



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTABILIDADE DE TALUDES BIDIMENSIONAL E TRIDIMENSIONAL DE
ATERRO SANITÁRIO**

ANA LETICIA RAMOS BEZERRA

Campina Grande – PB
2024

ANA LETICIA RAMOS BEZERRA

**ESTABILIDADE DE TALUDES BIDIMENSIONAL E TRIDIMENSIONAL DE
ATERRO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Veruskha Escarião Dessoles Monteiro

Coorientador: Cláudio Luis de Araujo Neto

Campina Grande – PB

2024

B574e

Bezerra, Ana Leticia Ramos.

Estabilidade de taludes bidimensional e tridimensional de aterro sanitário / Ana Leticia Ramos Bezerra. – Campina Grande, 2024.
122 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, Prof. Dr. Cláudio Luis de Araújo Neto".

Referências.

1. Geotecnia. 2. Resíduos Sólidos Urbanos. 3. Aterros Sanitários. 4. Análise Determinística. 5. Fator de Segurança. 6. Parâmetros Geotécnicos. I. Monteiro, Veruschka Escarião Dessoles. II. Araújo Neto, Cláudio Luis de. III. Título.

CDU 624.13(043)

ANA LETICIA RAMOS BEZERRA

**ESTABILIDADE DE TALUDES BIDIMENSIONAL E TRIDIMENSIONAL DE
ATERRO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovado em: 04/03/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Verusckha Escarião Dessoles Monteiro
Universidade Federal de Campina Grande
Orientadora

Prof. Dr. Cláudio Luis de Araújo Neto
Universidade Federal de Campina Grande
Coorientador

Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo
Universidade Federal de Campina Grande
Examinador Interno

Prof. Dra. Raliny Mota de Souza Farias
Universidade Federal do Vale do São Francisco
Examinadora Externa

Campina Grande – PB
2024



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

- ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
- ALUNO(A): ANA LETICIA RAMOS BEZERRA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.ª VERUSCHKA ESCARIÃO DESSOLES MONTEIRO - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADORA, DR. CLÁUDIO LUÍS DE ARAÚJO NETO – UFMA – COORIENTADOR, DR. MÁRCIO CAMARGO DE MELO - PPGECA/UFCG - EXAMINADOR INTERNO, DR.ª RALINY MOTA DE SOUZA FARIAS - UNIVASF - EXAMINADORA EXTERNA (PORTARIA 13/2024). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “ESTABILIDADE DE TALUDES BIDIMENSIONAL E TRIDIMENSIONAL EM ATERRO SANITÁRIO” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 14:00 HORAS / NA SALA DE CONFERÊNCIA DO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.**
- EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
- CAMPINA GRANDE, 04 DE MARÇO 2024**



Documento assinado eletronicamente por **VERUSCHKA ESCARIO DESSOLES MONTEIRO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/03/2024, às 11:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARCIO CAMARGO DE MELO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/03/2024, às 12:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Leticia Ramos Bezerra, Usuário Externo**, em 05/03/2024, às 14:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raliny Mota de Souza Farias, Usuário Externo**, em 05/03/2024, às 15:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cláudio Luis de Araújo Neto, Usuário Externo**, em 05/03/2024, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 05/03/2024, às 16:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4204492** e o código CRC **C159BEAA**.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas bênçãos que me proporcionou até aqui.

Aos meus pais Rozelane e Euberto por sempre me proporcionar apoio e incentivo. Pelos esforços direcionados a minha educação e por serem a minha base e o meu porto seguro em todas as circunstâncias.

A minha irmã Eumara pelo incentivo e apoio que sempre me dera.

A toda minha família pelo incentivo e admiração direcionados aos meus estudos.

A todos os meus amigos que de alguma forma me incentivaram, apoiaram e me deram forças para continuar, em especial, a Samara, Maria Rita e Edino.

Um agradecimento aos amigos da graduação que mesmo estando distantes a torcida sempre foi constante. Especialmente à Adla e Leonardo pela fortaleza que a nossa amizade representa.

Agradeço a minha turma do mestrado, lutamos juntos e mesmo em meio às dificuldades e anseios vivemos muitos momentos de alegria. Lara, Gilson e Milena vou levar vocês comigo em minhas memórias mais alegres e divertidas.

Agradeço imensamente aos membros do Grupo de Geotecnia Ambiental da UFCG, especialmente, a Daniel, Gabriel, Jessica Kaori, Jessica Martildes, Luisa, Ketlyn, Wlysses, Rivaildo, Pablo, Auriberto, Danilo, Jordan e Victor. Sou grata a Deus por cruzar meu caminho com o de pessoas incríveis como vocês.

Aos meus orientadores, Professora Veruschka Monteiro e Professor Cláudio Luis, pelo apoio, paciência e disposição ao longo do mestrado.

Aos funcionários e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, do Laboratório de Geotecnia Ambiental e do Laboratório de Engenharia de Pavimentos.

RESUMO

O aumento contínuo na produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e as restrições ambientais à criação de novos aterros sanitários destacam a necessidade de alteamento dessas estruturas. Diante desse cenário, garantir a segurança dos aterros sanitários tornou-se uma das principais preocupações de engenharia ao longo da vida útil dessas obras, visto que, incidentes ocorridos nas últimas décadas como os deslizamentos de resíduos, evoluíram para desastres de extensa magnitude, causando enormes problemas ligados a saúde pública e ao meio ambiente. Nesse contexto, realizar avaliações de estabilidade em taludes de aterros sanitários torna-se crucial em virtude das questões ambientais associadas aos potenciais desastres decorrentes de instabilidades nessas estruturas. O objetivo desta pesquisa foi analisar a estabilidade de taludes de aterros sanitários considerando a terceira dimensão nesse tipo de estudo. A metodologia adotada compreendeu a realização de análises de estabilidade bidimensionais e de sensibilidade pelos softwares *slope/w* e *slide2*, enquanto a análise tridimensional foi conduzida pelo software *slide3*, para todas as análises foram considerados dois cenários: um sem a presença de nível piezométrico de líquidos no interior do maciço sanitário e outro com a presença de nível piezométrico. As análises de estabilidade tridimensionais revelaram a geração de resultados mais completos e abrangentes do que as análises bidimensionais, enquanto a análise de sensibilidade mostrou que a camada de RSU recém-aterrados é a que mais influencia em oscilações no fator de segurança quando os parâmetros de resistência ao cisalhamento são variados. Concluiu-se que, a similaridade entre os fatores de segurança resultantes das análises bidimensionais e tridimensionais indica que ambas as abordagens são válidas para avaliar a estabilidade de taludes de aterros sanitários, porém a análise tridimensional se destaca por obter avaliações mais amplas e abrangentes.

Palavras chave: análise determinística; fator de segurança; parâmetros geotécnicos; resíduos sólidos urbanos.

ABSTRACT

The continuous increase in the production of Municipal Solid Waste (MSW) and environmental restrictions on the creation of new sanitary landfills highlight the need for their elevation. In this scenario, ensuring the safety of sanitary landfills has become one of the main engineering concerns throughout the lifespan of these structures, as incidents such as waste landslides in recent decades have evolved into disasters of extensive magnitude, causing significant public health and environmental problems. In this context, conducting stability assessments on landfill slopes becomes crucial due to the environmental issues associated with potential disasters resulting from instabilities in these structures. The objective of this research was to analyze the stability of landfill slopes considering the third dimension in this type of study. The adopted methodology involved conducting two-dimensional stability analyses and sensitivity analyses using the slope/w and slide2 software, while the three-dimensional analysis was performed using the slide3 software. For all analyses, two scenarios were considered: one without the presence of a piezometric level of liquids inside the landfill mass and another with the presence of a piezometric level. Three-dimensional stability analyses revealed the generation of more complete and comprehensive results compared to two-dimensional analyses, while sensitivity analysis showed that the layer of newly deposited MSW is the one that most influences fluctuations in the safety factor when shear strength parameters are varied. It was concluded that the similarity between the safety factors resulting from two-dimensional and three-dimensional analyses indicates that both approaches are valid for assessing the stability of landfill slopes, but three-dimensional analysis stands out for obtaining broader and more comprehensive evaluations.

Keywords: deterministic analysis; safety factor; geotechnical parameters; municipal solid waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais componentes de aterros sanitários modernos e projetados	23
Figura 2 - Fases de estabilização de resíduos	25
Figura 3 - Envoltória de resistência e envoltória de resistência de Mohr - Coulomb	33
Figura 4 - Zona cisalhada e superfície de cisalhamento	40
Figura 5 - Metodologia de estudos de estabilidade de taludes	41
Figura 6 - Fluxo de trabalho para a solução de uma análise 2D.....	49
Figura 7 - Massa de ruptura tridimensional.....	50
Figura 8 - Diagrama de corpo livre	51
Figura 9 - Vista lateral do sistema de força entre uma coluna	51
Figura 10 - Diagrama de corpo livre considerando as hipóteses.....	52
Figura 11 - Vistas em corte de uma coluna 3D	52
Figura 12 - Modos de instabilidade de talude de aterro sanitário: (a) Modo 1; (b) Modo 2; (c) Modo 3.	54
Figura 13 - Resultados do fator de segurança para análise determinística do aterro Sítio São João.....	57
Figura 14 - Contribuição de diferentes parâmetros para a variação do fator de segurança dos casos em estudo.....	58
Figura 15 - Geometria da secção transversal do aterro de Rumpke antes da ruptura.....	62
Figura 16 - Superfície de ruptura do aterro de Rumpke	63
Figura 17 - Geometria da secção transversal do aterro de Durban antes da ruptura	63
Figura 18 - Aterro de Durban (a) antes e (b) depois da ruptura	64
Figura 19 - Seções esquemáticas do aterro Sítio São João antes e depois da ruptura	64
Figura 20 - Superfície de ruptura do aterro Sítio São João	65
Figura 21 - Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa.....	66
Figura 22 – Aterro Sanitário objeto de estudo.....	66
Figura 23 - Configuração das Células do aterro C1, C2, C3 e C4	67

