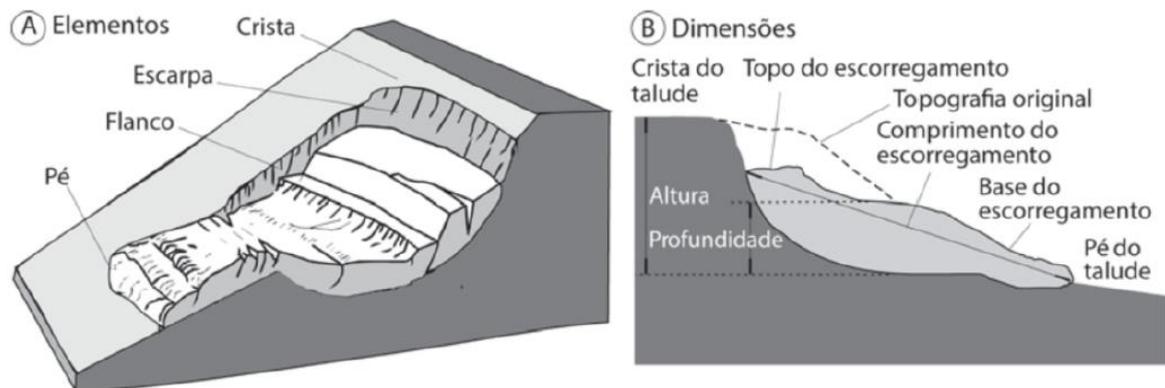
De acordo com Gerscovich (2012), talude é a denominação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha. Ele pode ser natural, também denominado encosta, ou construído pelo homem, como por exemplo, os aterros e cortes. Na construção de aterros sanitários e estruturas de resíduos deve-se haver um maior cuidado, tendo em vista que os rejeitos utilizados na construção de taludes têm seus parâmetros de resistência ao cisalhamento muito variado devido a heterogeneidade do material. Além disso, as obras de taludes devem identificar a situação mais instável da estrutura em termos de estabilidade, podendo ocorrer durante a execução, operação ou após a conclusão dos trabalhos. Segundo Zuquette (2015), os movimentos gravitacionais de massas, também conhecidos como

movimentos de terreno, são fenômenos que frequentemente resultam em desastres ou calamidades resultantes de perdas financeiras e humanas significativas.

O movimento de massa é definido como qualquer deslocamento em um volume de solo específico considerado. Geralmente são abordados na literatura como fenômenos relacionados à instabilidade de encostas, que é gerada através da perda das características do solo na sua ruptura (GERSCOVICH, 2012).

Existem diversas maneiras para classificação dos movimentos de massa. No entanto, no Brasil uma bastante difundida é a de Augusto Filho (1992), em que se utiliza de uma classificação que divide os movimentos em rastejo, escorregamento, queda e corrida. Na Figura 3 é representado o escorregamento, que é o tipo de movimento mais relevante para o estudo de aterros sanitários. Essa forma de movimento tem uma superfície de ruptura clara e pode ocorrer em velocidades médias e até mesmo altas, quando as tensões cisalhantes alcançam a resistência de cisalhamento do solo. As rupturas podem ocorrer de diferentes formas, podendo ser em cunha, circular, planar ou mistas.

Figura 3 – Elementos que caracterizam um volume escorregado.



Fonte: ABNT (2008)

2.5 ESTABILIDADE DE TALUDES

Na análise de estabilidade de taludes é preciso conhecer e considerar a geometria do talude, as propriedades e o comportamento mecânico e hidráulico dos materiais constituintes do talude, as possíveis cargas externas e as condições hidrológicas do local (GERSCOVICH, 2012).

Com relação à resistência ao cisalhamento do solo, o fator de segurança (FS) é o valor da razão entre a resistência (tensão cisalhante máxima do solo) e a resistência mobilizada (tensão cisalhante atuante ao longo da superfície de ruptura devido ao peso próprio do talude e carregamentos externos) (ABNT, 2009). Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), são determinados por meio de ensaios, sendo os ensaios de cisalhamento direto e de compressão triaxial os mais comuns (SOUZA, 2017).

Para obter um modelo geológico-geotécnico representativo, é fundamental conhecer e considerar a influência da geologia e hidrologia local na geometria, os mecanismos e causas da instabilidade, bem como os fatores que podem contribuir para a instabilidade, como poropressão, pressão de percolação de água no interior do solo e supressão a partir de superfícies de percolação preferenciais nos estratos subjacentes (ABNT, 2009).

2.5.1 Métodos de Análise de Estabilidade

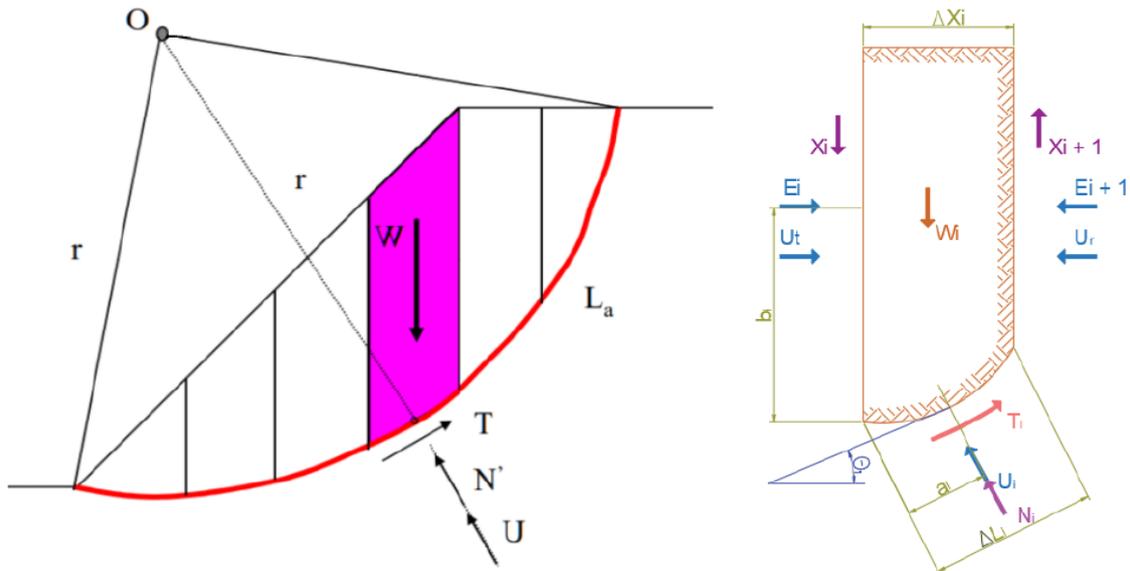
Conforme explicado por Sousa (2019), existem duas maneiras diferentes de realizar análises de estabilidade: o Método de Equilíbrio Limite (MEL) ou o Método dos Elementos Finitos (MEF).

Para análises de estabilidade, o método de equilíbrio limite é o mais popular. Neste método, é obtido um fator de segurança de 1,2 a 1,5, dependendo do nível de segurança contra danos materiais, humanos ou ambientais (ABNT, 2009). Devido ao fato de que os dados utilizados na análise geralmente são valores médios e não sempre são os mais precisos, o julgamento do engenheiro é essencial para decidir quais dados usar, levando em consideração as principais incertezas presentes (FLORES, 2008).

Como demonstrado na Figura 4, o método das fatias está dentro dos Métodos de Equilíbrio Limites. Neste método, a massa instável do solo é dividida em lamelas verticais. Em seguida, cada pedaço é submetido a uma análise de equilíbrio de forças, conforme demonstra as Equações 1, 2 e 3. Ao fazê-lo, é possível calcular as forças e os momentos atuantes e resistidos da estrutura, que são essenciais para o cálculo do fator de segurança. Este método não impõe restrições ao tipo de solo, à configuração do talude ou à abordagem analítica. Além disso, permite que a distribuição da

poropressão seja levada em consideração para determinar a condição mais crítica da estrutura (GERSCOVICH, 2012).

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



Fonte: Nascimento (2022)

$$\sum Fv = 0 \quad (1)$$

$$\sum Fh = 0 \quad (2)$$

$$\sum M = 0 \quad (3)$$

Onde:

O: centro geométrico da superfície de ruptura;

r: raio do arco da ruptura;

La: comprimento do arco de ruptura;

N': esforço normal;

U: poropressão;

T: tensão cisalhante;

Wi: peso da fatia;

Ei: resultante das tensões normais efetivas na face esquerda da fatia;

Xi: resultante das tensões cisalhantes na face esquerda da fatia;

Ei + 1: resultante das tensões normais efetivas na face direita da fatia;

Xi + 1: resultante das tensões cisalhantes na face direita da fatia;

Ti: resultante da resistência ao cisalhamento mobilizada ao longo da base da fatia;

N : 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 .

Em seu estudo, Penasso (2019) fornece uma abordagem sobre esse método, exemplificando algumas das principais técnicas utilizadas para essa análise (Tabela 5).

Tabela 5 – Formulações baseadas no Método das Fatias

Formulações	Características principais
Fellenius (1936)	Método simplificado. Superfície circular. Assume que a resultante das forças entre as fatias é paralela à base de cada fatia, razão pela qual pode apresentar erros significativos na determinação do fator de segurança, geralmente subestimando-o. Recomenda-se utilizar métodos mais acurados.
Simplificada de Bishop (Bishop, 1955)	Apesar de ser um método simplificado tem boa acurácia. Superfície circular. Assume que a resultante de forças que atuam nas laterais das fatias é horizontal e obtém o fator de segurança através do equilíbrio de forças verticais e momentos.
Janbu (1954)	Método simplificado. Desenvolvido para superfícies de formato qualquer. Assume que as forças laterais são horizontais e obtém o FS através de um equilíbrio de forças. Posteriormente, um ábaco de correção foi introduzido para melhorar a acurácia do FS.
Morgenstern e Price (1965)	Método rigoroso. Desenvolvido para superfícies de formato qualquer. Assume que a inclinação das forças laterais obedece a uma função $f(x)$ prescrita. As inclinações são determinadas durante o processo de cálculo para satisfazer às condições de equilíbrio de forças e momentos.
Spencer (1967)	Método rigoroso. Desenvolvido para superfícies de formato qualquer. Assume que a inclinação das forças laterais é a mesma para todas as fatias. A inclinação é determinada durante o processo de cálculo de modo a satisfazer as condições de equilíbrio de forças e momentos.

Fonte: Penasso (2019).

2.6 PARÂMETROS DOS MATERIAIS

Os resultados das análises de estabilidade de taludes são derivados dos parâmetros dos materiais envolvidos e do meio em que o talude está localizado. É crucial considerar o cálculo das máximas tensões cisalhantes suportadas pelo talude, bem como a considerar quantidade de água presente.

2.6.1 Resistência ao cisalhamento

Segundo Braja (2006), a resistência ao cisalhamento do solo refere-se à resistência interna do solo, por unidade de área, de resistir a rupturas e deslizamentos em qualquer plano dentro dele. O autor destaca a importância de compreender a natureza dessa resistência para analisar questões de estabilidade do solo, como a estabilidade de taludes.

A resistência ao cisalhamento do solo é determinada pelo ângulo de atrito (ϕ) e pela coesão (c). O ângulo de atrito indica o ângulo máximo em que a força exercida na superfície pode se inclinar em relação à normal do plano de contato antes que ocorra o deslizamento. A equação 4 mostra como a resistência ao cisalhamento é afetada pelo ângulo de atrito e pelo valor de coesão (SOUZA PINTO, 2013).

$$T = N \times \operatorname{tg}\phi \quad (4)$$

Onde:

T: Força Horizontal;

N: Força Vertical.

A coesão independe da tensão normal atuante e representa a resistência resultante das interações químicas entre as partículas do solo (SOUZA PINTO, 2013).

Conforme Oweis (1993) observa, a aplicação de um critério de ruptura Mohr-Coulomb adaptado para Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é viável para a caracterização de seus parâmetros de resistência, desde que se leve em conta que há uma distinção no comportamento geotécnico de um solo quando comparado ao RSU. Dessa forma, é possível parametrizar a resistência ao cisalhamento dos RSU

com base no ângulo de atrito e na coesão, levando em consideração a tensão normal atuante no plano de ruptura (MANASSERO et al., 1996 citado por STRAUSS, 1998).

O Círculo de Mohr, ilustrado na Figura 5, é uma ferramenta que ajuda a compreender e visualizar os problemas relacionados à tensão e deformação em um ponto do meio contínuo (ORTIGÃO, 2007). O critério de ruptura de Mohr-Coulomb é representado a seguir pela Equação 5.

$$\tau' = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi' \quad (5)$$

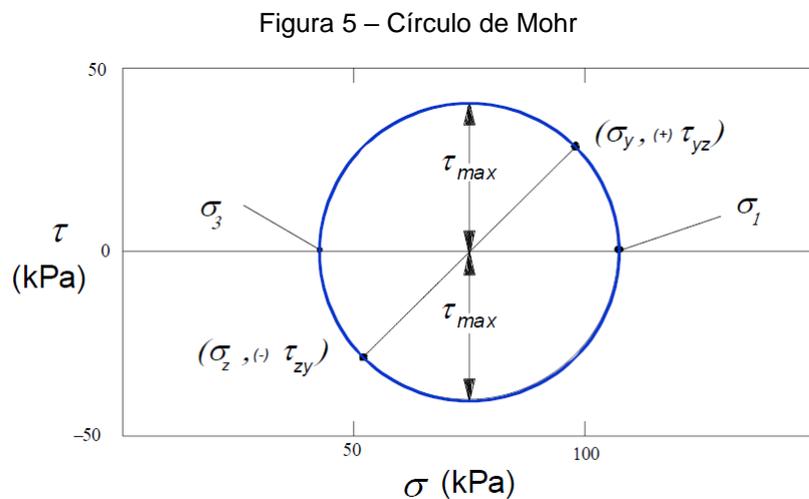
Onde:

τ' : resistência ao cisalhamento;

c' : coesão;

σ' : tensão efetiva normal ao plano de ruptura; e

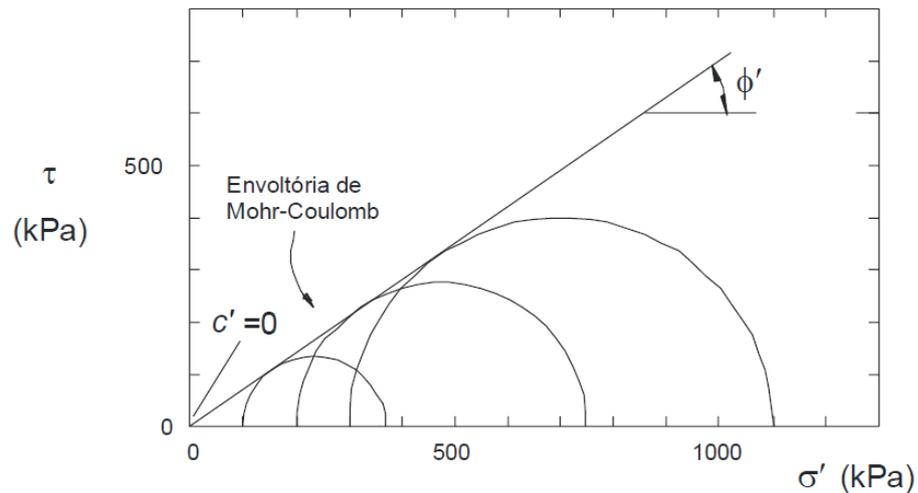
φ' : ângulo de atrito interno do material.