Figura 24 - Células do aterro sanitário (a) antes do início do processo de união (b) após início do processo de união	68
Figura 25 - Célula do aterro após junção das C1, C2, C3 e C4.....	68
Figura 26 - Geometria utilizada nas análises de estabilidade	74
Figura 27- Perfil do corte AB – Cenário 1	75
Figura 28 - Perfil do corte AB – Cenário 2	75
Figura 29 - Perfil do corte CD - Cenário 1	76
Figura 30 - Perfil do corte CD - Cenário 2.....	76
Figura 31 – Malha gerada após triangulação dos pontos	80
Figura 32 – Superfície após triangulação	80
Figura 33 - Verificação de falhas a serem corrigidas na superfície.....	81
Figura 34 – Fator de segurança da Seção A – X (Corte AB) para o Cenário 1 - software slope/w.....	82
Figura 35 - Fator de segurança da Seção A – X (Corte AB) para o Cenário 1 - software slide2.....	82
Figura 36 - Fator de segurança da Seção B – X (Corte AB) para o Cenário 1 - software slope/w.....	83
Figura 37 - Fator de segurança da Seção B – X (Corte AB) para o Cenário 1 - software slide2.....	83
Figura 38 - Fator de segurança da Seção C – X (Corte CD) para o Cenário 1 - software slope/w.....	83
Figura 39 - Fator de segurança da Seção C – X (Corte CD) para o Cenário 1 - software slide2.....	83
Figura 40 - Fator de segurança da Seção D – X (Corte CD) para o Cenário 1 - software slope/w.....	84
Figura 41 - Fator de segurança da Seção D – X (Corte CD) para o Cenário 1 - software slide2.....	84
Figura 42 - Fator de segurança da Seção A – X (Corte AB) para o Cenário 2 - software slope/w.....	87
Figura 43 - Fator de segurança da Seção A – X (Corte AB) para o Cenário 2 - software slide2.....	87

Figura 44 - Fator de segurança da Seção B – X (Corte AB) para o Cenário 2 - software slope/w.....	87
Figura 45 - Fator de segurança da Seção B – X (Corte AB) para o Cenário 2 - software slide2.....	88
Figura 46 - Fator de segurança da Seção C – X (Corte CD) para o Cenário 2 - software slope/w.....	88
Figura 47 - Fator de segurança da Seção C – X (Corte CD) para o Cenário 2 - software slide.....	88
Figura 48 - Fator de segurança da Seção D – X (Corte CD) para o Cenário 2 - software slope/w	89
Figura 49 - Fator de segurança da Seção D – X (Corte CD) para o Cenário 2 – software slide2.....	89
Figura 50 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A – X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 1 software slope/w	92
Figura 51 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A – X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 1 software slide2	93
Figura 52 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A – X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 software slope/w	93
Figura 53 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A – X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 software slide2.....	94
Figura 54 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A - X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 2 software slope/w	94
Figura 55 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A - X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 2 software slide2	95
Figura 56 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A - X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 2 software slope/w	95
Figura 57 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A - X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 2 software slide2.....	96
Figura 58 – Modelo tridimensional para o Cenário 1 - Espacialização do fator de segurança	99
Figura 59 - Cortes AB e CD no modelo tridimensional para o Cenário 1 - Espacialização do fator de segurança.....	99
Figura 60 – Vista em perspectiva do fator de segurança espacializado na superfície 3D – Cenário 1	100

Figura 61 - Vista em perspectiva do fator de segurança espacializado na superfície 3D – Cenário 1 (área de menor FS).....	100
Figura 62 - Modelo tridimensional para o Cenário 1 - Espacialização do fator de segurança com a superfície de ruptura mais crítica em destaque	101
Figura 63 - Modelo tridimensional para o Cenário 2 - Espacialização do fator de segurança com a superfície de ruptura mais crítica em destaque	101
Figura 64 - Cortes AB e CD no modelo tridimensional para o Cenário 2 - Espacialização do fator de segurança.....	102
Figura 65 - Vista em perspectiva do fator de segurança espacializado na superfície 3D – Cenário 1	103
Figura 66 - Vista em perspectiva do fator de segurança espacializado na superfície 3D – Cenário 2 (área de menor FS).....	103
Figura 67 - Modelo tridimensional para o Cenário 2 - Espacialização do fator de segurança com a superfície de ruptura mais crítica em destaque	104
Figura 68 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção B – X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 1 software slope/w	117
Figura 69 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção B – X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 1 software slide2	117
Figura 70 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção B – X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 software slope/w	118
Figura 71 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção B – X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 software slide2.....	118
Figura 72 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção C – X (Corte CD) variando a coesão - Cenário 1 software slope/w	119
Figura 73 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção C – X (Corte CD) variando a coesão - Cenário 1 software slide2	119
Figura 74 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção C – X (Corte CD) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 software slope/w	120
Figura 75 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção C – X (Corte CD) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 software slide2.....	120
Figura 76 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção D – X (Corte CD) variando a coesão - Cenário 1 software slope/w	121
Figura 77 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção D – X (Corte CD) variando a coesão - Cenário 1 software slide2	121

Figura 78 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção D – X (Corte CD) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 software slope/w 122

Figura 79 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção D – X (Corte CD) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 software slide2..... 122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de pesos específicos de RSU constatados na literatura técnica	29
Tabela 2 - Parâmetros de resistência de RSU de acordo com a idade dos resíduos	32
Tabela 3 - Valores de coesão e ângulo encontrados na literatura técnica obtidos em ensaios de resistência.....	37
Tabela 4 - Fatores de segurança mínimos para escorregamentos.....	43
Tabela 5 - Acidentes envolvendo rupturas de aterros sanitários ocorridas no Brasil.....	59
Tabela 6 - Acidentes envolvendo rupturas de aterros sanitários ocorridas no mundo ...	59
Tabela 7 - Parâmetros geotécnicos para os dois cenários considerados.....	70
Tabela 8 - Intervalo de variação da coesão das análises de sensibilidade da Seção A - B para o Cenário 1.....	77
Tabela 9 - Intervalo de variação do ângulo de atrito das análises de sensibilidade da Seção A – B para o Cenário 1	77
Tabela 10 - Intervalo de variação da coesão das análises de sensibilidade da Seção C - D para o Cenário 1.....	78
Tabela 11 - Intervalo de variação do ângulo de atrito das análises de sensibilidade da Seção C – D para o Cenário 1.....	78
Tabela 12 - Intervalo de variação da coesão das análises de sensibilidade da Seção A - B para o Cenário 2.....	78
Tabela 13 - Intervalo de variação do ângulo de atrito das análises de sensibilidade da Seção A – B para o Cenário 2.....	78
Tabela 14 - Intervalo de variação da coesão das análises de sensibilidade da Seção C - D para o Cenário 2.....	79
Tabela 15 - Intervalo de variação do ângulo de atrito das análises de sensibilidade da Seção C – D para o Cenário 2.....	79
Tabela 16 – Classificação dos fatores de segurança para cada seção com base na NBR 11682 (ABNT, 2009).....	90
Tabela 17 - Camadas que mais influenciam no FS de acordo com a variação dos parametros para cada seção e software.....	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Esquema geral das fases de degradação dos Resíduos Sólidos Urbanos	24
Quadro 2 - Principais fatores que influenciam os processos degradativos	26
Quadro 3 - Categorização dos RSU de acordo com o comportamento geomecânico	28
Quadro 4 - Revisão de métodos para medir a resistência ao cisalhamento de RSU	35
Quadro 5 - Classificação dos movimentos de massa.....	39
Quadro 6 - Nível de segurança desejado contra perdas.....	42
Quadro 7 - Nível e segurança desejado contra danos materiais e ambientais	42
Quadro 8 - Principais métodos de solução de análises de estabilidades pela teoria do equilíbrio limite e suas características	44
Quadro 9 - Condições de equilíbrio estático de métodos de equilíbrio limite	45
Quadro 10 - Resultado do levantamento bibliográfico sobre estudos de análises de estabilidade de taludes de aterros sanitários	55
Quadro 11 - Casos de falhas em aterros de resíduos sólidos urbanos relatados na literatura técnica.....	60

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivo Geral	21
1.2.2 Objetivos Específicos	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 Aterros sanitários	22
2.2 Degradação dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários	23
2.3 Propriedades geomecânicas dos resíduos sólidos urbanos	27
2.3.1 Peso específico dos resíduos sólidos urbanos	28
2.3.2 Resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos	31
2.4 Mecanismos de monitoramento geotécnico de aterros sanitários	37
2.5 Análise de estabilidade de taludes	39
2.5.1 Métodos de análise de estabilidade por equilíbrio limite	43
2.6.2 Análise por Equilíbrio Limite Bidimensional (2D)	48
2.6.3 Análise por Equilíbrio Limite Tridimensional (3D)	49
2.7 Análise de estabilidade de taludes em aterros Sanitários	53
2.8 Estado da arte em estabilidade de taludes de aterros sanitários	55
2.9 Rupturas de Taludes de Aterros Sanitários	58
2.9.1 Casos de rupturas de taludes de aterros sanitários	62
3. METODOLOGIA	66
3.1 Caracterização da área de estudo	66
3.2 Análises de estabilidade	69
3.2.1 Dados de entrada	69
3.2.2 Métodos utilizados nas análises de estabilidade	71
3.2.3 <i>Softwares</i> utilizados	72
3.2.4 Análises bidimensionais	73
3.2.5 Análises de sensibilidade do fator de segurança	76
3.2.6 Análises tridimensionais	79
4. RESULTADOS	82
4. 1 Análises de estabilidade bidimensionais	82
4.1.1 Análises bidimensionais para o Cenário 1	82
4.1.2 Análises bidimensionais para o Cenário 2	87
4.1.3 Análises de sensibilidade do fator de segurança	92
4.2 Análises de estabilidade tridimensionais	98

4.2.1 Análises tridimensionais para o Cenário 1	98
4.2.2 Análises tridimensionais para o Cenário 2.....	101
5. CONCLUSÕES.....	106
REFERÊNCIAS	107
APÊNDICE A	117

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento contínuo da produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e as restrições ambientais à implantação de novos aterros, tornou-se comum uma estratégia de expandir a capacidade dos aterros existentes, o que implica na necessidade de aumentar a altura e área dessas estruturas (Ghasemian; Karimpour-Fard; Nadi, 2024). Essa abordagem visa otimizar a utilização do espaço disponível, minimizar os custos relacionados à criação de novos aterros e prevenir a utilização de novas áreas (LÜ *et al.*, 2018).

A preocupação com o alteamento dessas estruturas ganha ainda mais relevância diante de um contexto marcado pelos diversos incidentes graves em aterros, nas últimas décadas, em que o deslizamento de resíduos sólidos urbanos evoluiu para desastres de elevada magnitude, causando expressivos danos a população e ao meio ambiente (Li; Chen; Lin, 2023). Nessa perspectiva, a estabilidade de taludes é uma das principais preocupações da engenharia ao longo da operação de aterros de RSU (Gao *et al.*, 2018), sendo um desafio crítico ao longo de toda a vida útil desses empreendimentos. Desse modo, realizar avaliações da estabilidade de taludes de aterros torna-se crucial diante das questões ambientais decorrentes dos potenciais desastres associados a essas estruturas.

Comumente, esses estudos utilizam abordagens que considera a geometria do aterro em duas dimensões. Entretanto, em situações complexas nas quais a geometria do talude apresenta variações significativas e as propriedades dos materiais que compõem o maciço são heterogêneas e/ou anisotrópicas, torna-se fundamental ampliar a dimensão das análises, utilizando à abordagem tridimensional. Nesses casos, o modelo bidimensional pode não ser suficiente para capturar com precisão o comportamento do solo ou das estruturas envolvidas já que não considera as variações da geometria das propriedades dos materiais em todas as direções (Chakraborty; Goswami, 2016).

Stark e Eid (1998) defendem a vantagem de uma análise tridimensional em projetos de taludes com topografia, resistência ao cisalhamento ou condições de poropressão complexos. No entanto, este tipo de análise nem sempre é considerada devido a indisponibilidade de dados e complexidade computacional envolvida na modelagem tridimensional. Além disso, os custos adicionais associados à condução desses estudos representam uma barreira, levando à preferência pela abordagem de estabilidade em duas dimensões (2D) por ser mais simples.

Estudos como os de Strauss (1998), Zhan, Chen e Ling (2008), Basha e Raviteja (2018), Remédio (2014), Silva (2014), Jahanfar *et al.*, (2017), Lu *et al.* (2019), Cirolini *et al.* (2020), Medeiros, Norberto e Mariano (2020) e Damasceno *et al.* (2020) realizaram análises de estabilidade para diversos aterros, utilizando, predominantemente, abordagens bidimensionais, o que reflete uma tradição consolidada na literatura técnica. Diante disso, a escassez de estudos que abordem análises tridimensionais, sugere uma lacuna para explorar a influência da terceira dimensão na estabilidade de taludes de aterros sanitários. Essas análises têm o potencial de fornecer uma visão completa e detalhada das condições do terreno, levando a uma compreensão mais aprofundada dos fatores que afetam a estabilidade.

Considerando os riscos significativos associados às falhas em aterros sanitários, a proposta desse trabalho consistiu em realizar análises de estabilidade de taludes de um aterro sanitário localizado no semiárido paraibano, utilizando abordagens bidimensionais e tridimensionais, para assim, compreender a eficácia desses métodos na análise do comportamento geotécnico de aterros em diferentes cenários. Assim, ao combinar abordagens bidimensionais e tridimensionais, o presente trabalho é capaz de contribuir para o avanço do conhecimento científico sobre a influência da terceira dimensão na estabilidade de aterros sanitários com características semelhantes ao aterro objeto de estudo desse trabalho.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a estabilidade de taludes de aterro sanitário utilizando a abordagem bidimensional e tridimensional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a estabilidade de taludes de aterro sanitário por meio de análises de estabilidade bidimensionais e tridimensionais utilizando o método de Morgenstern-Price;
- Indicar a sensibilidade do fator de segurança das seções críticas bidimensionais frente a variações dos parâmetros de resistência ao cisalhamento;
- Verificar o desempenho de dois *softwares* em análises de estabilidade bidimensionais do aterro sanitário em estudo de acordo com o cenário considerado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

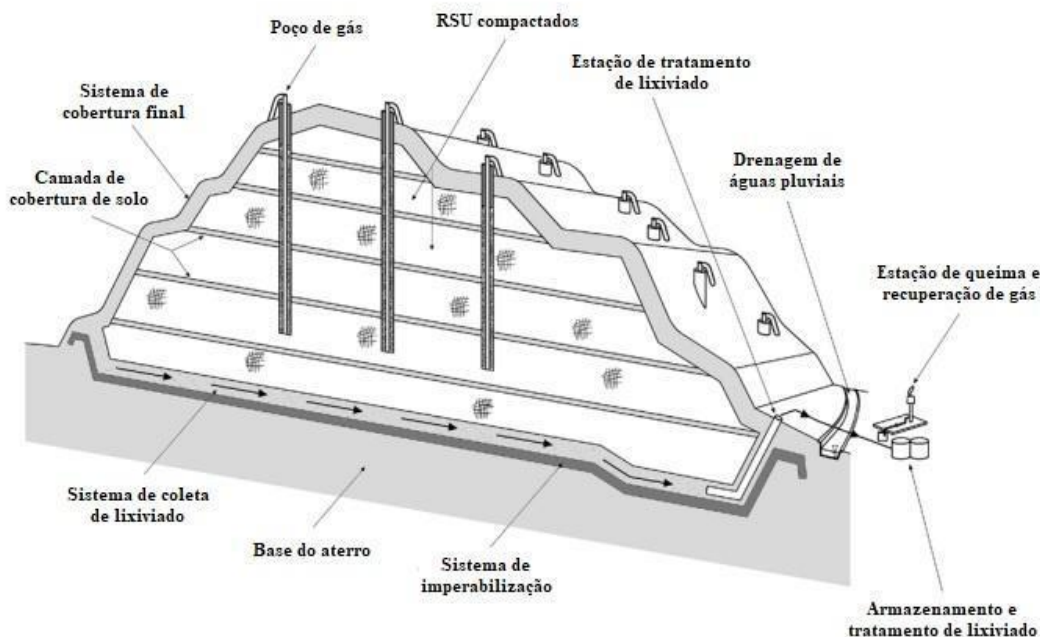
2.1 Aterros sanitários

A Lei 12.305/2010 atribuiu aos gestores públicos a tarefa de propiciar uma gestão ambiental adequada dos resíduos sólidos gerados no país. Nesse cenário, para o cumprimento da PNRS, a instalação de aterros sanitários vem aumentando. Conforme a NBR 8419 (ABNT, 1996), os aterros sanitários consistem em uma técnica de aterramento de resíduos sólidos urbanos, a fim de evitar prejuízos à saúde pública, bem como a sua segurança. Essa técnica envolve a utilização de princípios de engenharia geotécnica e estrutural para diminuir os impactos ambientais, confinando os resíduos em uma menor área possível, além de reduzi-los ao menor volume possível, de modo que ao término de cada jornada de trabalho os resíduos podem ser cobertos com uma camada de solo ou também em intervalos menores, caso seja necessário.

Apesar de haver diversas formas de tratamento dos RSU, os aterros sanitários ainda desempenham um papel fundamental como a principal opção de destinação final e tratamento para os resíduos, porém com ressalvas para países em que a incineração e a digestão são as principais formas de tratamento (Reis, 2018; Madon *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2023). Sendo assim, a utilização de aterros sanitários para a disposição final de resíduos sólidos consiste em uma prática utilizada no mundo todo (Ke *et al.*, 2022). Essa é a técnica mais utilizada para disposição de RSU por ser tecnologicamente mais simples e economicamente viável (Ma *et al.*, 2020). Ao serem construídos e operados da forma correta, os aterros apresentam redução significativa de contaminação e de possíveis danos ao meio ambiente (Silveira; Berté; Pelanda, 2018).

Esse tipo de obra é uma forma de tratamento que utiliza de técnicas de impermeabilização do solo, compactação e cobertura das células de resíduos, coleta e tratamento dos gases e dos líquidos gerados, para que assim, a proliferação de insetos e animais, odores, bem como a contaminação de corpos hídricos, por exemplo, seja evitada (Albuquerque, 2011; Nanda; Berruti, 2021). Na Figura 1 é possível visualizar os principais componentes de um aterro sanitário moderno.

Figura 1 - Principais componentes de aterros sanitários modernos e projetados



Fonte: Adaptado de Townsend *et al.* (2015).

Nas últimas décadas, devido ao aumento na geração de resíduos, se faz necessário expandir a capacidade dos aterros de RSU, isso pode ocorrer por meio do alteamento das células de resíduos e declives acentuados. Situação que pode trazer preocupações quanto à estabilidade dos aterros sanitários (Awad-Allah, 2022). De tal modo, para enfrentar essa realidade é necessário empregar técnicas de engenharia capazes de garantir a segurança tanto em termos de estabilidade quanto de impactos ambientais.

2.2 Degradação dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários

De acordo com Araújo Neto (2016), a deposição de RSU em aterros sanitários resulta na formação de um maciço heterogêneo e poroso composto por uma variedade de elementos com diferentes características e tamanhos de partículas. No maciço sanitário, durante o processo de biodegradação da matéria orgânica presente nos RSU ocorre uma perda de massa sólida. Essa constatação ressalta a complexidade e a dinâmica do ambiente no interior do aterro sanitário em que diversos fatores influenciam a decomposição e a transformação dos resíduos depositados.

Nesses empreendimentos, ao decorrer do processo degradativo, nos espaços vazios existentes entre os resíduos aterrados há a presença de ar, assim, a fase inicial da

decomposição dos resíduos é considerada aeróbica. A cobertura diária, os resíduos adicionados e a compactação podem limitar a transferência de oxigênio, resultando no término da decomposição aeróbica. Ao passo que o oxigênio presente nos resíduos é esgotado a situação passa a ser anaeróbia (Townsend *et al.*, 2015).

A digestão anaeróbia consiste em um processo de bastante complexidade que necessita da cooperação entre diferentes microrganismos anaeróbios e facultativos para prosseguimento das principais etapas que constituem o processo, sendo estas, Hidrólise (Fase I), Acidogênese (Fase II), Acetogênese (Fase III) e Metanogênese (Fase IV) (KHANAL, 2008). O Quadro 1 apresenta as fases de degradação e suas respectivas estimativas para a duração.

Quadro 1 - Esquema geral das fases de degradação dos Resíduos Sólidos Urbanos

Fase	Processo Biogeoquímico	Duração
I. Aeróbia	Hidrólise e degradação (ambiente aeróbio)	Horas a dias
II. Transição	Hidrólise e fermentação (ambiente anaeróbio)	Dias a semanas
III. Acidogênese	Acetogênese (ambiente anaeróbio)	6 a 18 meses
IV. Metanogênese	Metanogênese (ambiente anaeróbio)	Anos a décadas
V. Maturação	Oxidação	

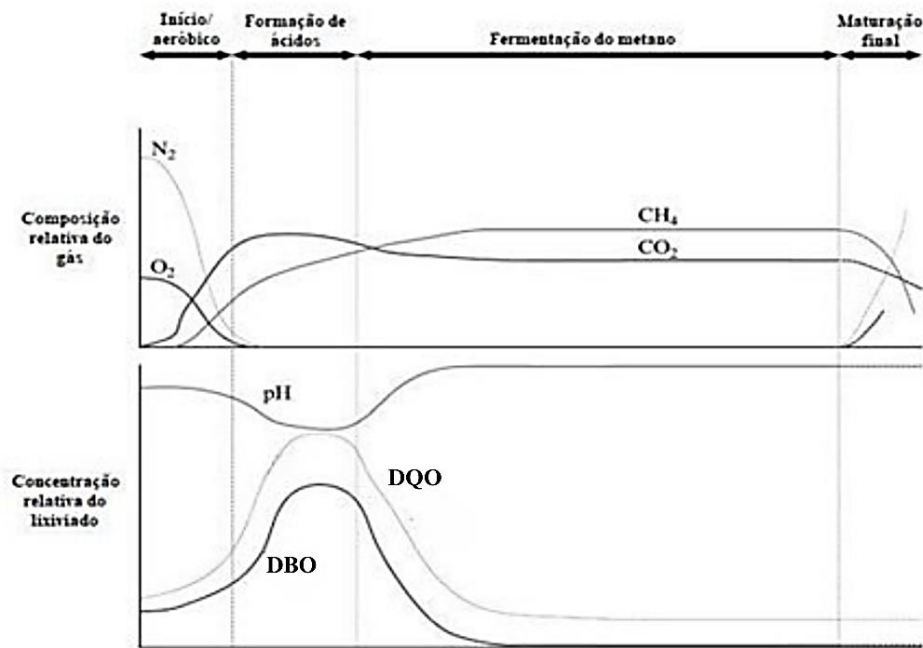
Fonte: Alves; Bertolo (2012).