De acordo com Braja (2006), os parâmetros de resistência ao cisalhamento podem ser obtidos por meio de testes laboratoriais, como cisalhamento direto, cisalhamento simples, deformação triaxial, deformação triaxial plana e cisalhamento anular. Os Círculos de Mohr podem ser traçados a partir dos resultados dos ensaios dos parâmetros de resistência para vários valores de tensão. A envoltória de resistência de Mohr-Coulomb é a reta tangente aos círculos de Mohr (Figura 6).

O gráfico em questão é interpretado com base em sua divisão em duas zonas distintas: os pontos situados abaixo da linha representam estados de tensão pré-ruptura, enquanto aqueles acima indicam um material já rompido. Assim, a linha delimita a condição crítica de ruptura.

Figura 6 – Envoltória de resistência Mohr-Coulomb



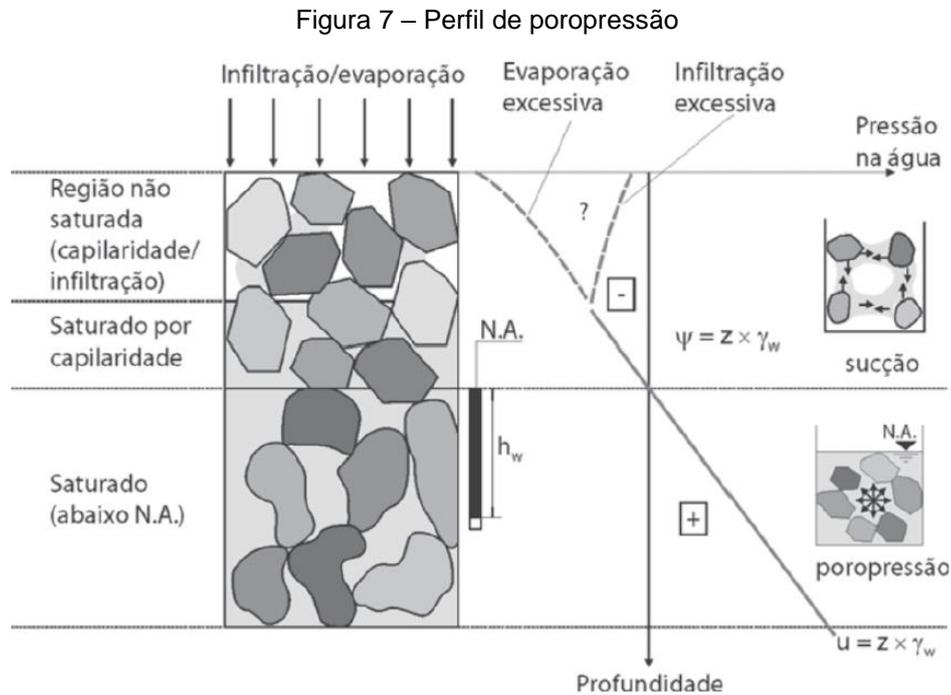
Fonte: Ortigão (2007)

2.6.2 Pressão na água

Os solos são compostos por três fases: sólidos, ar e água. Os esforços são transferidos tanto pelos grãos quanto, dependendo do nível de saturação, pela água. De acordo com a Figura 7, ao examinar um corte longitudinal em um terreno com presença de água, são identificadas três zonas: uma zona saturada abaixo do nível de água, uma zona não saturada e uma zona saturada por capilaridade (GERSCOVICH, 2012).

Normalmente, na análise de estabilidade de taludes, a área mais relevante é aquela saturada abaixo do nível de água. Em locais como aterros sanitários, em que há presença de chorume e biogás dos resíduos sólidos, essa água gera pressões no solo. Essas pressões tendem a separar as partículas do solo, o que resulta em uma redução da resistência ao cisalhamento. Isso ocorre porque a água nos espaços vazios do solo não é capaz de resistir a tensões de tração.

Nos aterros sanitários, com a frequente utilização dos piezômetros, o uso do parâmetro ru torna-se essencial devido à sua facilidade de implementação e obtenção de dados, auxiliando em diversas análises de estabilidade.



Fonte: Gerscovich (2012)

Onde:

γ_w : peso específico da água;

z : altura do perfil do solo;

ψ : sucção;

u : pressão neutra/poropressão.

Considerar a pressão gerada pela água, chamada de poropressão, nas análises se torna mais viável ao utilizar o coeficiente ru . Esse coeficiente é calculado como a razão entre a pressão neutra e as tensões verticais, que são resultado do peso próprio do material e da água. Isso é representado pela Equação 6.

$$ru = \frac{u}{\sigma_v} = \frac{\gamma_w \cdot h_p}{\gamma_t \cdot z} \quad (6)$$

Onde:

ru : razão de poropressão;

σ_v : tensão vertical;

$h\rho$: nível de água do solo;

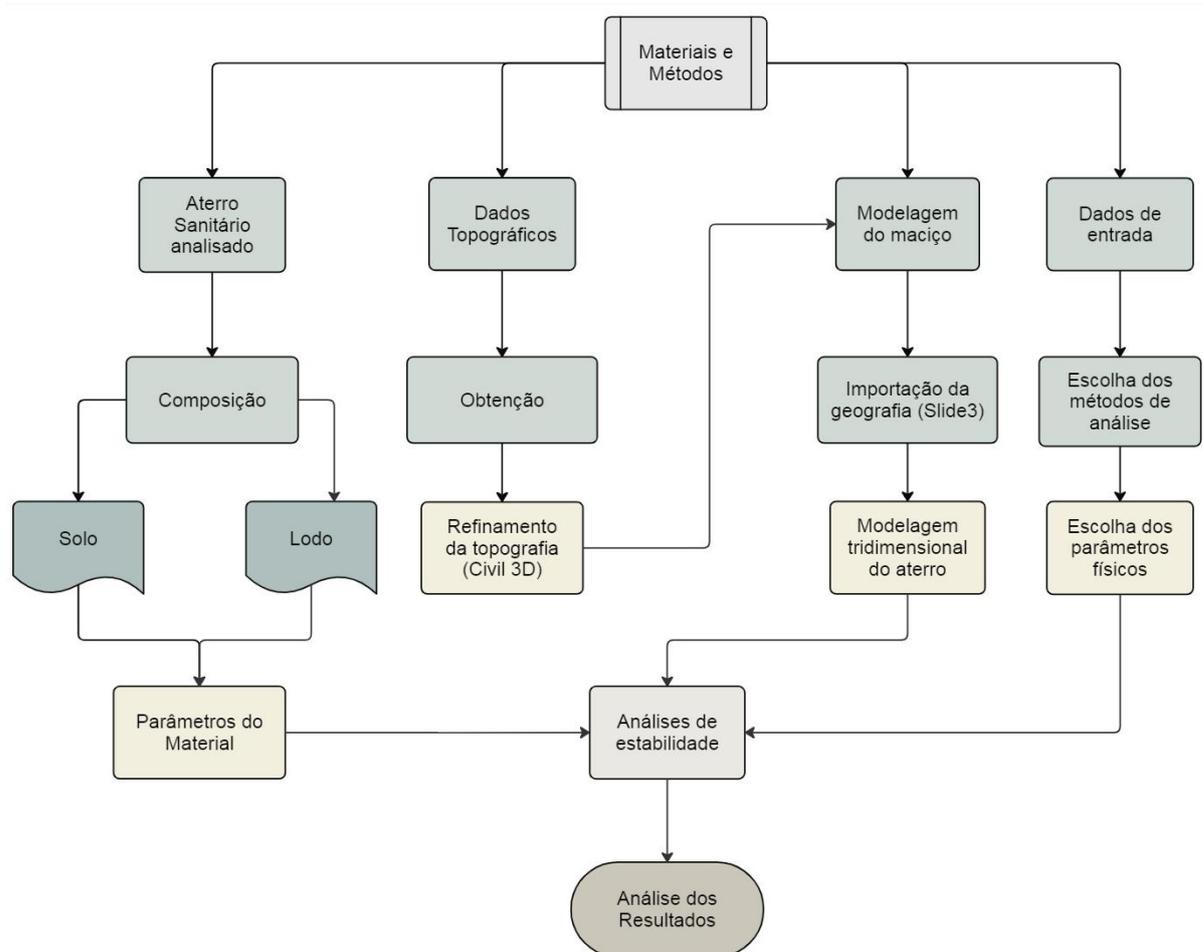
γ_t : peso específico do solo;

γ_w : peso específico da água (ou líquido considerado).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os dados necessários e como foram tratados para cumprir os objetivos da presente pesquisa, e realizar a modelagem tridimensional do aterro sanitário e sua posterior análise. O fluxograma demonstrado na Figura 8 lista todas as etapas da pesquisa desenvolvida.

Figura 8 – Fluxograma das etapas de pesquisa



Fonte: Elaboração própria.

3.1 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS

Duas ferramentas computacionais foram utilizadas para o desenvolvimento da metodologia proposta. A seguir, aborda-se a respeito delas.

3.1.1 Autodesk Civil 3D

O Autodesk Civil 3D, desenvolvido pela Autodesk, visa a elaboração de projetos de infraestrutura em grande escala (rodovias, terraplanagem, loteamentos, levantamentos topográficos e outros), onde são abordados por meio da metodologia BIM (*Building Information Modeling*). O programa traduz dados topográficos, o que permite sua rápida manipulação após o levantamento em campo. O programa também oferece ferramentas como modelagem de superfícies e elevações, georreferenciamento, movimentação de terra, volumetria e a possibilidade de instalar plugins que melhoram sua funcionalidade.

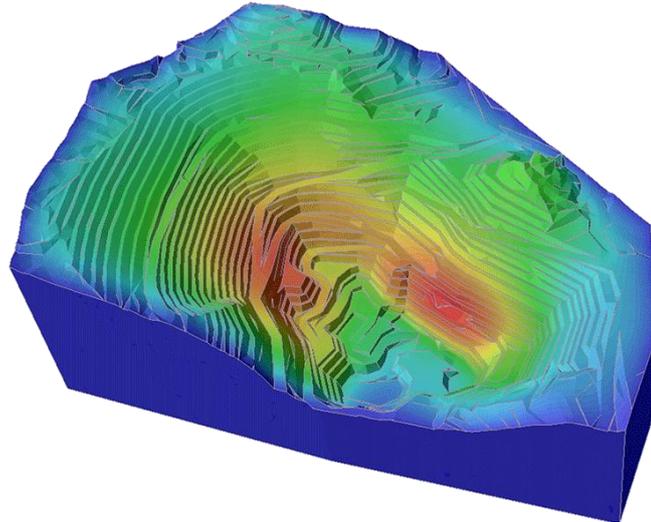
3.1.2 Rocscience Slide 3 – 3D limit equilibrium analysis for slopes

O software Rocscience Slide 3 é projetado para análise de estabilidade tridimensional de estruturas geotécnicas para aplicações civis, de mineração ou ambientais, contando com os seguintes métodos de análises: Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, GLE/Morgenstern-Price e Spencer. Aplicável tanto para rochas quanto para solos, o Slide 3 é um programa de análise pelo método do equilíbrio limite de propósito geral para escavações subterrâneas, projeto de túneis e suporte, escavação de superfície, projeto de fundações, aterros, consolidação, infiltração de águas subterrâneas e muito mais.

Após a análise ser calculada, o Slide 3 oferece numerosas opções para visualização e exibição de resultados em 2D e 3D, conforme demonstrado na Figura 9. O Slide3 se integra com outros softwares da Rocscience, como RS3 e Slide2, permitindo uma análise mais completa e multidimensional dos projetos. Essa integração facilita o fluxo de trabalho e a troca de dados entre diferentes ferramentas de análise. A ferramenta também permite a realização de análises probabilísticas, considerando a variabilidade dos parâmetros de entrada e fornecendo uma avaliação

de risco mais abrangente, crucial para projetos que demandam uma análise detalhada da incerteza.

Figura 9 – Exemplo de geometria complexa analisada no software



Fonte: Rocscience (2024)

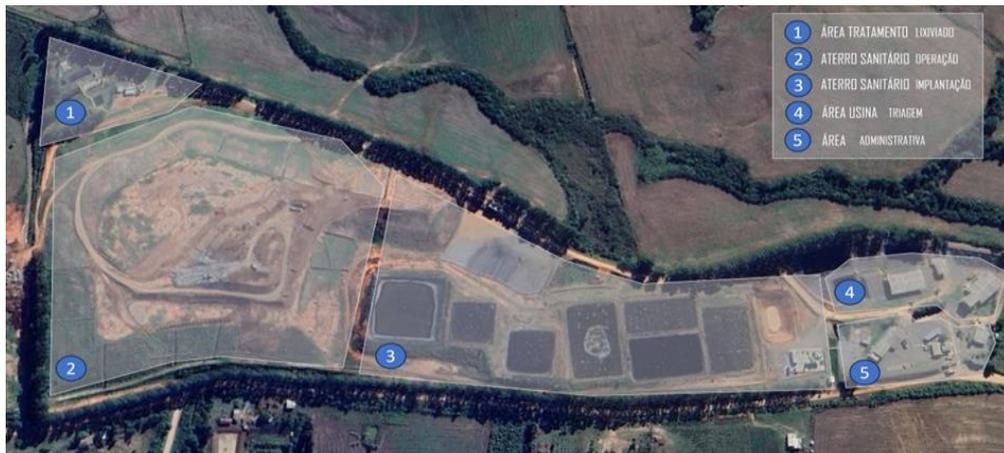
3.2 ATERRO SANITÁRIO

O aterro sanitário modelado e analisado, é composto por oito fases de implantação, em que possui uma área de 24 hectares e tem capacidade para receber 2,5 milhões de toneladas de resíduos (Figura 10). Os resíduos são depositados em diferentes datas e em frentes de operação distintas. Existem áreas em que a deposição de resíduos foi concluída e outras que estão em operação. Em todas as áreas, o aterro é submetido a diversos monitoramentos para garantir a segurança geotécnica e ambiental.