Conforme Townsend *et al.* (2015), na fase ácida, a hidrólise de macromoléculas, a exemplo da celulose e de proteínas, eleva a produção de ácidos orgânicos resultando na diminuição do potencial hidrogeniônico. Nessa fase, a matéria orgânica dissolvida é composta principalmente por substâncias facilmente biodegradáveis, conforme indicado pelos altos valores de Demanda Biológica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO).

A Figura 2 fornece uma visão geral da microbiologia de estabilização anaeróbia de resíduos. Na fase metanogênica, comumente, a concentração de metano (CH₄) no biogás é ligeiramente maior que a do dióxido de carbono (CO₂). Os componentes biodegradáveis são rapidamente consumidos e, assim, a matéria orgânica lixiviada torna-

se dominada pela matéria orgânica recalcitrante à decomposição biológica, refletidos em menores valores de DBO e relação reduzida entre DBO e DQO. Nessa fase, a quantidade de matéria orgânica diminui significativamente, fazendo com que ocorra um recalque expressivo no aterro, causado pela redução no volume dos resíduos. Na fase final, a taxa de produção do gás reduz, consideravelmente, já que os componentes biodegradáveis dos resíduos estão quase esgotados.

Figura 2 - Fases de estabilização de resíduos



Fonte: Adaptado de Townsend *et al.* (2015).

Todavia, dentro de um aterro sanitário, essas etapas nem sempre se sucedem de forma linear e não ocorrem de maneira bem definida ao decorrer do tempo. Isso se deve à diversidade dos RSU e ao fluxo contínuo de novos resíduos sendo aterrados nas Células, criando uma situação em que RSU de diferentes idades estão presentes em uma mesma Célula. O que, por sua vez, pode levar ao desenvolvimento simultâneo de diversas fases de biodegradação (Guedes, 2018).

As fases da decomposição aeróbia nos aterros sanitários influenciam significativamente a estabilidade geotécnica dessas estruturas. A liberação de gases como dióxido de carbono e metano, juntamente com a produção de líquidos percolados, pode afetar a pressão nos poros e sua resistência. Essas mudanças nas propriedades do solo e dos resíduos podem aumentar o risco deslizamento do maciço e contaminação do ambiente. Portanto, é crucial monitorar os efeitos dos processos degradativos e

implementar medidas de mitigação, como técnicas de compactação adequadas e sistemas de drenagem, para garantir a estabilidade e segurança a longo prazo dos aterros sanitários.

Há uma ampla documentação acerca da decomposição dos componentes biodegradáveis dos RSU em metano e dióxido de carbono nos aterros sanitários (Barlaz *et al.*, 1989). Contudo, as mudanças na resistência ao cisalhamento dos resíduos, decorrentes da evolução de sua composição e estrutura ao longo do tempo, ainda são desconhecidas e permanecem um tema controverso (Bray *et al.*, 2009). Conforme Bareither *et al.*, (2012), a composição inicial dos resíduos e as mudanças posteriores nessa composição têm mais impacto na resistência ao cisalhamento dos RSU do que no próprio estágio de decomposição. Durante os processos degradativos, os resíduos menos degradados apresentam maior coesão e menores ângulos de atrito. Já os resíduos mais degradados exibem menor coesão e ângulos de atrito maiores (Abreu; Vilar, 2017).

Convém ressaltar ainda que a digestão anaeróbia, responsável pela evolução da decomposição dos resíduos, é um sistema em que diversos grupos atuam de maneira interativa para transformar a matéria orgânica complexa em metano, dióxido de carbono, gás sulfídrico e amônia (Simões, 2000). Diferentes fatores podem afetar a eficiência desse processo conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Principais fatores que influenciam os processos degradativos

Geometria e operação do aterro	Características dos resíduos	Ambiente interno	Ambiente externo
Dimensão do aterro	Composição dos resíduos	Umidade da massa na degradação	Precipitação e infiltração
Impermeabilização do aterro	Umidade dos resíduos	pH nas Células	Variação pressão atmosférica
Compactação dos resíduos	Peso específico	Temperatura	Temperatura
Tipo de resíduos		Disponibilidade de nutrientes/bactérias	

Fonte: (Maciel, 2003)

Os subprodutos gerados pelos processos degradativos são o lixiviado e o biogás. O lixiviado surge da umidade inicial presente nos resíduos, das possíveis infiltrações no

maciço e, principalmente, dos subprodutos da decomposição dos RSU (Keramati *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2018). Sendo um produto do processo de lixiviação, que ocorre durante a passagem de água pelos interstícios da massa aterrada, em que os componentes contidos nos resíduos sólidos são incorporados à fração líquida (Silva, 2023). É composto por água que carrega, em forma de solução ou suspensão, produtos químicos, metais contaminantes e matéria orgânica e sua composição depende do estágio de degradação dos RSU e do tipo de resíduos aterrados (Sarsby, 2013).

A forma como o lixiviado é distribuído dentro do maciço sanitário e as correspondentes poropressões desempenham um papel fundamental na preservação da estabilidade dos aterros (Feng *et al.*, 2021), pois mesmo que diversas condições possam desencadear a instabilidade do maciço sanitário (Blight, 2008), um alto nível de lixiviado é um dos fatores mais importantes (Jianguo *et al.*, 2010).

Outro subproduto que é o biogás, ou gás de aterro, é uma mistura de gases produzidos em decorrência da ação biológica na matéria orgânica em situação anaeróbia. Esse gás é composto, principalmente, por dióxido de carbono e metano, em uma constituição que pode apresentar variações (NBR 8419 - ABNT, 1992). De tal forma, os gases produzidos nos aterros sanitários podem influenciar consideravelmente na instabilidade de taludes, em decorrência da produção contínua e, ocasionalmente, elevada (STRAUSS, 1998).

2.3 Propriedades geomecânicas dos resíduos sólidos urbanos

As propriedades geotécnicas dos RSU apresentam variações significativas, sendo influenciadas pela composição, tempo e densidade dos resíduos. Esta variabilidade traz incertezas às análises da estabilidade de taludes de aterros tendo em vista que a estabilidade da massa de resíduos é influenciada por parâmetros geotécnicos (Mehdizadeh; Shariatmadari; Karimpour-Fard, 2020).

Nos aterros sanitários, a composição dos RSU é um fator responsável por influenciar diretamente o comportamento geomecânico do maciço de resíduos. As propriedades mecânicas predominantes desses materiais são diretamente afetadas pela sua composição e pelo comportamento de cada elemento presente. No Quadro 3 é apresentada uma classificação dos RSU com base nos elementos constituintes e como se comportam no maciço sanitário ao longo do tempo.

Quadro 3 - Categorização dos RSU de acordo com o comportamento geomecânico

Constituintes	Caracterização
Estáveis Inertes	Materiais como vidros e metais que apresentam propriedades estáveis ao longo do tempo.
Altamente deformáveis	Apresentam expressivas deformações sob cargas constantes ao longo do tempo como caixas de papel, plásticos e têxteis.
Degradáveis	Materiais de fácil degradação, exemplificados pelos materiais orgânicos, vegetal e restos alimentares.

Fonte: Adaptado de Boscov (2008).

Devido à natureza heterogênea dos RSU, torna-se necessário quantificar e qualificar suas características, uma vez que cada componente responde de maneira distinta às mudanças que ocorrem ao longo do tempo, como aos processos de biodegradação e as variações de forma e dimensão. Fatores esses que complicam a elaboração de amostras e ensaios (Norberto *et al.*, 2020).

Conforme afirma Feng *et al.*, (2018) entre os parâmetros geotécnicos dos RSU, a resistência ao cisalhamento e o peso específico são os principais fatores responsáveis por afetar a estabilidade dos taludes dos aterros. O peso específico, representativo da densidade dos materiais, e a resistência ao cisalhamento, representada pelos parâmetros de ângulo de atrito e coesão, são necessários para compreender e prever o comportamento dos solos e dos resíduos.

A determinação desses parâmetros para o dimensionamento de aterros sanitários envolve, geralmente, ensaios de laboratório ou de campo. Em alguns casos, recorre-se a estimativas baseadas em estudos e informações existentes na literatura técnica (Daciolo; Correia; Boscov, 2022).

2.3.1 Peso específico dos resíduos sólidos urbanos

O peso específico dos RSU dentro de um aterro sanitário pode apresentar variações consideráveis, influenciadas pela composição dos resíduos, tempo decorrido desde a deposição, nível de compactação, teor de umidade, altura do aterro (Strauss,

1998), o estado de tensões atuantes e pela evolução dos processos degradativos, entre outros (Tapahuasco, 2009).

Essa propriedade é influenciada pelas práticas de compactação empregadas nos aterros (Raviteja; Basha, 2021). A compactação de resíduos em um aterro é o fator primordial que regula tanto a densidade a curto prazo quanto a eficiência subsequente na disposição dos resíduos, exercendo uma influência significativa na estabilidade de um aterro. Sendo que, densidades elevadas estão geralmente associadas a maiores resistências ao cisalhamento (Hanson *et al.*, 2010). Diversas pesquisas analisaram a densidade dos resíduos sólidos em diversas condições conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de pesos específicos de RSU constatados na literatura técnica

Material	γ (kN/m³)	Referência
Resíduos frescos compactados	06 – 07	(KAVAZANJIAN, 2001)
Resíduos de uma camada superficial do aterro	10 – 12	(Zornberg <i>et al.</i> , 1999)
Resíduos de uma camada profunda do aterro	13 – 15	(Cowland <i>et al.</i> , 1993)
Resíduos pouco compactados e com alto teor de matéria orgânica	9 - 13	Kaimoto e Cepollina (1996)
Resíduos bem compactados	10 - 15	Kaimoto e Cepollina (1996)
Resíduos domésticos brutos retirados do aterro	4,90 – 11,6	(Powrie <i>et al.</i> , 1998)
Resíduo lançado no aterro	1,2 – 3,0	Sarsby (2000)
Resíduo compactado no aterro	4,0 – 12,0	Sarsby (2000)
Resíduos velhos e degradados	8,6 – 15,6	Bauer <i>et al.</i> , (2005)
Amostras de resíduos com 2 anos de aterramento a uma profundidade entre 1.5m e 6m	2,35 – 12,4	(Chiemchaisri <i>et al.</i> , 2007)
Amostras de resíduos aterrados retirados a cada 1m de profundidade de um aterro encerrado em 1985	10,67 – 23,05	(Yaqout <i>et al.</i> , 2007)