Observa-se que foram utilizadas as informações da topografia de fundo e topo do aterro neste estudo, contudo as informações sobre as propriedades dos RSU e poropressão adotados nas análises de estabilidade foram elencadas pelo autor, não correspondendo ao comportamento real do aterro.

A modelagem tridimensional da estrutura do AS é realizada com base nos dados topográficos da área, levantados principalmente para acompanhamento do volume de RSU depositado no local. Posteriormente, a análise do aterro é realizada com a inserção dos parâmetros dos materiais e a seleção dos métodos de análise.

Figura 10 – Divisão das áreas do aterro sanitário



Fonte: Elaboração própria

3.2.1 Dados Topográficos

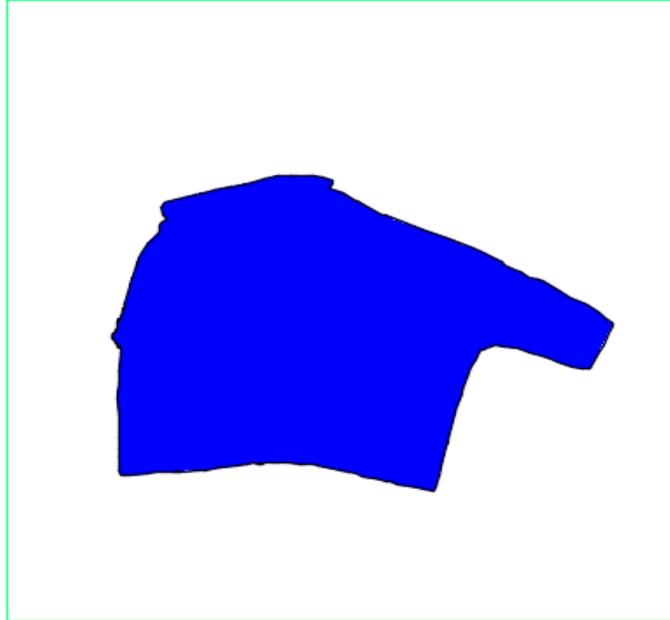
Através dos dados obtidos pelo levantamento planialtimétrico realizado no aterro sanitário para verificação do volume de RSU depositado e monitoramento geotécnico dos deslocamentos superficiais, foram inseridas as respectivas curvas de nível no software Civil 3D para posterior criação das superfícies, conforme pode ser visualizado nas Figura 11, Figura 12 e Figura 13, utilizadas como base da modelagem tridimensional. Ressalta-se que foram feitas algumas modificações nas superfícies para redução do esforço computacional.

Figura 11 – Superfície de fundo



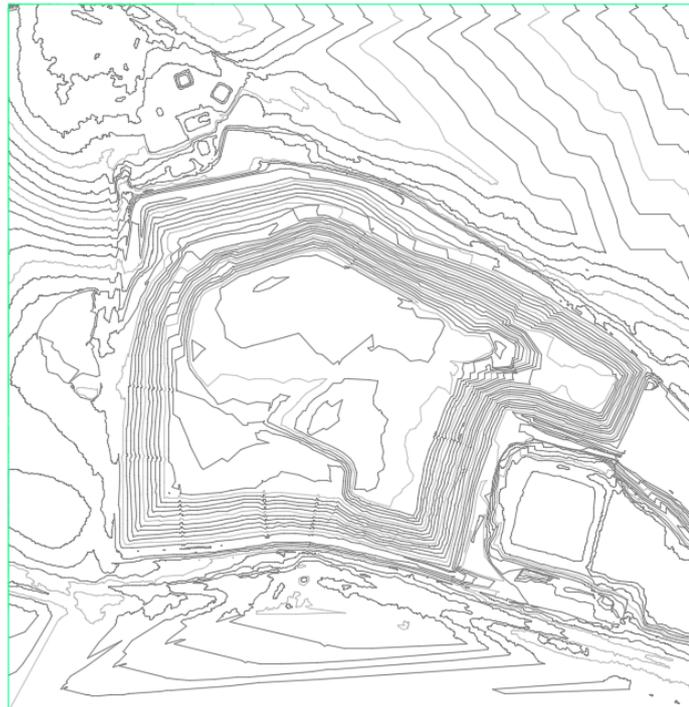
Fonte: Elaboração própria

Figura 12 – Localização das geomembranas no fundo do aterro



Fonte: Elaboração própria

Figura 13 – Superfície atual



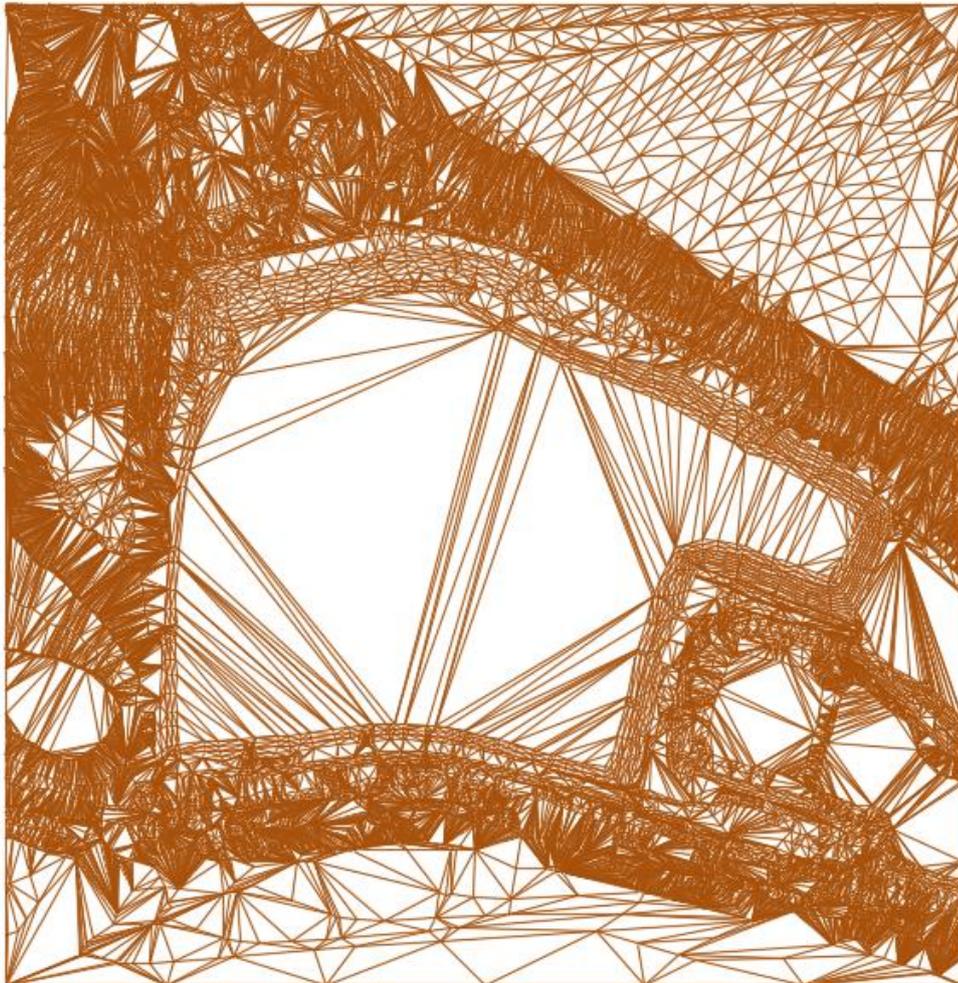
Fonte: Elaboração própria

As superfícies extraídas não podem ser lidas diretamente pelo software Slide3, pois não são objetos tridimensionais. Elas servem apenas como base para o software Civil 3D criar a superfície 3D que será importada.

3.2.2 Modelagem tridimensional do maciço

Para a modelagem do aterro sanitário, primeiramente foram refinados todos os dados topográficos no software Civil 3D, a fim de torná-los compatíveis com o Slide3. Após a importação da topografia, ocorre um deslocamento do limite da topografia e sua reclassificação. Inicialmente classificada como *SUPERFÍCIE TIN*, composta de triangulações feitas entre as curvas de níveis, a topografia é convertida em uma *MALHA*, formando um sólido 3D. Na Figura 14, é representada a malha do fundo do aterro junto com a sua superfície expandida (linhas marrons).

Figura 14 – Sólido 3D do fundo do aterro

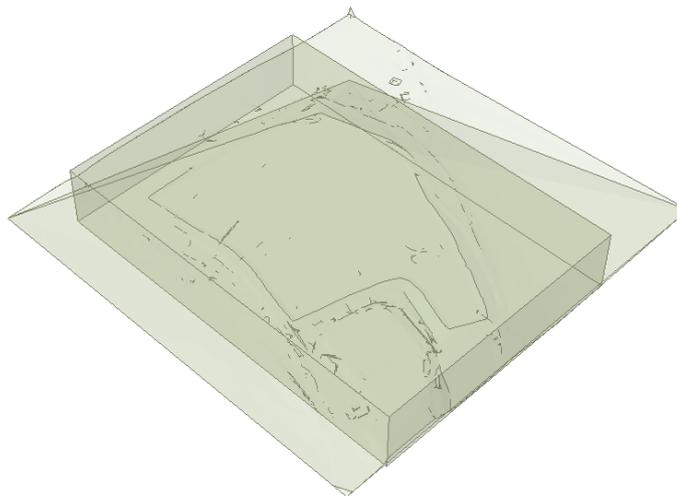


Fonte: Elaboração própria

3.3 ANÁLISES DO ATERRO POR INTERMÉDIO DO SLIDE3

Com os sólidos 3D aterro sanitário finalizados, os dados são exportados para o software Slide3. A superfície, agora caracterizada como um sólido 3D, permite que o programa leia o arquivo corretamente. A extrusão da curva de nível limite garante a criação precisa dos volumes que representam os materiais entre as superfícies, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Superfícies extrudadas para encaixe no volume externo



Fonte: Elaboração própria

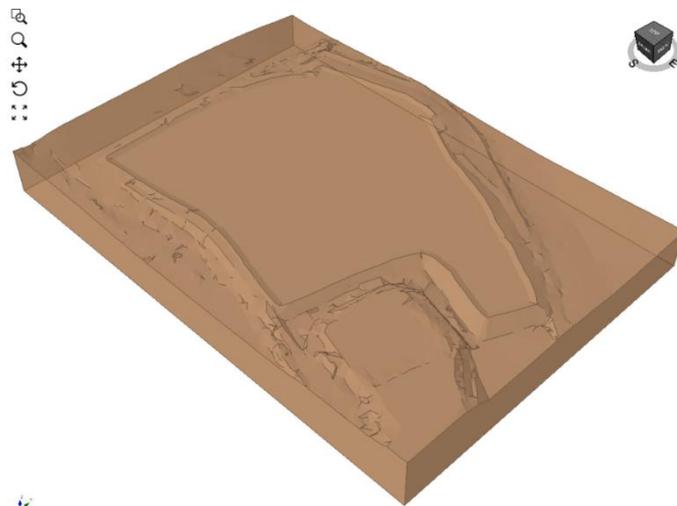
Após exportados e gerados os volumes externos, o software remove as arestas das superfícies 3D não contempladas e cria o volume entre as malhas tridimensionais, é realizado o “corte do aterro” que consiste na remoção do volume ocupado acima de sua estrutura. O processo é feito colocando este volume na função *CONSTRUCTION* e em seguida, selecionando a opção de descarte da geometria de construção. Com essa etapa finalizada, é chegado ao fim da modelagem do aterro sanitário. A superfície de fundo, a geomembrana no fundo do AS e a superfície atual são visíveis, respectivamente, nas Figura 16, Figura 17 e Figura 18, devido à opacidade acentuada das camadas que compõem o aterro sanitário.

Antes de serem realizadas as análises de estabilidade global, foram necessárias as atribuições de parâmetros e materiais para cada volume do modelo, como peso específico, coesão e ângulo de atrito interno; a seleção do método de análise desejado, sendo utilizado neste trabalho o método de GLE/Morgenstern-Price, por ser um

método rigoroso e que pode ser aplicado a qualquer geometria de superfície de ruptura; e a escolha do tipo de configuração da superfície de ruptura, conforme ilustra a Figura 19.

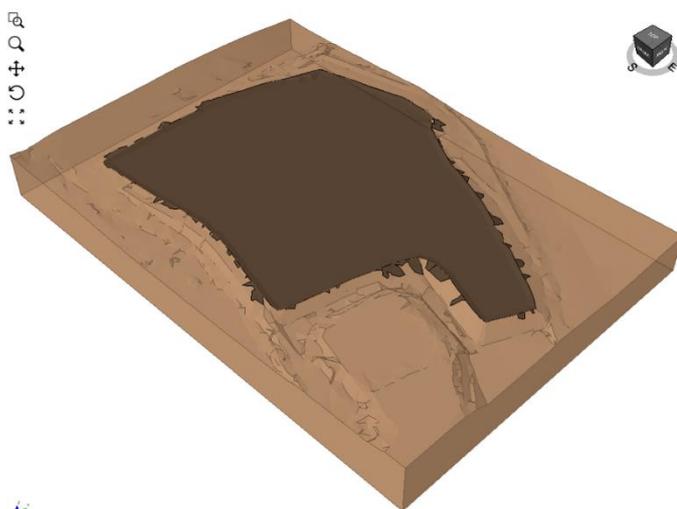
A escolha do tipo de ruptura determina a configuração da superfície, sendo neste trabalho escolhida a superfície circular. A configuração da superfície de ruptura pode ser alterada de acordo com as especificações do projetista para obter uma análise mais precisa da estrutura de um aterro sanitário. A superfície de ruptura possui a opção de ser alterada para destacar a interface entre o RSU e a superfície, bem como entre a geomembrana e o RSU.