RSU coletados de uma estação de transferência	8,89 – 10,5	(Hossain <i>et al.</i> , 2009)
Resíduos, solo e solo aterrado	5,2	(Hanson <i>et al.</i> , 2008)
Resíduos, solo e solo aterrado	9,8	(Hanson <i>et al.</i> , 2008)
Resíduos obtidos em perfuração	13 – 17,5	(Machado <i>et al.</i> , 2010)
Resíduos de um biorreator de larga escala	5,0 – 7,0	(Bareither <i>et al.</i> , 2011)
Resíduos da espanha	15 – 21	(Yu <i>et al.</i> , 2011)
Resíduos provenientes de compactação dinâmica	15,6 – 20,9	(JIE <i>et al.</i> , 2013)
Resíduos frescos e com 4 anos de aterramento	7,2 – 12,5	(Feng <i>et al.</i> , 2017)
RSU secos após após a triagem mecânica dos materiais recicláveis de média e grande dimensão	6,6 – 10,0	(Juarez; Mondelli; Giacheti; 2023)

Fonte: Adaptado de Carvalho (2006) e Townsend *et al.* (2015)

Os valores de peso específico dos RSU são diretamente afetados pela idade. Com o passar do tempo, a decomposição da matéria orgânica ocasiona a perda de massa, alterações nas dimensões e, por consequência, na densidade. Isso também acarreta modificações nas propriedades mecânicas, como na compressibilidade e na resistência ao cisalhamento (Soares, 2021). Conforme os resíduos envelhecem, essa propriedade torna-se mais dependente da profundidade de aterramento, grau de decomposição e das condições climáticas (Dixon; Jones, 2005).

A densidade dos resíduos é significativamente afetada pela pressão de sobrecarga, que se refere à pressão exercida pelos materiais acima (resíduos e solo de cobertura) devido ao seu peso. As camadas mais profundas do aterro sofrem pressões de sobrecarga mais elevadas, levando ao aumento da densidade dos resíduos, especialmente, depois de ter ocorrido um certo grau de estabilização. De tal modo, os resíduos das camadas mais profundas são muito mais densos que os recentemente compactados na superfície (Townsend *et al.*, 2015). Ao longo do tempo, passa a ser mais sensível às condições climáticas, à profundidade da amostra e ao nível de degradação dos resíduos (Cox; Yesiller; Hanson, 2015).

Corroborando com essas ideias, em seu estudo sobre propriedades geotécnicas de RSU, ao obter o peso específico de amostras de resíduos retiradas na superfície e a 16 m de profundidade, Feng *et al.*, (2017) constataram que os RSU se tornaram mais densos e menos compressíveis com o aumento da profundidade. Isso está alinhado com a influência da pressão de sobrecarga e das condições de decomposição, destacando que as camadas mais profundas dos aterros tendem a apresentar resíduos mais densos e estabilizados em comparação com os encontrados na superfície.

2.3.2 Resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos

Por definição, a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos, semelhante aos solos, é a tensão de cisalhamento máxima experimentada pelos resíduos sólidos imediatamente antes da ruptura (Dehdari; Ajdari; Rostami, 2021). Os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU são a chave para determinar a estabilidade dos aterros e garantir sua operação estável (Zhang *et al.*, 2020).

Representados pela coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ), os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU são essenciais nas análises de estabilidade de taludes de aterros sanitários, tendo em vista que as rupturas geralmente ocorrem completamente ou, pelo menos, em parte, dentro do material residual (Zhan; Chen; Ling, 2008). No entanto, devido a composição heterogênea e a presença de resíduos com grandes dimensões há dificuldades na moldagem de amostras representativas, o que prejudica a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (Borgatto, 2011).

Essa característica desempenha um papel crucial na avaliação do aumento horizontal e vertical das Células de aterro (Feng *et al.*, 2017), já que a resistência dos RSU é significativamente influenciada por fatores como nível de tensão, umidade, grau de biodegradação, índice de vazios e peso específico (Babu; Lakshmikanthan; Santhosh, 2015). Um fator adicional, responsável por influenciar a resistência ao cisalhamento, é a variação dessa propriedade de acordo com a idade de aterramento dos resíduos, devido aos processos de decomposição dos componentes orgânicos que ocorrem ao longo do tempo (Dixon e Jones, 2005). Conforme a idade dos resíduos apresenta variações, a resistência dos resíduos também muda durante os anos de operação do aterro (Fan *et al.*, 2016). As alterações nas propriedades dos resíduos, devido a sua decomposição biológica dos resíduos, podem resultar em mudanças na resistência do material aterrado (Townsend *et al.*, 2015).

Conforme apresentado na Tabela 2, vários estudos analisaram como o processo de envelhecimento afeta a resistência ao cisalhamento de RSU.

Tabela 2 - Parâmetros de resistência de RSU de acordo com a idade dos resíduos

Idade dos RSU	Parâmetros de resistência		Referência
	c' (kPa)	ϕ (°)	
1 ano	22	72	Caicedo <i>et al.</i> , (2002)
1,5 – 2,5 anos	11	75	
Fresco	32	-	Gabr, Hossain e Barlaz (2007)
Velho	24	-	
1,7 anos	9,9	23,3	Zhan, Chen e Ling (2008)
12,8 anos	26	0	
Fresco	31 – 35	12 – 64	Reddy <i>et al.</i> , (2009)
1,5 anos	26 – 30	31 – 64	
Fresco	35	1	Reddy <i>et al.</i> , (2011)
Degradado	28	16 - 40	
Fresco	24,8	25	Shariatmadari, Sadeghpour e Razaghian (2014)
5 anos	45,8	11,2	
14 anos	34,1	12,2	
21 anos	30,8	16,1	
2 anos	15,7	29,1	Feng <i>et al.</i> , (2017)
4 anos	21,9	19,3	
1 a 23 anos	6,04 – 18,69	10,78 – 18,26	Huang <i>et al.</i> , (2023)

Fonte: Adaptado de Bahia, Araújo Neto e Gurjão (2020).

Os estudos mostram que a literatura técnica apresenta resultados discrepantes, enquanto alguns pesquisadores constataram que a resistência ao cisalhamento aumenta com o tempo, outros apontam para uma redução nessa resistência à medida que os resíduos envelhecem.

Conforme Keramati *et al.*, (2018), os resultados encontrados na literatura técnica se concentraram principalmente em amostras de países desenvolvidos, mas os padrões de consumo em nações em desenvolvimento diferem, significativamente, o que implica em composições dos RSU distintas. Por isso, generalizar os valores desses parâmetros para

locais com hábitos de consumo diferentes pode resultar em menores fatores de segurança nos projetos de aterros.

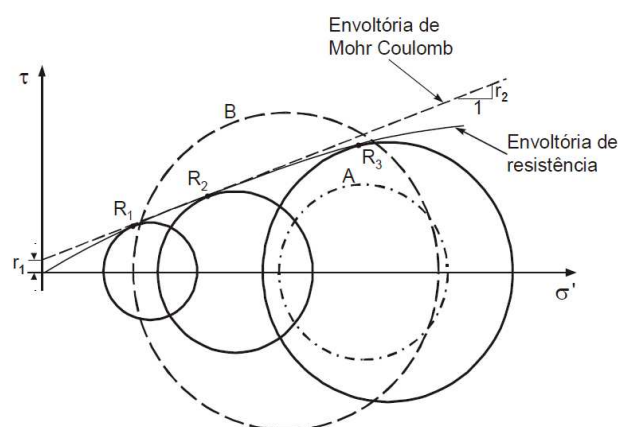
Em análises de estabilidade do aterro, a determinação do comportamento de resistência ao cisalhamento dos RSU é geralmente baseada em modelos derivados de solos, principalmente, o critério de falha de Mohr-Coulomb, definido pela coesão e ângulo de atrito (Bauer; Münnich; Fricke, 2006).

2.3.2.1 Critério de ruptura de Mohr-Coulomb

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb foi estabelecido unindo os conceitos delineados por Coulomb (1776) e Mohr (1900). Conforme Coulomb (1776), o critério de ruptura expresso por uma reta linear entre a tensão cisalhante no plano de ruptura e a tensão normal. No critério de Mohr foi introduzido que o colapso do material é resultado da interação entre tensões cisalhantes (τ) e tensões normais (σ), caracterizado pela trajetória formada pelos círculos representativos da ruptura (Pinto, 2006).

Unindo esses conceitos, tem-se o critério de Mohr-Coulomb em que a ruptura ocorre quando os círculos de tensão de Mohr atingem a reta linear de resistência do material, descrita pela equação linear de Coulomb. A Figura 3 ilustra esse critério em que o círculo A denota um estado possível de tensões e o círculo B exemplifica uma situação impossível, visto que o solo teria se rompido antes de atingi-lo.

Figura 3 - Envoltória de resistência e envoltória de resistência de Mohr - Coulomb



Fonte: Vilar (2021).

A utilização do critério de ruptura de Mohr-Coulomb adaptado para (RSU) pode ser válida devido à sua capacidade de avaliar a resistência ao cisalhamento friccional e

coesiva. Esse critério fornece uma maneira de determinar a resistência de um material à deformação por cisalhamento sob diferentes condições de tensão. Isso é crucial para entender como os RSU se comportam quando sujeitos a forças externas, como pressões de sobrecarga decorrentes do alteamento dos aterros sanitários.

No entanto, é importante considerar as diferenças entre o comportamento geotécnico dos RSUs e dos solos convencionais (Oweis, 1993). A resistência ao cisalhamento dos resíduos pode ser expressa em função da tensão aplicada, por meio do ângulo de atrito e da coesão, de forma semelhante ao critério de Mohr-Coulomb, geralmente, representados pelas envoltórias de Mohr-Coulomb (Strauss, 1998).

Conforme Daciolo (2020) para entender como os RSU se comportam sob diferentes condições de tensão é essencial compreender como eles reagem à aplicação de forças e deformações, representadas pelas curvas tensão-deformação. A obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento é comumente feita por meio de ensaios de campo e de laboratório, nos quais diferentes experimentos são conduzidos para entender como os RSU respondem a variadas condições de carregamento, permitindo a identificação destes parâmetros.

É fundamental ressaltar que os RSU têm propriedades distintas dos solos naturais, o que requer cautela ao aplicar modelos geotécnicos existentes. A adaptação desses modelos pode ser útil, mas é necessário compreender as diferenças específicas no comportamento desses materiais para garantir uma representação precisa da sua resistência ao cisalhamento sob diferentes condições.

2.3.2.2 Ensaios de resistência

A determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU no Brasil foi inicialmente estabelecida por meio de revisões da literatura técnica internacional. No entanto, os resultados dessas análises indicaram discrepâncias consideráveis em relação às características dos resíduos presentes no contexto brasileiros. Determinar a resistência ao cisalhamento de resíduos envolve retroanálises de taludes rompidos e a condução de ensaios tanto em campo quanto em laboratório (Abreu; Vilar, 2017).