Figura 16 – Modelagem finalizada da superfície de fundo



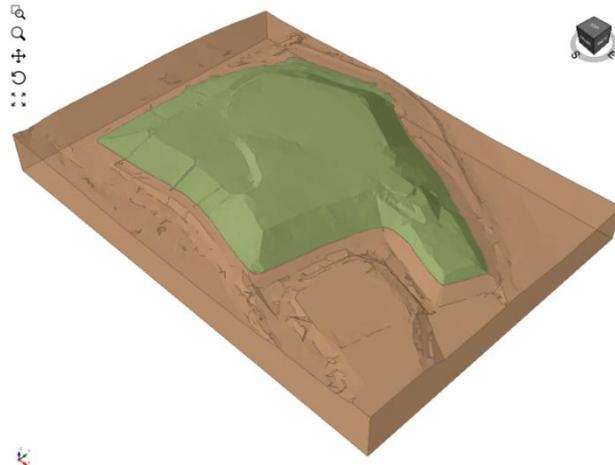
Fonte: Elaboração própria

Figura 17 – Modelagem finalizada da geomembrana



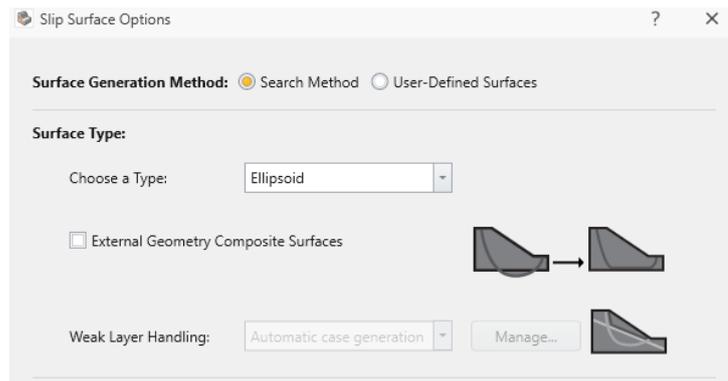
Fonte: Elaboração própria

Figura 18 – Modelagem finalizada da superfície atual



Fonte: Elaboração própria

Figura 19 – Configurações da superfície de ruptura



Fonte: Elaboração própria

A fim de apresentar resultados mais próximos à realidade, como não foi possível realizar ensaios in situ, foram selecionados parâmetros de materiais de vários autores que realizaram ensaios no RSU, incluindo Teche (2021), ensaios de Rebelo (2003) para as geomembranas e para a fundação valores baseados no estudo de Magalhães (2015). A Tabela 6 foi adaptada do Slide3 e contém os valores usados para realizar as análises de estabilidade na modelagem tridimensional.

Tabela 6 – Parâmetros de materiais adotados

Nome	Cor	Peso específico (kN/m³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
RSU		10	19	28
Geomembrana		10	0	15

Solo de Fundação		19	15	25
---------------------	--	----	----	----

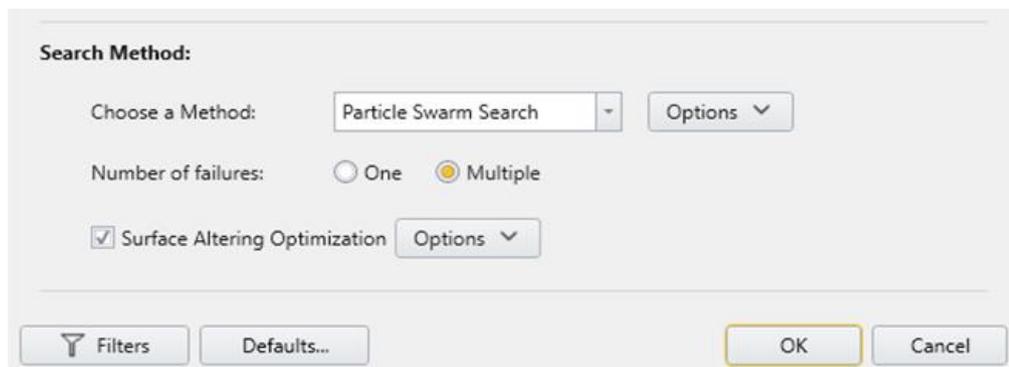
Fonte: Adaptado do Slide3

3.3.1 Análise De Estabilidade Inicial

A partir da atribuição dos parâmetros dos materiais nos volumes, foi realizada a análise de estabilidade global do aterro sanitário, para identificar em que áreas do AS haviam os menores valores de FS, indicando as principais regiões críticas do aterro sanitário. Para isso, foi utilizada a função *MMO (MULTIPLE MINIMA OPTIMIZATION)*, que considerou tanto o FS mínimo global calculado pela opção "ONE" quanto os FS mínimos locais calculados pela opção "MULTIPLE", fazendo com que o algoritmo buscasse por mínimos locais em vez de apenas um único mínimo global, sendo assim gerado os três FS mínimos mais críticos de todo o modelo (Figura 20).

Com essa abordagem, foi realizada uma intervenção mais precisa e eficiente para garantir a estabilidade do aterro sanitário, através da utilização de um dique de contenção.

Figura 20 – Função MMO



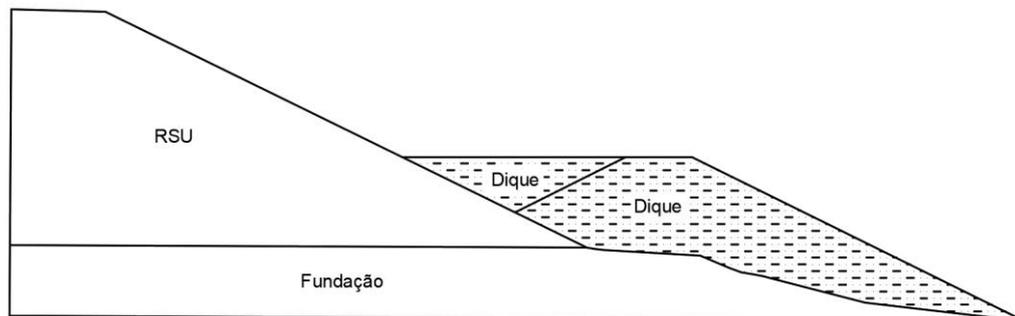
Fonte: Elaboração própria

3.3.2 Modelagem Dos Diques

Através dos resultados obtidos pela análise da estabilidade global do aterro sanitário, constatou-se a necessidade de realizar uma contenção na porção norte do aterro. A solução adotada para a estabilização do AS foi a utilização de um dique, que teve como base uma variante do método de jusante de barragens de rejeitos de

mineração. No método, conforme o alteamento dos rejeitos é realizado, o eixo da barragem se desloca para jusante; a partir daí vão sendo construídos sucessivos diques à jusante apoiados sobre o material depositado. No caso deste trabalho, como já havia sido depositado todo o material de RSU sobre o aterro e posterior implantação do dique, optou-se pela criação de somente um dique de altura variada apoiado sobre o RSU, com a finalidade de garantir a estabilidade do maciço (Figura 21).

Figura 21 – Adaptação do método a jusante do dique



Fonte: Elaboração própria

Inicialmente, foram definidas as geometrias dos diques, variando-se as alturas de aterro ($H=3$ m, $H=5$ m e $H=7$ m), mantendo a inclinação do talude de $2H:1V$ e sendo adotadas bermas de 5 m de largura no topo. Contudo, salienta-se que o dique de 7 m por apresentar uma altura elevada, fez-se necessário adicionar bermas ao longo de sua elevação. Essas bermas, com 3 metros de largura cada, foram estrategicamente posicionadas em duas camadas ao longo da altura do dique. A primeira berma foi instalada a uma altura intermediária, enquanto a segunda foi colocada próximo ao pé do dique.

3.3.2.1 Modelagem dos Diques no CIVIL 3D

O procedimento realizado para modelagem dos diques no software CIVIL 3D é semelhante para as três alturas. Para preparação e criação do dique de 3 m, inicialmente, foram utilizadas as curvas de nível existentes do terreno do aterro sanitário para criar a base do projeto. Com esses dados, foi montada uma *POLYLINE* para representar a berma do topo do dique, com uma largura de 5 metros. A construção do dique foi realizada de cima para baixo, adotando a cota desta

POLYLINE em 143 metros. Em seguida, a *POLYLINE* foi transformada em uma *FEATURE LINE*, permitindo o uso da ferramenta *GRADING*.

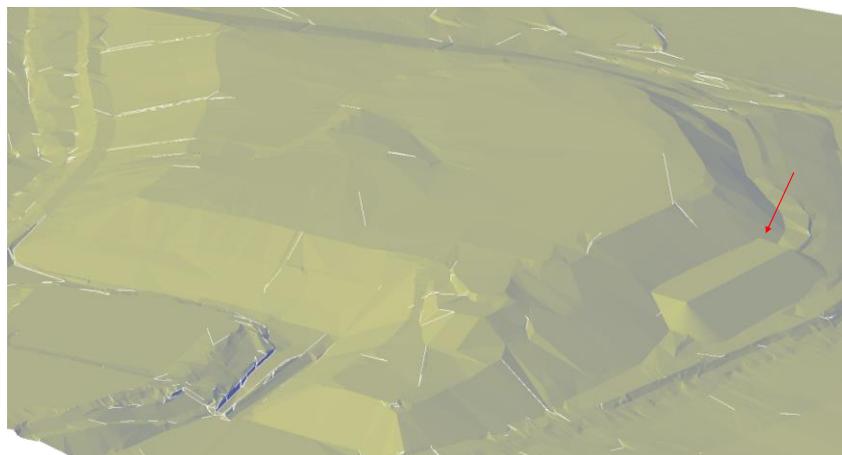
A ferramenta *GRADING* foi utilizada com a opção *GRADE TO SURFACE*, que gera uma superfície a partir da *FEATURE LINE* ajustando a inclinação do talude com a superfície do terreno, garantindo uma transição suave e precisa entre o dique e o terreno existente.

Após gerar a superfície do dique, uma nova *FEATURE LINE* foi criada para realizar o preenchimento com a ferramenta *GRADING*. Este passo assegurou que o dique se conectasse adequadamente ao RSU, completando a modelagem do dique de 3 metros.

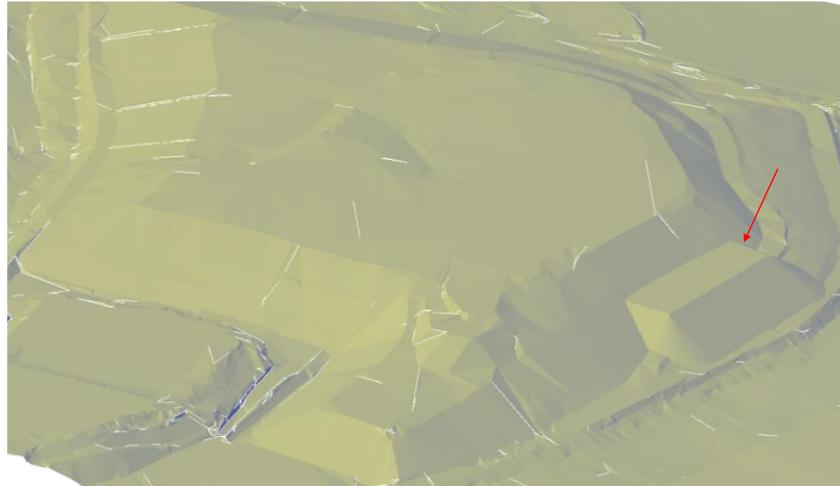
Os processos realizados para o dique de 3 m foram repetidos para os diques de 5 m e 7 m, com as devidas adaptações para suas respectivas alturas. O dique de 5 m seguiu o mesmo procedimento do dique de 3m, com a diferença na cota adotada e nas dimensões ajustadas para a nova altura.

Já para o dique de 7 m, além dos passos anteriores, foi exigida a implementação de duas bermas adicionais de 3 metros cada, ao longo de sua extensão, para garantir a estabilidade da estrutura devido à sua altura elevada. As informações para a criação dessas bermas foram incorporadas na ferramenta *GRADING*, que ajustou a inclinação do talude e distribuiu as bermas de maneira uniforme. Na Figura 22 são apresentadas as superfícies dos diques concluídas. Após a modelagem detalhada dos diques, a superfície gerada foi convertida em volume para posterior análise no Slide3.

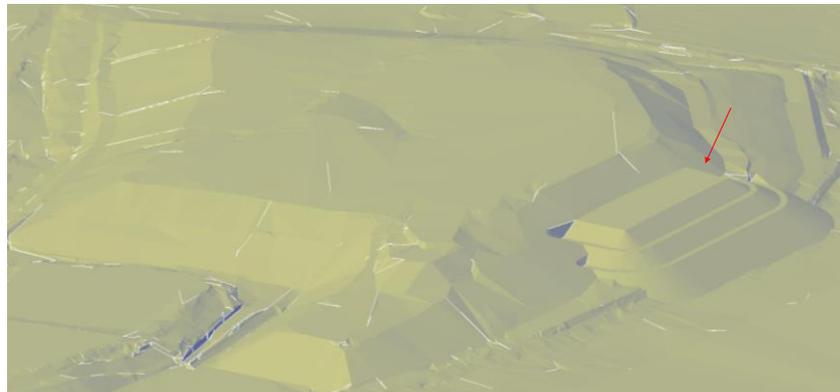
Figura 22 – (a) Dique de 3 m; (b) Dique de 5 m; (c) Dique de 7 m



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaboração própria

3.3.3 Análise de Estabilidade após os Diques

Os materiais considerados nas análises de estabilidade por meio de métodos equilíbrio-limite foram os resíduos sólidos urbanos que compõem o maciço, o solo de fundação, o solo-LETA para execução do dique, e a geomembrana localizada entre a fundação e o RSU. Os parâmetros utilizados para o RSU, fundação e geomembrana são os mesmos da análise de estabilidade inicial do aterro sanitário.

Para o dique, foram usados os parâmetros obtidos do ensaio de compressão triaxial consolidado drenado (CD) para a mistura composta de 85% Solo + 15% LETA, resultados do trabalho de Knierim (2020). Sua pesquisa baseou-se no estudo do lodo da ETA de Santa Maria/RS para aplicação em camadas de impermeabilização e cobertura de aterros sanitários, avaliando as propriedades de compactação, permeabilidade e resistência de misturas de lodo e solo argiloso (área do aterro de

Girúá). A decisão pela mistura composta de 85% Solo + 15% LETA neste trabalho foi por apresentar como a mais favorável para aplicação em aterros sanitários. Essa situação pode ser justificada em função de que os resultados apresentados pela autora, demonstraram que houve um aumento no ângulo de atrito e teve a menor redução na coesão efetiva, quando comparada às outras análises, além de ser o material mais impermeável. Na Tabela 7, são apresentados os parâmetros utilizados.

Tabela 7 – Parâmetros de materiais adotados para o dique

Nome	Cor	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
RSU		10	19	28
Geomembrana		10	0	15
Dique		12,9	23,09	24,65
Solo de Fundação		19	15	25

Fonte: Adaptado do Slide3

As análises de estabilidade foram realizadas de maneira paramétrica, a partir de valores típicos de poropressão reportados em literatura técnica. Foram adotadas no trabalho as seguintes hipóteses:

- Diques de Solo-LETA de 3 m, 5 m e 7 m com $R_u=0,30$ para RSU e 0,15 para Geomembrana;
- Diques de Solo-LETA de 3 m, 5 m e 7 m com $R_u=0,30$ para RSU e 0,30 para Geomembrana;
- Diques de Solo-LETA de 3 m, 5 m e 7 m com $R_u=0,60$ para RSU e 0,30 para Geomembrana.

Após serem atribuídos os parâmetros e materiais da Tabela 7 aos volumes, foram mantidas as configurações já estabelecidas, tais como a seleção do método de análise desejado e a escolha do tipo de configuração da superfície de ruptura. Na sequência, foram realizadas as análises para todas as hipóteses.

Os fatores de segurança adotados foram estabelecidos conforme a NBR 11682 (ABNT, 2009). De acordo com esta norma, o fator de segurança (FS) mínimo recomendado para situações definitivas é de 1,5, garantindo um alto nível de segurança contra danos materiais e ambientais, além de um nível médio a alto de segurança contra a perda de vidas humanas.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Antes de serem apresentados os resultados deste trabalho salienta-se que as modelagens foram realizadas a partir de dados topográficos reais, extraídos de intensos levantamentos de campo realizados pela equipe gestora do aterro sanitário. Contudo, as interpretações de estabilidade, os parâmetros geotécnicos, bem como os valores de estabilidade obtidos são apenas de exercício acadêmico e não representam o comportamento real do aterro sanitário.

4.1 MODELO TRIDIMENSIONAL

Para comparar a planialtimetria local, a modelagem tridimensional concluída apresentada na metodologia, foi sobreposta a uma fotografia de satélite, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Sobreposição da Modelagem em Fotografia por Satélite



Fonte: Elaboração própria

A sobreposição da modelagem tridimensional sobre a fotografia de satélite demonstrou a eficácia da modelagem em representar a planialtimetria local. A comparação visual entre as duas imagens revela que a partir da modelagem 3D foi possível captar com precisão as variações topográficas do terreno, incluindo

elevações, depressões e contornos. Essa precisão foi crucial para a posterior análise de estabilidade do aterro, pois permitiu uma melhor compreensão das condições geotécnicas reais.

4.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE INICIAL

Com o modelo tridimensional finalizado e os materiais configurados, a análise de estabilidade da estrutura completa foi realizada utilizando o método de GLE/Morgenstern-Price. Conforme ilustrado na Figura 24, os menores fatores de segurança encontrados no aterro sanitário estão localizados no talude norte, calculados nos valores de 1,329 e 1,213, sendo estes valores inferiores aos preconizados por norma ($FS > 1,5$). Observando as estruturas pela vista lateral, exibidas nas Figuras 25 e 26, são retratadas com detalhe as superfícies de ruptura circular, em conformidade com as configurações apresentadas na metodologia, indicando que o software fornece uma análise coerente para os dados de entrada utilizados no modelo.

Figura 24 – Análise de Estabilidade Inicial do Aterro Sanitário, em (a) $FS = 1,329$; e (b) $FS = 1,213$

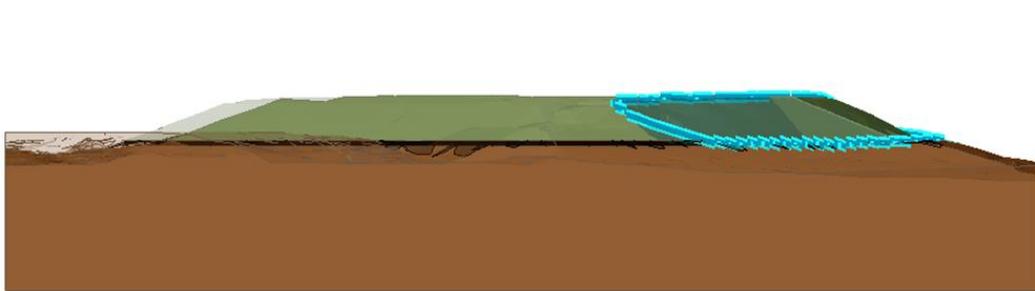


Fonte: Elaboração própria

Após obtidos os resultados da análise de estabilidade inicial do AS, confirmou-se a necessidade da implantação do dique na porção norte do aterro, visando aumentar o seu fator de segurança. Com a construção do dique finalizada, foi dado prosseguimento para as análises de estabilidade com os diques de contenção.

Figura 25 – Superfície de Ruptura do Método GLE: FS = 1,329

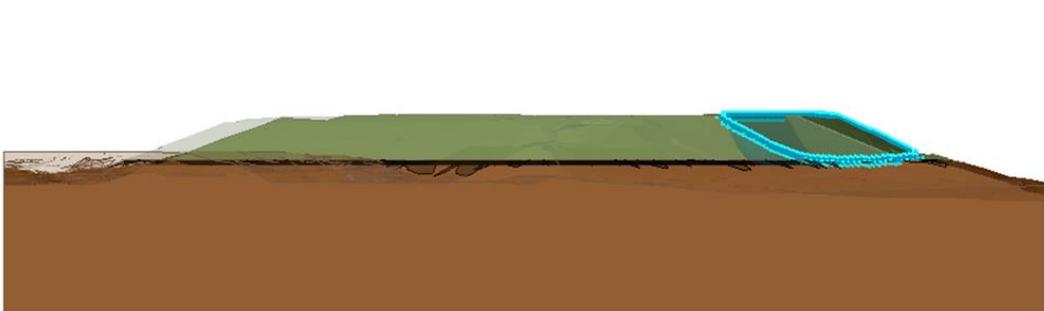
Local FS: 1.329



Fonte: Autor (2024)

Figura 26 – Superfície de Ruptura do Método GLE: FS = 1,213

Local FS: 1.213

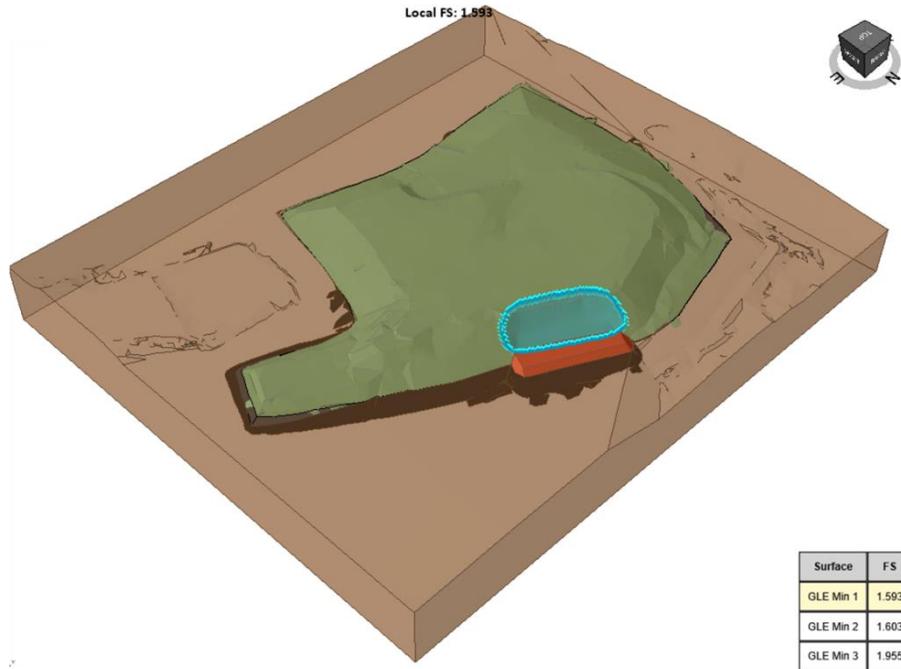


Fonte: Autor (2024)

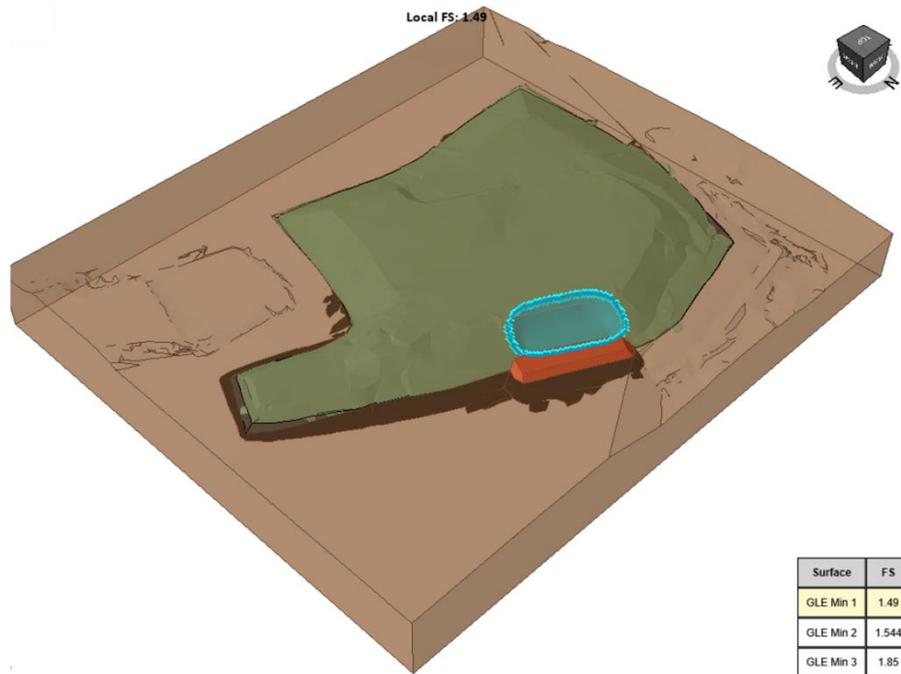
4.3 ANÁLISES DE ESTABILIDADE APÓS OS DIQUES

As análises de estabilidade dos diques foram realizadas para nove hipóteses, com variações do coeficiente ru de 0,15 a 0,6 pelo método de GLE/Morgenstern-Price. Os resultados das superfícies com os menores fatores de segurança para os diques de 3 m, 5 m e 7m podem ser vistos, respectivamente, nas Figuras 27, 28 e 29.

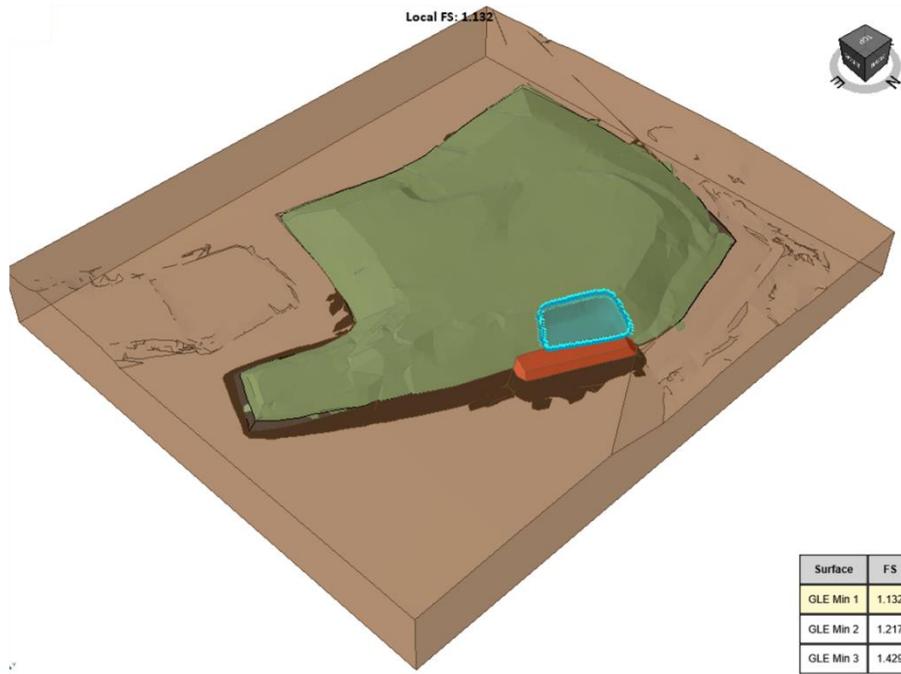
Figura 27 – Variação do FS x ru para o Dique de 3 m: (a) RSU:0,30 e Geomembrana 0,15; (b) RSU: 0,30 e Geomembrana 0,30; (c) RSU:0,60 e Geomembrana 0,30



(a)