De acordo com Stark *et al.*, (2009) a condução de ensaios de resistência ao cisalhamento de RSU é desafiadora, isso ocorre devido à diversidade da composição dos resíduos, dificuldade na preparação das amostras, tamanhos de partículas variados,

propriedades dos RSU sujeitas a variações ao longo do tempo e a considerável variabilidade no peso específico do material. Um dos principais desafios na obtenção dos parâmetros geotécnicos dos RSU é a complexidade em obter e realizar ensaios com amostras de tamanho adequado para representar as condições em campo (Mitchell; Bray; Mitchell, 1995). As investigações em aterros de resíduos estão condicionadas a configuração do aterro e ao tipo de material a ser analisado (Carvalho, 1999).

No Quadro 4 são apresentadas metodologias de campo e laboratório para obtenção de parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU.

Quadro 4 - Revisão de métodos para medir a resistência ao cisalhamento de RSU

Tipo	Método de ensaio	Comentários	Referências
Campo	Retroanálise de rupturas de talude	Informação adequada raramente disponível (poropressão, forma e posição da superfície de ruptura).	Koerner e Soong (2000)
	Retroanálise de experimentos de talude cortado	Grandes deformações observadas, mas sem rupturas por cisalhamento.	Singh e Murphy (1990), Cowland <i>et al.</i> (1993)
	Retroanálise de taludes estáveis existentes	Alterar a composição dos resíduos significa que a experiência passada não é um guia para o desempenho futuro.	Gotteland <i>et al.</i> (2002)
	Ensaio de cisalhamento direto de campo	Dificuldades de execução e os resultados são relacionados a baixos níveis de tensão.	Jessberger e Kockel (1993)
	CPT e ensaio de palheta	Nenhuma relação clara entre a resistência à penetração e a resistência ao cisalhamento dos RSU pode fornecer informações úteis em materiais degradados mais semelhantes ao solo.	-
	CPT	Os resultados de penetração do cone nos resíduos antigos resultaram em uma resistência de	Zhan, Chen e Ling (2008)

		ponta e um atrito lateral mais alto do que nos resíduos frescos.	
	CPTu	Detecção de nível de lixiviado em profundidades rasas.	(Ramaiah; Ramana, 2017)
	SPT e CPT	Os resultados dos ensaios SPT e CPT indicam uma maior resistência à penetração nos resíduos mais antigos e mais profundos.	(Gomes; Lopes; Oliveira, 2013)
	SPT	Resistência à penetração aumenta com a profundidade.	Carvalho (1999)
		Sem constatação de tendência de aumento ou diminuição do índice de resistência à penetração (NSPT) ao longo do tempo.	Da Silva <i>et al.</i> (2021)
Laboratório	Compressão triaxial	Amostras perturbadas, pico de resistência ao cisalhamento não obtido devido à compressão e densificação da amostra.	Jessberger (1994), Grisolia <i>et al.</i> (1995b)
	Cisalhamento direto	Exigência de grandes equipamentos, amostras deformadas e grandes deslocamentos exigidos para mobilizar a resistência ao cisalhamento de pico.	Kolsch (1995)., Gotteland <i>et al.</i> , (2001)
	Cisalhamento simples	Grande dispositivo necessário, amostras perturbadas, informações úteis sobre rigidez de cisalhamento (usado em análises sísmicas)	Kavazanjian <i>et al.</i> , (1999)

Fonte: Adaptado de Dixon e Jones (2005).

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento podem ser determinados considerando tensões totais ou efetivas. Optar por parâmetros de resistência ao cisalhamento totais oferece uma representação mais precisa do comportamento do aterro, especialmente, porque os resíduos frequentemente se encontram em estados não saturados ao longo de grande parte de sua vida útil (Bareither *et al.*, 2012). A Tabela 4

apresenta valores de coesão e ângulo de atrito obtidos na literatura técnica e o respectivo método de ensaio utilizado.

Tabela 3 - Valores de coesão e ângulo encontrados na literatura técnica obtidos em ensaios de resistência

Método de ensaio	Parâmetros de resistência		Referência
	c' (kPa)	ϕ (°)	
Compressão triaxial	13	20 – 25	Santos <i>et al.</i> , (1998)
Cisalhamento direto e Compressão Triaxial	26	24	Caicedo <i>et al.</i> , (2002)
Compressão triaxial (CU)	0,5 - 70	14 – 27,4	Machado <i>et al.</i> , (2002)
Cisalhamento direto	29,7 - 30	42,5 – 46	Fucale (2005)
Compressão triaxial (CD e CU)	0 – 25,8	24,9 – 66	Nascimento (2007)
Cisalhamento direto	20	37	Bareither <i>et al.</i> , (2012)
Compressão triaxial (CU)	0	34 – 44	Zekkos <i>et al.</i> , (2012)
Compressão triaxial (CU)	11 – 36	10 – 45	(Shariatmadari <i>et al.</i> , 2014)
Compressão triaxial (CU)	71,3	35,9	(Li; Li, 2016)
Cisalhamento direto	13 - 17	23 – 34	Ramaiah <i>et al.</i> , (2017)
Cisalhamento direto em larga escala	15,7 – 21,9	29,1 – 18,3	(Feng <i>et al.</i> , 2017)

Fonte: Adaptado de Santos *et al.*, (1998), Caicedo *et al.*, (2002), Machado *et al.*, (2002), Fucale (2005), Nascimento (2007), Ribeiro (2007), Bareither *et al.*, (2012), Zekkos *et al.*, (2012), (Shariatmadari *et al.*, 2014), Li e Li (2016), Ramaiah *et al.*, (2017) e Feng *et al.*, (2017).

2.4 Mecanismos de monitoramento geotécnico de aterros sanitários

Em aterros sanitários, o monitoramento geoambiental deve ser realizado durante o funcionamento do aterro e após o seu fechamento, para garantir a preservação do meio ambiente, a salubridade da população do entorno e a segurança da obra. Além disso, é necessário ainda garantir a estabilidade do maciço e o funcionamento dos sistemas de drenagem de lixiviados e gases (Araújo Neto, 2021).

A análise da segurança global de taludes em aterros sanitários é uma das preocupações mais críticas no monitoramento geotécnico desses locais. Dado que a estabilidade geotécnica dos aterros é afetada por uma extensa variedade de parâmetros geotécnicos, é essencial que a estabilidade do maciço de resíduos, das camadas de cobertura final e de base, e a fundação do aterro seja cuidadosamente monitorada (Mehdizadeh *et al.*, 2020).

É essencial enfatizar que, independentemente do método utilizado para avaliar a estabilidade de um talude, é altamente recomendável realizar investigações geotécnicas detalhadas e implementar sistemas de monitoramento de campo. Esses sistemas permitem o acompanhamento constante de deslocamentos horizontais e verticais do talude, assim como dos níveis de pressão piezométrica. Esse acompanhamento é crucial tanto durante a construção quanto após sua conclusão. Somente com base nessas informações, o projetista pode avaliar as premissas do projeto ou sugerir ajustes no modelo inicial (Gerscovich, 2016).

O monitoramento geotécnico desses empreendimentos deve ser incorporado a partir da etapa de planejamento do monitoramento ambiental, ainda na fase de projeto. É essencial estabelecer um sistema de monitoramento que permita uma avaliação contínua e periódica da estabilidade e do comportamento do maciço. Por meio dos resultados obtidos com o monitoramento é possível detectar variações no padrão de comportamento esperado e sugerir medidas preventivas e corretivas, direcionando as ações de conservação e manutenção necessárias (Simões; Catapreta, 2013).

No contexto brasileiro, não existe uma regulamentação específica para a avaliação da estabilidade de aterros sanitários por meio de instrumentação em campo (Araújo Neto, 2021). Conforme destaca Boscov (2008), a NBR 11682 (ABNT, 2009) oferece diretrizes sobre modelos, critérios e limites para a avaliação do comportamento de maciços terrosos utilizando instrumentação.

Implantar um sistema de monitoramento geotécnico nos aterros sanitários é fundamental para prever e evitar rupturas de taludes e deslizamentos de resíduos. Para assegurar sua eficácia, é necessário investigar uma série de fatores relevantes (Andrades, 2018). Isso engloba a análise de recalques, deslocamentos, geração e variação das pressões internas de líquidos e gases (Simões *et al.*, 2003). Inspeções visuais também devem estar inseridas nesse processo, bem como, dados geológicos específicos do local, quantidade e características dos resíduos que chegam e são aterrados. Configuração da Célula de resíduos, a operação do empreendimento e o estágio de encerramento (Benvenuto *et al.*, 2019).

Para o monitoramento dos deslocamentos do maciço sanitário, o método comumente empregado é o de levantamentos topográficos de marcos superficiais, os quais registram os movimentos do maciço em relação a um ponto de referência fixo

(Bosco, 2008). Já o monitoramento dos níveis de líquido ou nível piezométrico de líquidos é realizado utilizando piezômetros. Esses dispositivos são instrumentos empregados para detectar variações no nível de piezométrico de líquidos presentes no interior do maciço (Slimani *et al.*, 2017).

2.5 Análise de estabilidade de taludes

A definição de talude consiste em qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha. Podendo ser classificados em taludes naturais ou encostas, ou taludes construídos pelo homem, como os cortes e aterros (Massad, 2003). O conceito de estabilidade de taludes entra num contexto marcado por condições em que uma parte do material que constitui o talude pode deslocar-se em relação ao maciço restante, o que gera um processo denominado movimento de massa, esse que ocorre ao longo de uma superfície chamada superfície de ruptura. No Quadro 5 é apresentada a classificação geral dos movimentos de massa.

Quadro 5 - Classificação dos movimentos de massa

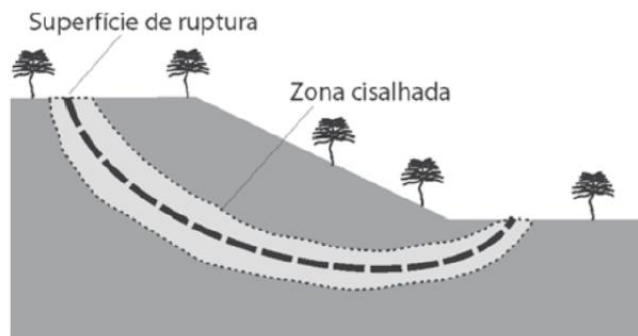
Classificação dos movimentos de massa	Definição
Rastejo (<i>creep</i>)	Rastejo é um tipo de movimento de terra que ocorre em fluxo lento e vagaroso, imperceptível e contínuo. Esse tipo de deslocamento de terra é provocado por tensão de cisalhamento interna suficiente para causar deformação, porém insuficiente para causar rupturas.
Escorregamentos (<i>slides</i>)	O escorregamento é um movimento de uma massa de solo ou rocha, em declive, pode ocorrer sobre superfícies em ruptura ou sobre zonas relativamente finas com intensa deformação por cisalhamento.
Quedas (<i>falls</i>)	Quedas consistem em movimentos que ocorrem de forma repentina para baixo, podendo ser de rocha ou terra, ou ambas, que se desprendem de taludes íngremes ou de penhascos.