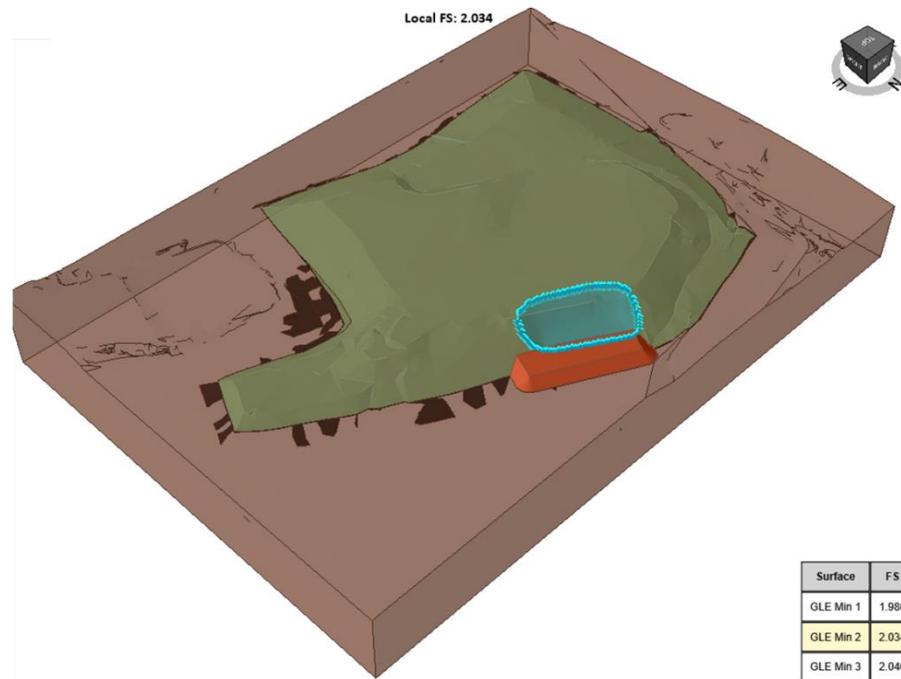
(b)



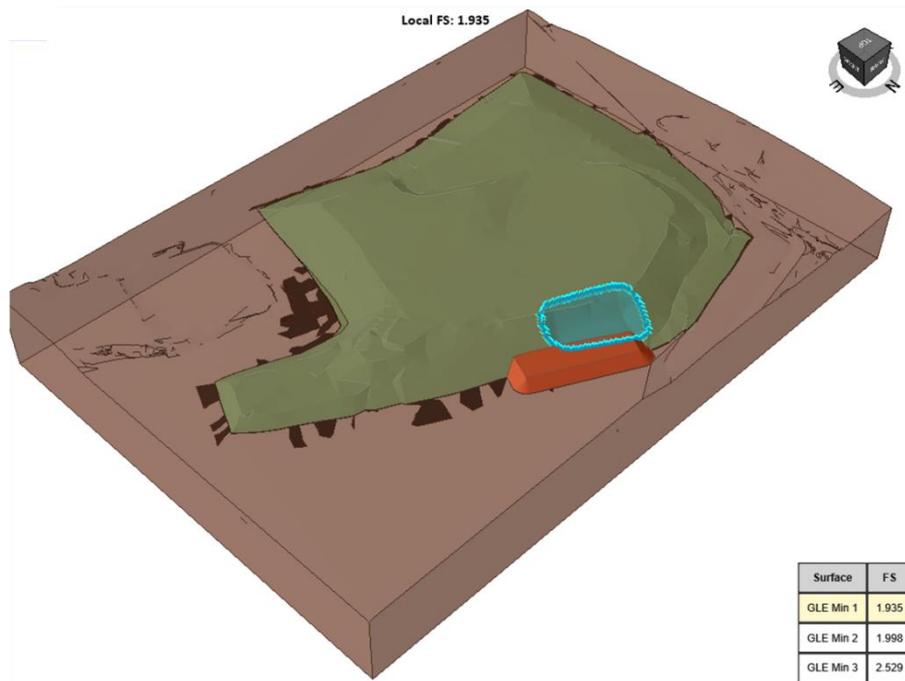
(c)

Fonte: Elaboração própria

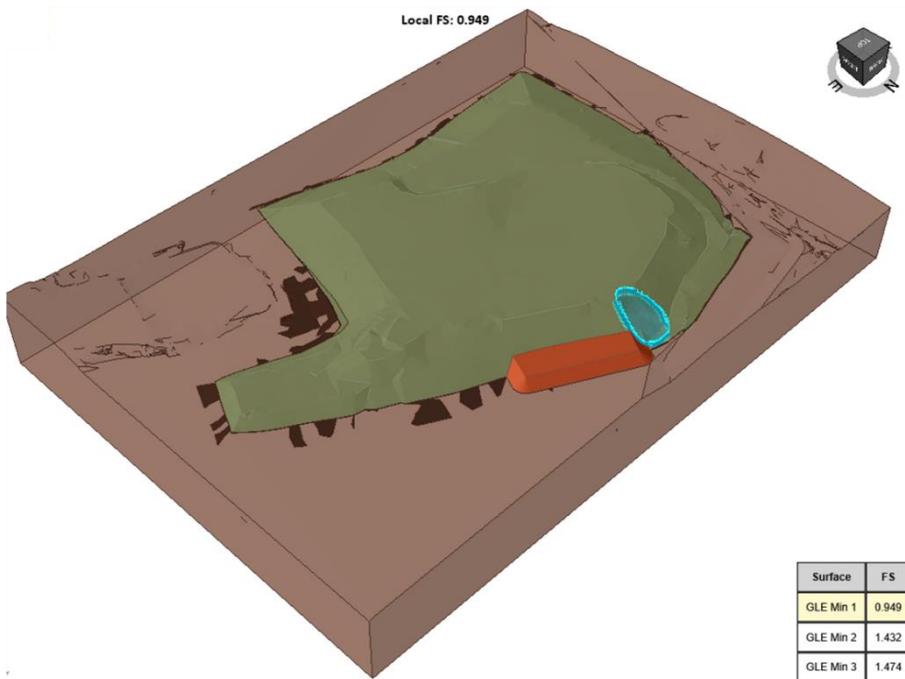
Figura 28 – Variação do FS x ru para o Dique de 5 m: (a) RSU:0,30 e Geomembrana 0,15; (b) RSU:0,30 e Geomembrana 0,30; (c) RSU:0,60 e Geomembrana 0,30



(a)



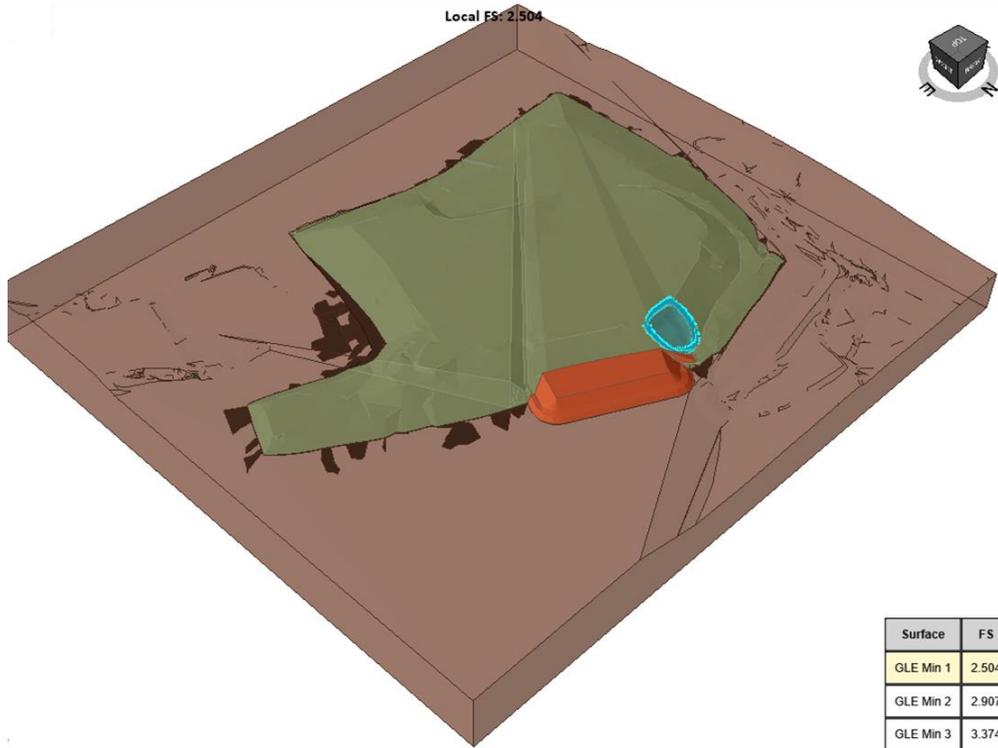
(b)



(c)

Fonte: Elaboração própria

Figura 29 – Variação do FS x ru para o Dique de 7 m: (a) RSU:0,30 e Geomembrana 0,15; (b) RSU:0,30 e Geomembrana 0,30; (c) RSU:0,60 e Geomembrana 0,30



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaboração própria

A partir das análises, foi elaborado um resumo com as relações FS x ru para cada dique (Figura 30), em que foi possível observar a diminuição do fator de segurança em contraponto ao aumento do coeficiente ru para o dique de 3 metros. Já para os diques de 5 m e 7 m, as análises não apresentaram esta tendência, devido à imposição da variação do ru na alteração da localização de suas superfícies de ruptura, resultando em valores de fator de segurança não satisfatórios.

Diante disso, para mitigar este problema e melhorar a contenção dos taludes, foi realizado o prolongamento da extensão dos diques. Com a extensão ajustada, novas análises foram realizadas para verificar a estabilidade dos taludes. Conforme apresentado na Figura 31 e Figura 32, os valores de FS foram recalculados para refletir esta modificação. Esta abordagem garantiu uma melhor contenção e estabilidade do aterro sanitário, proporcionando resultados satisfatórios para a segurança dos taludes.

Figura 30 – Fator de segurança $X ru$ para os Diques de 3 m, 5 m e 7 m

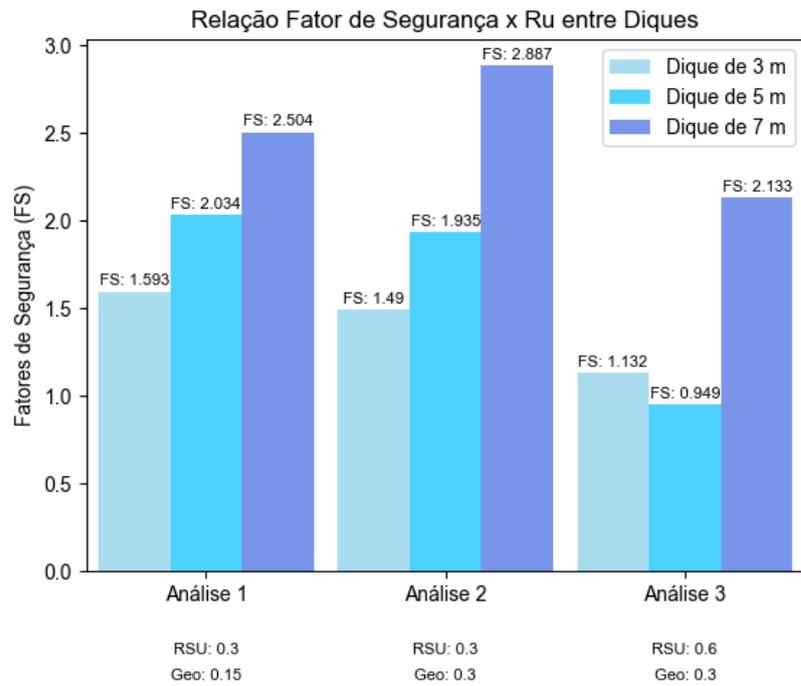
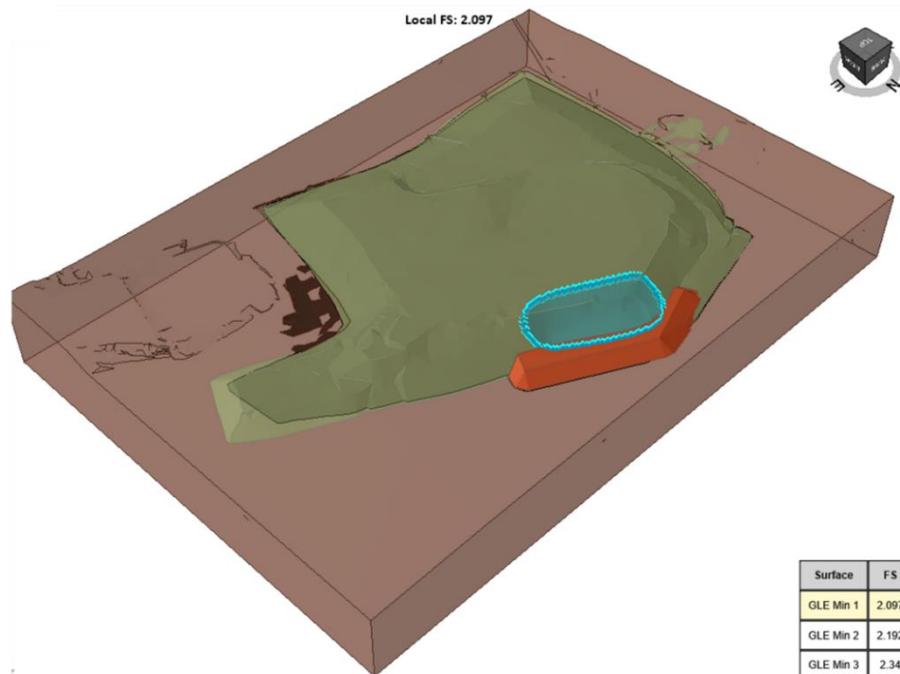
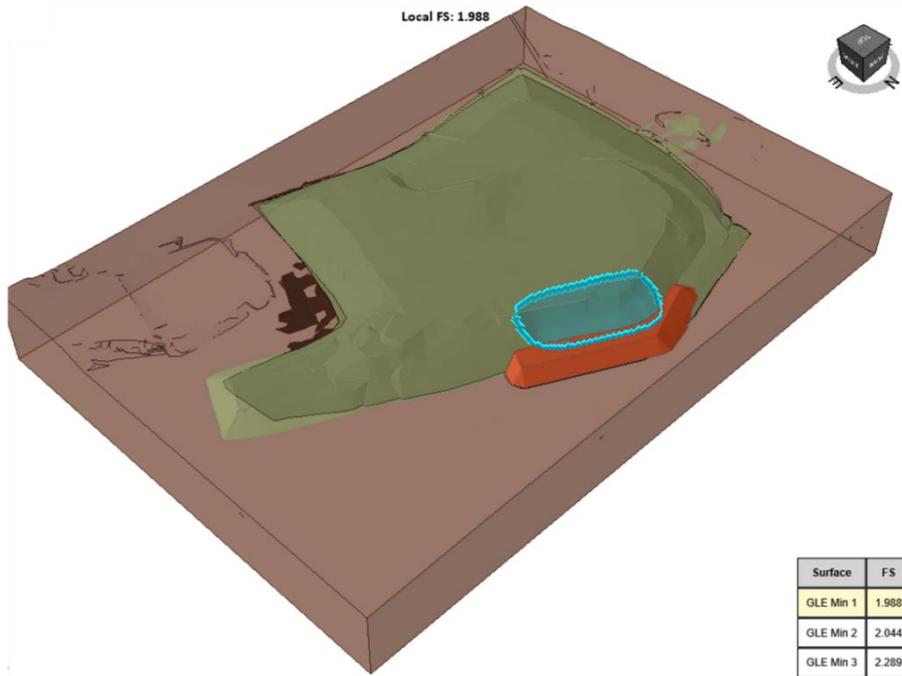


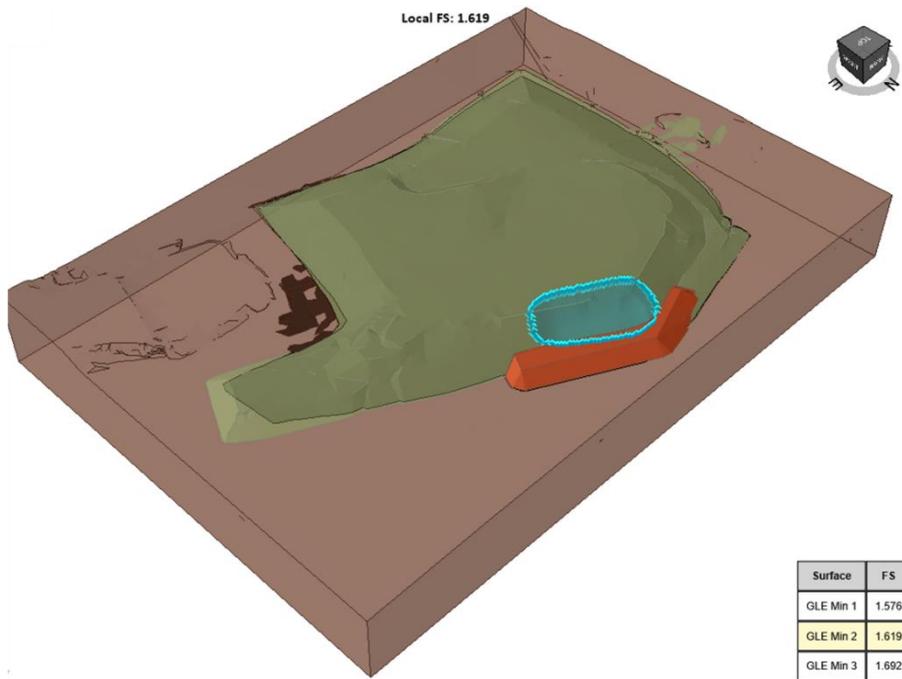
Figura 31 – Variação do FS $x ru$ para o Dique Ampliado de 5 m: (a) RSU:0,30 e Geomembrana 0,15; (b) RSU:0,30 e Geomembrana 0,30; (c) RSU:0,60 e Geomembrana 0,30



(a)



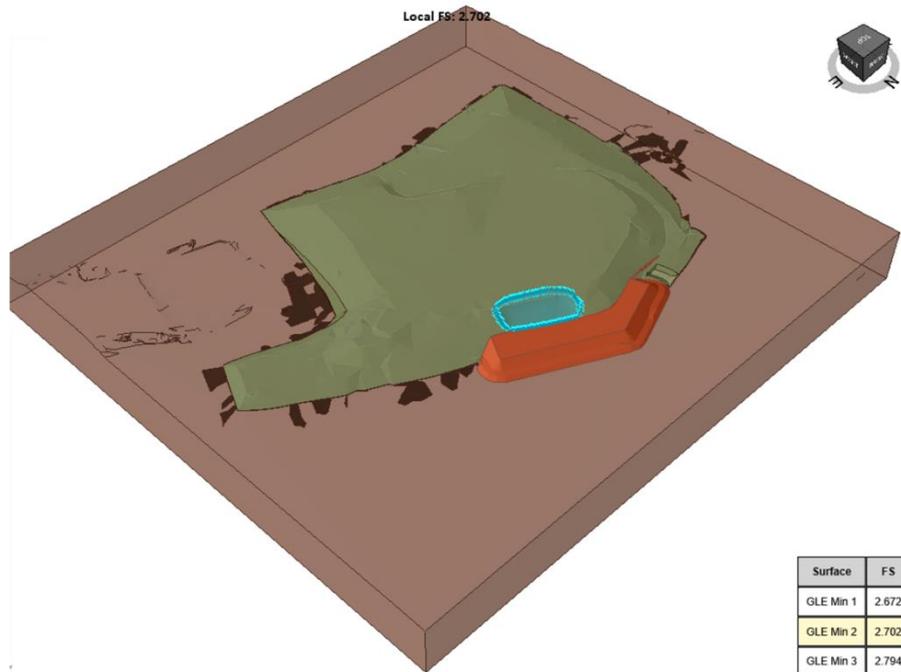
(b)



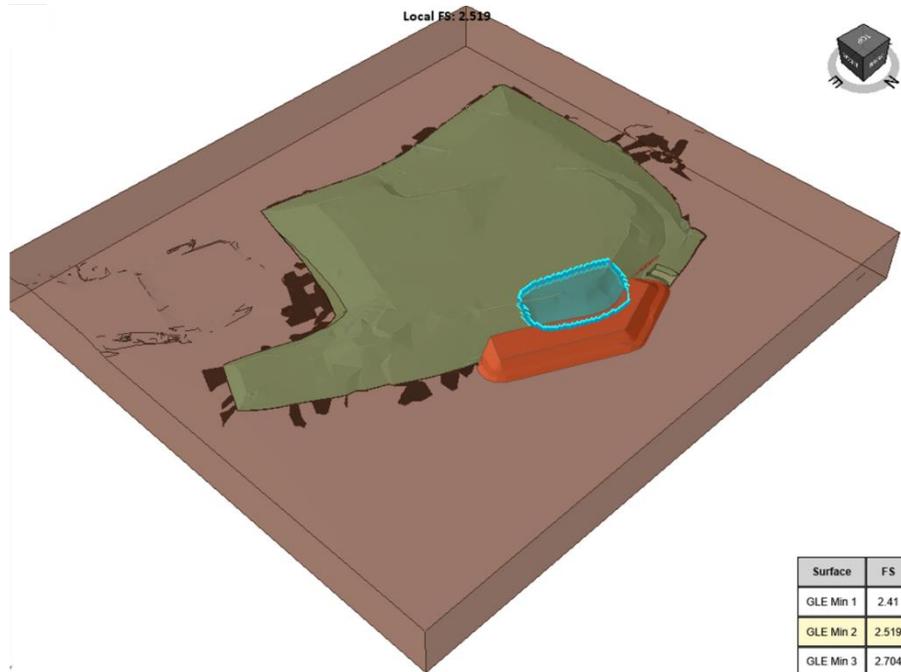
(c)

Fonte: Elaboração própria

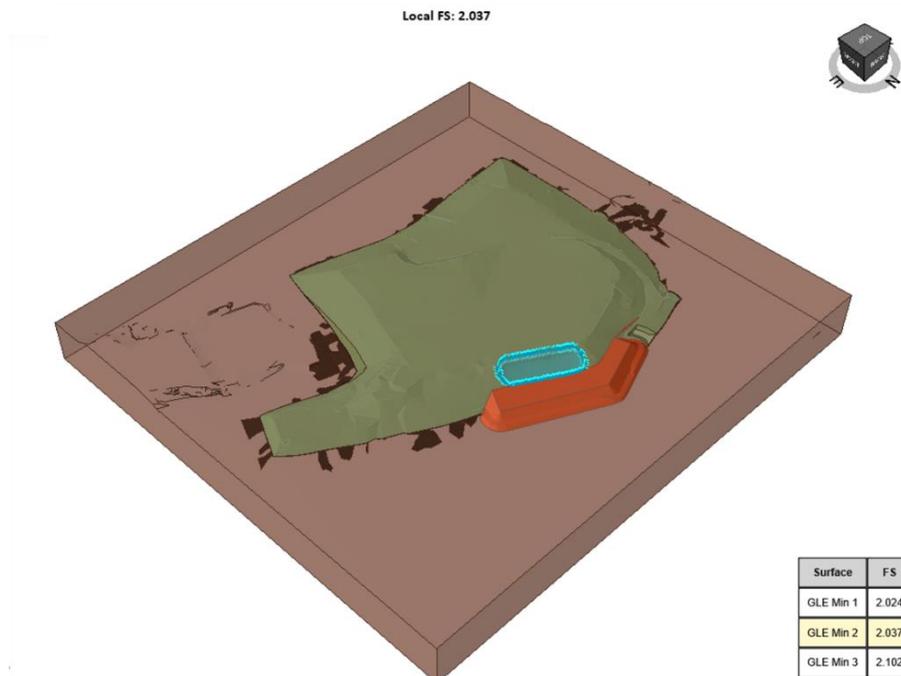
Figura 32 – Variação do FS x ru para o Dique Ampliado de 7 m: (a) RSU:0,30 e Geomembrana 0,15; (b) RSU:0,30 e Geomembrana 0,30; (c) RSU:0,60 e Geomembrana 0,30



(a)



(b)



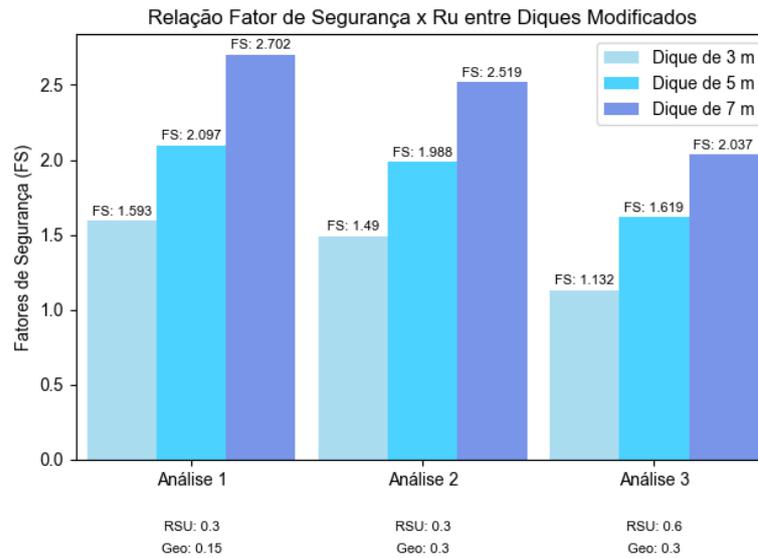
(c)

Fonte: Elaboração própria

Com base nos novos valores de FS obtidos nas extensões dos diques de 5 m e 7 m, foi realizada uma nova análise comparativa. Os valores de FS para os diques de 3 m, 5 m e 7 m, considerando as poropressões, foram reavaliados e utilizados para gerar um novo gráfico (Figura 33). Este gráfico teve como objetivo relacionar o FS com as poropressões dos diferentes diques modificados, permitindo uma visualização clara do impacto das alterações nas extensões dos diques sobre a estabilidade dos taludes.

Foram realizadas regressões lineares para prever o comportamento dos taludes da porção norte do AS (Figura 34) para os demais valores crescentes de poropressão, observando-se graficamente em que os mesmos atingiriam valores de FS normatizado de 1,5, segundo NBR 11682 (ABNT, 2009) e valores potenciais de ruptura (FS = 1).

Para o dique de 3 metros, o fato do coeficiente ru necessário para o FS normatizado ser muito menor (0,33) quando comparado ao coeficiente necessário para a superfície potencial de ruptura (0,7), sugere que o dique de 3 metros é relativamente estável com uma poropressão baixa e se torna crítico apenas em níveis mais altos de poropressão.

Figura 33 – Fator de segurança X r_u para os Diques de 3 m, 5 m e 7 m modificados

Fonte: Elaboração própria

O dique de 5 metros necessita de uma poropressão de 0,68 para garantir o FS de norma, maior do que a poropressão de 0,33 necessária para o dique de 3 metros, indicando uma necessidade de maior poropressão para o mesmo nível de segurança. A poropressão da superfície potencial de ruptura de 1,04, acima do valor máximo esperado, sugere que o dique de 5 metros é estruturalmente mais robusto e não atinge a condição de ruptura com os limites de poropressão possíveis.

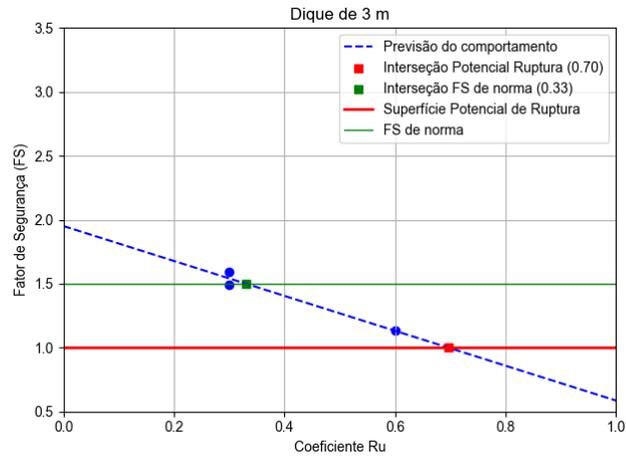
O dique de 7 metros requer uma poropressão de 0,88 para garantir um FS mínimo. A poropressão necessária para atingir o FS de 1 é de 1,14, também acima do valor máximo possível, indicando que o dique de 7 metros é ainda mais robusto e mantém a estabilidade mesmo sob condições de poropressão elevadas.