Corridas (<i>flows</i>)	Corridas são movimentos de terra caracterizadas por uma relativa velocidade no processo de escoamento do solo ou material formado por solo e rocha com massa de aspecto viscoso.
--------------------------------	--

Fonte: Adaptado de Highland e Bobrowsky (2008).

A necessidade de realizar análises de estabilidade de taludes surge em diversas situações, a exemplo de barragens de rejeito e aterros sanitários. Nesse contexto, a consideração de ruptura parte do pressuposto de que uma superfície de cisalhamento contínua é formada na massa de solo. Isso implica que existe uma camada de solo ao redor da superfície de cisalhamento que perde suas características ao longo do processo de ruptura, originando uma zona cisalhada conforme representado na Figura 4. Nesse processo, forma-se a zona cisalhada, primeiramente, e posteriormente a superfície de cisalhamento (Gerscovich, 2016).

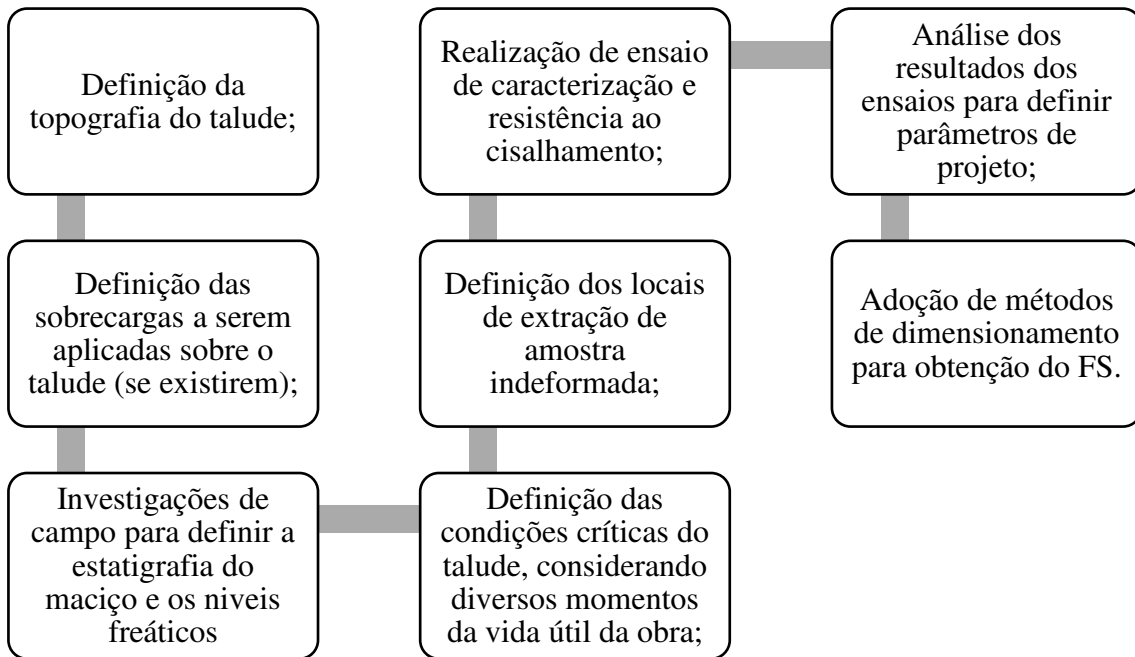
Figura 4 - Zona cisalhada e superfície de cisalhamento



Fonte: Gerscovich (2016).

A concepção de um projeto de análise estabilidade de taludes é iniciada com o objetivo de avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo presente em talude natural ou construído. Geralmente, os projetos seguem uma abordagem determinística em que se calcula o Fator de Segurança (FS) comparando as tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento (Gerscovich; Vargas Junior; Campos, 2015). Em geral, os estudos de estabilidade de taludes convencionais para solos seguem a seguinte metodologia apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Metodologia de estudos de estabilidade de taludes



Fonte: Adaptado de Gerscovich (2016).

Conforme Massad (2003), para determinar o FS é necessário conhecer as forças atuantes no talude, essas são classificadas em dois tipos: forças instabilizadoras e forças resistentes. Enquanto as forças instabilizadoras são responsáveis por induzir o movimento de massa ao longo da superfície de ruptura por meio das tensões cisalhantes mobilizadas, as forças resistentes lutam contra a ação do movimento de massa, devido à resistência ao cisalhamento do material.

O fator de segurança é obtido pela divisão da resistência ao cisalhamento do material (τ_f) em análise pela tensão cisalhante atuante ou resistência mobilizada (τ_{mob}) ao longo da superfície de ruptura, conforme demonstrado na Equação (1).

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (1)$$

Em que:

FS: fator de segurança;

τ_f : resistência ao cisalhamento (kPa);

τ_{mob} : tensões cisalhantes mobilizadas ao longo da superfície de ruptura (kPa).

Se o fator de segurança (FS) for maior que 1, significa que as condições são estáveis. Se for igual a 1, representa o limite da estabilidade. Valores abaixo de 1 não têm significado físico (Remédio, 2014).

A determinação do limite aceitável para o fator de segurança é influenciada, entre outros aspectos, pelas possíveis consequências de uma possível falha em termos de danos humanos e/ou financeiros. A NBR 11682 (ABNT, 2009) estipula que, dependendo dos níveis de risco envolvidos, é primordial classificar inicialmente o projeto em uma das categorias de nível de segurança definidas a partir dos riscos associados a danos humanos e perdas materiais apresentados nos Quadros 6 e 7, respectivamente.

Quadro 6 - Nível de segurança desejado contra perdas

Nível de segurança	Critério
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais urbanos, ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas.
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas.
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas.

Fonte: (ABNT, 2009)

A classificação de risco deve levar em conta não apenas as condições atuais do talude, mas também a utilização futura da área, garantindo a estabilidade contra escavações na base, desmatamento, cargas excessivas e elevada infiltração (Gerscovich, 2016).

Quadro 7 - Nível e segurança desejado contra danos materiais e ambientais

Nível de segurança	Critério
Alto	Danos materiais: locais próximos a propriedades e alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais.

	Danos ambientais: locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeitos e fábrica de produtos tóxicos.
Médio	Danos materiais: locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos ambientais: locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Baixo	Danos materiais: locais próximos a propriedades de valor reduzido. Danos ambientais: locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Fonte: ABNT (2009).

Outra recomendação da NBR 11682 (ABNT, 2009) relacionada aos níveis de segurança estabelecidos para projeto diz respeito aos fatores de segurança mínimos admissíveis, sendo apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Fatores de segurança mínimos para escorregamentos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: ABNT (2009).

Vale salientar ainda que, além de calcular o fator de segurança, é aconselhável implantar dispositivos de campo para monitorar os deslocamentos horizontais e verticais do talude, bem como os níveis de pressão piezométrica. Esse monitoramento deve ser realizado tanto durante a construção quanto após a conclusão da obra (Gerscovich, 2016).

2.5.1 Métodos de análise de estabilidade por equilíbrio limite

Conforme Massad (2003), os métodos para análise de estabilidade de taludes, utilizados, consistem na hipótese de haver equilíbrio numa massa de solo, tida como um corpo rígido-plástico, considerando que esse corpo está na iminência de entrar em

processo de escorregamento. Por isso, os métodos são chamados de maneira geral, de “métodos de equilíbrio-limite”. Tendo como base as forças que atuam no corpo, as tensões de cisalhamento induzidas são determinadas por meio de equações de equilíbrio. Os métodos de Equilíbrio-Limite partem das seguintes premissas:

1. O solo comporta-se como material rígido-plástico, ou seja, rompe bruscamente, sem que haja deformações;
2. As equações de equilíbrio têm validade até a iminência da ruptura, quando o processo se torna dinâmica;
3. O coeficiente de segurança (FS) é constante ao longo da linha de ruptura, isto é, ignoram-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

Dentre os métodos tradicionais desta abordagem, destacam-se o método Ordinário de Fellenius (1936), o método proposto por Bishop (1955), o método de Morgenstern-Price (1965), o método Spencer (1967) e o método Janbu (1975) (Dang *et al.*, 2022). O método de equilíbrio limite fragmenta o talude em blocos menores e estabelece uma solução de equilíbrio de forças para esses blocos, permitindo a determinação do fator de segurança (Zhang *et al.*, 2020). O Quadro 9 apresenta as principais abordagens para a resolução de uma análise de estabilidade em taludes de terra, utilizando o conceito de equilíbrio limite.

Quadro 8 - Principais métodos de solução de análises de estabilidades pela teoria do equilíbrio limite e suas características

Método	Características
Fellenius	Subestima o fator de segurança. Erros significativos em massas de ruptura profundas com elevada poropressão. O cálculo é bastante simples, sem necessidade de iteração. Estritamente aplicável apenas a superfícies de ruptura circulares.
Bishop simplificado	Força normal na base da fatia obtida pela resolução de forças em uma fatia na direção vertical. Os resultados são bastante precisos. O método é estritamente restrito a superfícies de ruptura de formato circular. Procedimento iterativo necessário para solução, mas convergência rápida. Erros são possíveis quando parte da superfície de ruptura tem inclinação negativa acentuada perto do topo.
Janbu	Necessita da suposição em relação à posição da linha de ação da resultante. As iterações são realizadas com conjuntos sucessivos de forças entre as fatias até que a convergência seja alcançada. Adequado

	para superfícies de escorregamento de forma arbitrária. A convergência geralmente é rápida.
Janbu simplificado	O uso de fatores de correção é necessário. Adequado para superfícies de escorregamento de forma arbitrária em solos e rochas, principalmente para trabalhos preliminares.
Morgenstern-Price	Método versátil que satisfaz o equilíbrio de forças e momentos e leva em conta forças entre fatias. Uma função de força lateral deve ser assumida. O método é aplicável a superfícies de ruptura de formato arbitrário e condições de contorno arbitrárias. A aceitabilidade da solução deve ser verificada como no método Janbu. Experiência considerável e julgamento necessários para usar o método de forma confiável, para assumir funções de força lateral que conduzam a resultados aceitáveis e para interpretar os resultados.
Spencer	Originalmente concebido para superfícies de rupturas circulares, mas adaptado para superfícies de rupturas não circulares (Spencer, 1973; Wright, 1975). Assume que as forças entre fatias são paralelas. Precisão aceitável. Satisfaz o equilíbrio de forças e momentos. Desejável uso de computador. Especialmente concebido para problemas de estabilidade de aterros, mas pode ser utilizado para todos os tipos de problemas.

Fonte: Chowdhury, Bhattacharya e Flentje (2010).