Ao observar os dados, constata-se que, ao aumentar a altura do dique de 3 metros para 5 metros, há um ganho percentual de aproximadamente 35,3% no FS. Este ganho continua, embora de maneira mais moderada, para diques de 7 metros, onde o FS aumenta em cerca de 27,2%. Comparando diretamente um dique de 3 metros com um de 7 metros, o FS apresenta um aumento total de aproximadamente 72,2%.

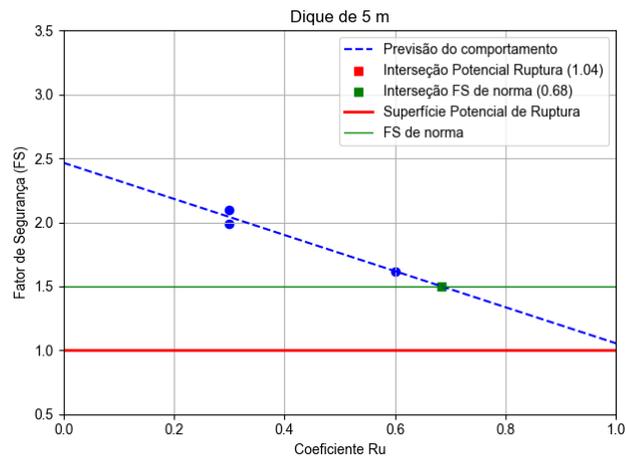
Por outro lado, a influência da poropressão é contrária. Quando a poropressão aumenta de 0,30 para 0,60, os diques de 3, 5 e 7 metros sofrem reduções no FS de aproximadamente 26,6%, 20,8%, e 22,0%, respectivamente. Reitera-se que os

resultados apresentados são de cunho acadêmico e não são representativos quanto à estabilidade real do AS em questão.

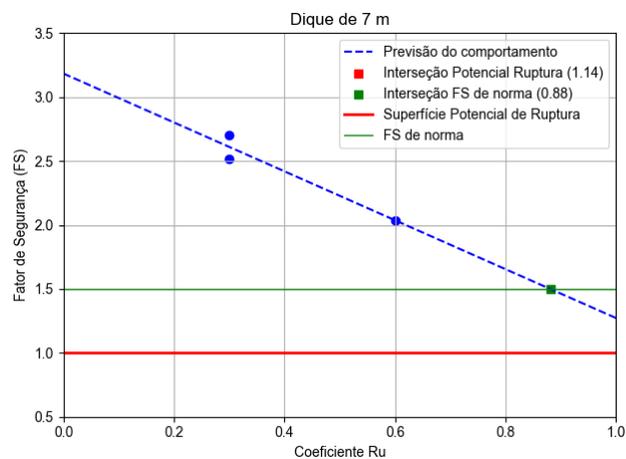
Figura 34 – Regressões lineares para (a) no Dique de 3 m;(b) no Dique de 5 m;(c) no Dique de 7 m



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaboração própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após o desenvolvimento da presente pesquisa e com a apresentação e discussão dos resultados, entende-se que a modelagem tridimensional do aterro sanitário de grande porte e a implementação da mistura Solo-LETA nos diques, tendo em vista a verificação da estabilidade de taludes, foi satisfatória para alcançar os objetivos propostos inicialmente. Dessa forma, a seguir, demonstra-se as principais conclusões quanto a modelagem tridimensional e a análise da estabilidade com os diques.

A modelagem tridimensional realizada demonstrou ser uma ferramenta eficaz e precisa para a análise topográfica e geotécnica do aterro sanitário. O modelo 3D facilitou a visualização e a interpretação das características físicas do local ao representar fielmente as variações do terreno a partir dos dados topográficos reais coletados por levantamentos extensivos.

Além disso, a sobreposição da modelagem tridimensional com imagens de satélite permitiu validar visualmente a precisão do modelo. Isso demonstrou a utilidade do método para identificar áreas importantes e planejar intervenções. Este trabalho enfatiza a modelagem tridimensional como uma ferramenta essencial para a gestão e monitoramento de aterros sanitários, pois fornece uma base sólida para a implementação de medidas de segurança e tomada de decisões.

A análise de estabilidade dos taludes a partir da utilização dos diques revelou-se fundamental para entender o comportamento das estruturas e garantir a segurança das mesmas. A utilização do Solo-LETA se mostrou uma alternativa viável para a construção de diques, atendendo às necessidades de estabilidade dos taludes. A análise dos fatores de segurança (FS) para diques de diferentes alturas (3 m, 5 m e 7 m) permitiu verificar a eficácia da metodologia implementada. O comportamento apresentado na análise pelos taludes frente ao método e a variação da poropressão é coerente, uma vez que o resultado do FS é linear e decrescente, configurado pelo comportamento inversamente proporcional ao aumento linear da poropressão. No entanto, é crucial destacar que a eficácia dessas análises de estabilidade depende do adequado funcionamento do sistema de drenagem do aterro sanitário. Sem uma drenagem adequada, o acúmulo de líquidos pode comprometer a estabilidade dos

diques, reduzindo significativamente o fator de segurança e potencialmente levando ao colapso da estrutura.

Por fim, a análise de estabilidade dos taludes demonstrou que, apesar dos desafios impostos pelo aumento da altura dos diques, a utilização de Solo-LETA contribui significativamente para a segurança e sustentabilidade das estruturas. Este estudo reforça a importância da integração de práticas sustentáveis na engenharia geotécnica, promovendo benefícios ambientais e econômicos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se a aplicação de métodos de análise avançados, como a análise probabilística Monte Carlo no software Slide3, para aprimorar ainda mais a análise de estabilidade dos taludes e a eficácia dos diques construídos com Solo-LETA. A utilização dessa técnica permitirá uma avaliação mais completa das incertezas relacionadas aos parâmetros geotécnicos, principalmente se tratando de resíduos sólidos urbanos, e fornecerá uma visão detalhada da variabilidade dos fatores de segurança. Também se sugere a alteração do tipo de configuração da superfície de ruptura para obter diferentes análises da estrutura do aterro sanitário.

Para melhorar o balanceamento de massas e reduzir os custos operacionais durante a construção de diques, deve-se estudar a relação entre os volumes de corte e aterro usando o software Civil 3D. Juntamente com a análise orçamentária da utilização do Solo-LETA, que inclui os custos de transporte do material e seu manuseio. Ao utilizar essa análise, será possível obter uma compreensão completa dos elementos econômicos envolvidos, o que facilitará a tomada de decisões e avaliará o impacto econômico do reaproveitamento do LETA como material de construção.

Além do uso dos softwares, é aconselhável realizar levantamentos em campo para determinar os parâmetros dos materiais e realizar retro análises nos pontos em que ocorreram falhas estruturais para identificar os parâmetros que contribuíram para a ruptura da superfície. Sugere-se também a estratificação das camadas de RSU do aterro sanitário em relação ao tempo de deposição, utilizando dados topográficos de diferentes datas para modelagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.
- ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Disponível em: <http://abrema.org.br>. Acesso em: 8 jul. 2024.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **Technology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant Residual**. New York, 1996.
- AUTODESK. **Autodesk AutoCad Civil 3D**. Califórnia, 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com.br/products/civil-3d/overview>. Acesso em 8 de julho de 2024.
- BASIM, S. C. **Physical and geotechnical characterization of water treatment plant residuals**. Doctor Thesis – New Jersey Institute of Technology, New Jersey. 1999. 104 p.
- 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. 5 p.
- BORGATTO, A. V. A. **Estudo das propriedades geomecânicas de resíduos sólidos urbanos pré-tratados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2010. 150 p.
- BRAJA, M. D. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução da 6ª ed. norte-americana. California State University, Sacramento, 2006. 561 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Lei nº 12.305** de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 02 de agosto de 2010.
- CANIANI, D.; MASI, S.; MANCINI, I. M.; TRULLI, E. **Innovative reuse of drinking water sludge in geo-environmental applications**. Waste Management Paper, v. 33, p. 1461-1468, 2013.
- CARNEIRO, C. et al. **Caracterização do lodo de ETA gerado no Estado do Paraná**. In: CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. (Coord.). Lodo de estações de

tratamento de água – Gestão e perspectivas tecnológicas. Curitiba: SANEPAR, 2013. p. 131-178.

CASTÃO, E. S. et al. **Reuso do lodo de estação de tratamento de água (E.T.A.) na fabricação de tijolos cerâmicos**. In: Congresso ABES FENASAN 2017. Anais... São Paulo/SP, 2017.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO (CORSAN). **Relatório da administração - 2021**. Estado do Rio Grande do Sul, 2021. Disponível em: <https://www.saaemantena.mg.gov.br/realizada-limpeza-dos-decantadores-da-eta/>. Acesso em: 8 jul. 2024.

COELHO, R. V.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; FONTENELE, H. B.; TEIXEIRA, R. S. **Uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 10, n. 2, p. 11-22, 2015.

CORDEIRO, J. S. **Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs**. In: REALI, M. A. P. (Ed.). Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 1-19.

CORDEIRO, J. S. Processamento de lodos de estações de tratamento de águas (ETAs). In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Aproveitamento de lodo gerado em estações de tratamento de água e esgotos sanitários, inclusive com a utilização de técnicas consorciadas com resíduos sólidos urbanos**. Curitiba: PROSAB, 2001. p. 121-144.

DACIOLO, L. V. P. **Parâmetros de resistência de RSU: Abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

FADANELLI, L. E. A.; WIECHETECK, G. K. **Estudo da utilização do lodo de estação de tratamento de água em solo cimento para pavimentação rodoviária**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 2, n. 2, p. 31-37, 2010.

FIGUEIREDO, F. F.; NUVOLARI, A. **Uso do lodo de estação de tratamento de água na fabricação de tijolos cerâmicos maciços**. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. Anais... Costão do Santinho, Florianópolis/SC. 2004.

FLORES, E. A. F. **Análises probabilísticas da estabilidade de taludes considerando a variabilidade espacial do solo**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro. 2008. 170 p.

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

GONÇALVES, F.; SOUZA, C. H. U.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R. S. **Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário**. Revista DAE, v. 65, n. 205, p. 5-15, 2017.

GRANATO, T. C. **Biosolids land application by the Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago: an overview of the program, its benefits, and environmental impacts.** In: Simpósio Interamericano de Biossólidos. Anais... Campinas, SP, 2010.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JÚNIOR, A. D. **Desidratação de lodos produzidos em estações de tratamento de água.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais...Natal, RN: ABES, 1993. v. 2, p. 324-341.

HSIEH, H. N.; RAGHU, D. **Criteria development for water treatment plant residual monofills.** American Water Works Association, 1997.

KNIERIM, L. S. **Estudo do comportamento mecânico e hídrico do uso do lodo de estação de tratamento de água em misturas com solo argiloso laterítico.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 210 p.

MAGALHÃES, M. S. **Dimensionamento de estruturas de contenção atirantadas utilizando os métodos de equilíbrio limite e de elementos finitos.** Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2015. Cap. 6. 2 p.

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. p. 31-33.

Minas Gerais. Prefeitura Municipal de Mantena. **Realizada limpeza dos decantadores da ETA.** Disponível em: <https://www.saaemantena.mg.gov.br/realizada-limpeza-dos-decantadores-da-eta/>. Acesso em: 8 jul. 2024.

MONTALVAN, E. L. T. **Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da estação de tratamento de água do município de Cubataão, SP.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2016. 133 p.

NASCIMENTO, L. A. do. **Modelagem tridimensional de um aterro sanitário de grande porte.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2022. 41 p.

O'KELLY, B. C. **Geotechnical properties of a municipal water treatment sludge incorporation a coagulant.** Canadian Geotechnical Journal, v. 455, n. 5, p. 715-725, 2008.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2007. 382 p.

OWEIS, I. S. **Stability of landfills**. In: Geotechnical practice for waste disposal. Edited by David E. Daniel. London: Chapman & Hall, 1993.

PENASSO, S. M. **Comparação entre análise de estabilidade do talude com blocos e pelo método de Bishop**. Revista de Geologia, 2010. 57 p.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2013. p. 143-162.

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 N_{sp}t**. Rio Claro - SP, 2014. 120p.

RICHTER, C. A. **Resíduos das estações de tratamento de água**. Disposição final dos lodos. Tratamento de lodos de estações de tratamento de água. São Paulo: Edgar Blucher LTDA. 2001.

ROCSCIENCE. **Rocscience Slide3 - 3D Limit Equilibrium Analysis for Slope**. Toronto, 2024. Disponível em: <https://www.rocscience.com/software/slide3>. Acesso em: 8 jul. 2024.

RODRIGUEZ, T. T.; TEIXEIRA, R. S.; FERNANDES, F.; OLIVEIRA JR, O. M.; MARTINS, F. B.; KOMORI, E. T.; DANZIGUER, D. H. **Estudo da compactação de lodo de ETA para uso em aterros sanitários**. VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO. Anais...Belo Horizonte, MG, 2011

SANTOS, E. F. **Estudo de misturas de solo com adição de lodo de estação de tratamento de água para uso em aterro sanitário**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017.

SANTOS, E. F.; SCAPIN, J.; PINHEIRO, R. J. B. **Estudo das misturas de solo com adição de lodo de estação de tratamento de água para uso em aterro sanitário**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Salvador, Bahia. 2018.

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

SOUZA, M. R. **Estudo do Lodo Gerado na Estação de Tratamento de Água de Buíque-PE: Caracterização, Quantificação e Identificação de Oportunidades de Minimização de Resíduos**. 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, SE, 2009.

- SOUZA, T. F. **Análise de estabilidade de talude por método probabilístico – BR116/Leopoldina**. In: XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE, Florianópolis/SC, Brasil, 2017.
- STRAUSS, M. **Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1998.
- TAPAHUASCO, W.C. **Análise do Comportamento de Maciços Sanitários e Proposta de um Modelo de Previsão de Recalques considerando a Parcela da Biodegradação**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2009. 161 p.
- 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.
- XIA, Z. **Geotechnical characterization of water treatment plant residuals**. Master Dissertation. New Jersey Institute of Technology. New Jersey, 88 p., 1994.
- ZUQUETTE, L. V. **Geotecnia Ambiental**. Elsevier Editora Ltda. 1ª ed. Rio de Janeiro. 2015. 80-213p.