Nesses métodos, o solo é fragmentado em segmentos verticais e, então, é analisado sob a ótica do equilíbrio estático (Quadro 10). A estabilidade da estrutura é avaliada por meio de um sistema que busca o equilíbrio das forças estáticas atuantes na massa de solo, delimitada pela superfície em que ocorre a potencial ruptura. O fator de segurança é considerado constante ao longo dessa superfície. O equilíbrio do solo é estabelecido pela redução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, incluindo a coesão e o ângulo de atrito interno (Lima, 2002).

Quadro 9 - Condições de equilíbrio estático de métodos de equilíbrio limite

Método	Equilíbrio de Forças		Equilíbrio de momentos
	X	Y	
Fellenius (1936)	não	não	sim
Bishop (1955)	sim	não	sim
Janbu (1973)	sim	não	não
Morgenstern-Price	sim	sim	sim
Spencer (1973)	sim	sim	sim

Fonte: Adaptado de Abramson (2022).

2.5.1.1 Método de Fellenius (1936)

O método de Fellenius, apresenta simplicidade ao estabelecer uma equação linear para determinar o fator de segurança, pois realiza uma simplificação que não reflete completamente a realidade física. Ao considerar que as forças de interação entre as fatias são todas paralelas à base delas, o método não leva em conta variações nas inclinações das forças ao passar de uma fatia para outra. Isso contraria o princípio fundamental de ação e reação de Newton, já que as forças resultantes entre as fatias adjacentes podem ter direções e intensidades diferentes devido à heterogeneidade do solo (FREDLUND, 1977).

Segundo Strauss (1998), o método emprega fatias para calcular a distribuição da tensão normal na superfície de falha, crucial para análises com tensões efetivas. Esse método apenas atende ao equilíbrio de momentos, presumindo que a resultante das forças entre as fatias é paralela à base. Embora seja prático, em cenários mais complexos ou em que a precisão é crucial, métodos mais avançados capazes de considerar a variação das forças entre as fatias podem ser mais apropriados.

2.5.1.2 Método de Bishop Simplificado (1955)

O Método Simplificado de Bishop (1955) postula que, em uma superfície de ruptura circular, o resultado das forças laterais na fatia é horizontal. Consequentemente, o FS é derivado por meio do equilíbrio de forças verticais. São considerados valores arbitrários durante o processo de obtenção do FS. Em outras palavras, a determinação da superfície crítica, que fornece o fator de segurança mínimo, exige a adoção progressiva de valores até a convergência desejada. Esse método oferece valores consideravelmente aceitáveis para o fator de segurança em relação a linhas de rupturas circulares.

No entanto, o método proposto por Morgenstern-Price (1965) resultará em valores mais confiáveis. Essa diferença de desempenho ocorre devido ao equilíbrio de momento ser independente das forças de cisalhamento entre as fatias, ao contrário das rupturas planas que são dependentes das forças tangenciais de cisalhamento (SILVA, 2011)

2.6.1.3 Método de Morgenstern-Price (1965)

O método mais abrangente de equilíbrio limite foi concebido por Morgenstern & Price (1965). Este procedimento leva em consideração todas as equações de equilíbrio e

viabiliza a utilização de qualquer superfície de ruptura. Esse método satisfaz, simultaneamente, as condições de equilíbrio de momento e forças. As interações entre as forças são controladas por meio de uma função $f(x)$ multiplicada por um parâmetro λ , que modula a influência das forças entre as fatias. Os valores do FS e λ são deduzidos pela combinação de equações que descrevem o equilíbrio de forças normais e tangenciais (Silva Júnior, 2023).

Sendo tomado como referência por ser mais rigoroso (Whitman *et al.*, 1967). Isso ocorre, pois esse método atende a todas as exigências do equilíbrio estático. É indicado para análises minuciosas e retroanálises, especialmente quando se está lidando com rupturas de forma não circular (Gerscovich, 2016).

2.6.1.4 Método de Spencer (1967)

Inicialmente, o método desenvolvido por Spencer (1967) foi concebido para lidar com rupturas circulares, sendo posteriormente adaptado para abranger superfícies de ruptura com formas irregulares. Assim como o procedimento proposto por Morgenstern & Price (1965), esse método é reconhecido como uma abordagem rigorosa, pois atende a todas as equações de equilíbrio de forças (x, y) e momentos. No entanto, diferencia-se ao considerar em seus cálculos a ruptura por uma superfície de qualquer formato e a resultante das forças interlamelares com uma orientação constante por meio da massa deslizando (Abramson, 2002).

2.6.1.5 Método de Janbu simplificado

O método de Janbu simplificado desconsidera as forças normais e cortantes entre as fatias, focando apenas no equilíbrio das forças. Ele introduz um fator de correção f_0 , o qual é multiplicado pelo fator de segurança determinado pelo equilíbrio das forças na direção horizontal. Esse fator de correção compensa as interações entre as forças que são desconsideradas pelo método. O resultado final do fator de segurança é obtido multiplicando-se o FS pelo f_0 . Utilizando a equação de equilíbrio das forças verticais, é viável calcular a força normal na base (FREDLUND, 1977).

Conforme apontado por Gerscovich (2016), o propósito principal por trás do método de Janbu simplificado, foi reduzir a intensidade do trabalho computacional necessário pelo método rigoroso. Isso viabilizou o cálculo do fator de segurança por meio

de procedimentos computacionais mais simples. Essa abordagem simplificada permitiu calcular o fator de segurança de forma mais simples, exigindo menos complexidade nos cálculos.

2.6.2 Análise por Equilíbrio Limite Bidimensional (2D)

As condições de deformação plana foram inicialmente consideradas como restritas a duas dimensões, sendo assim, os problemas de estabilidade de taludes foram formulados, primeiramente, na perspectiva bidimensional (Kumar; Choudhary; Burman, 2022). Apesar dos avanços inovadores em pesquisa e *softwares*, a análise da estabilidade de taludes ainda se mantém como um desafio contínuo. Tipicamente, esta avaliação é feita por meio de modelos bidimensionais, que se baseiam no método de equilíbrio-limite devido à sua simplicidade e eficácia. O método de equilíbrio limite destaca-se por sua simplicidade e conceito claro, sendo extensivamente empregado na análise de estabilidade de taludes em duas dimensões.

Conforme a Seequent (2023), a derivação das forças e momentos das equações do fator de segurança resulta em um conjunto de equações não lineares que requerem solução por meio de um procedimento de Newton-Raphson. A não linearidade se apresenta nas equações conforme segue:

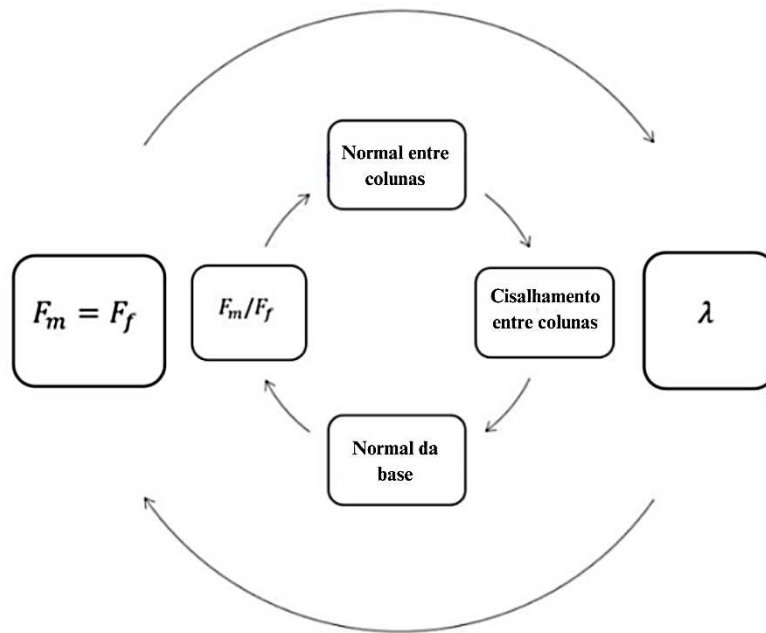
- A força normal na base de uma coluna é expressa como uma função de F ;
- F é representado como uma função da força normal na base de uma coluna;
- A força normal intercolunar é, de forma indireta, uma função de F , por meio da força normal na base da coluna, e, diretamente, por meio do cisalhamento mobilizado; e,
- A força de cisalhamento intercolunar é expressa como uma função da força normal intercolunar, que, por sua vez, é uma função de F .

A Figura 6 apresenta o fluxo de trabalho para a solução de uma análise bidimensional. O esquema de resolução compreende os seguintes passos essenciais, em que i = número de iterações e λ é um fator de escala necessário para o equilíbrio.

1. Inicializar os parâmetros λ_0 e $F_f = F_m = 1,0$.
2. Buscar o valor de λ que resulta em $F_f = F_m$, realizando iterações até que, para cada $F_{f(i)} = F_{f(i-1)}$ e $F_{m(i)} = F_{m(i-1)}$ para cada valor de λ .

3. O procedimento de cálculo é interrompido quando $F_f = F_m$.

Figura 6 - Fluxo de trabalho para a solução de uma análise 2D.



Fonte: Seequent (2023).

2.6.3 Análise por Equilíbrio Limite Tridimensional (3D)

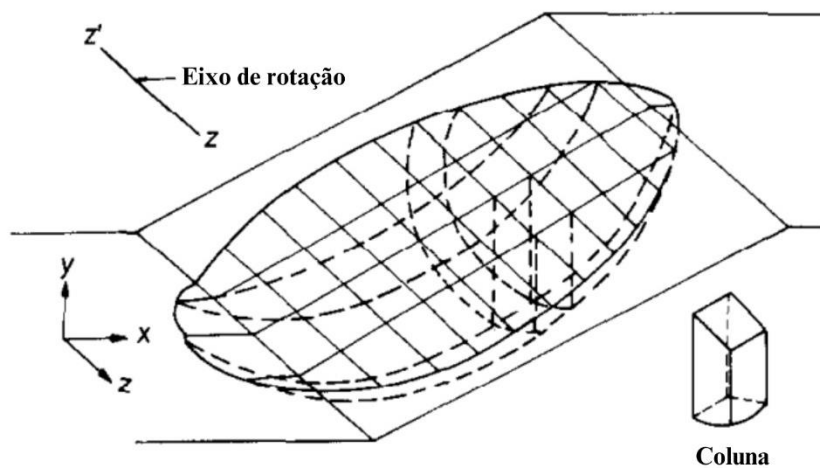
As análises bidimensionais pressupõem uma condição de estado plano de deformação e, ao serem aplicadas, assumem implicitamente uma geometria simétrica e uma largura de seção apresentada como infinita (Bretas, 2020). Uma vez que esses métodos não levam em consideração os efeitos da terceira dimensão, o que tem um impacto evidente em praticamente todos os resultados de estabilidade de taludes (Stark; Eid, 1998), foram elaboradas análises em três dimensões para corrigir essas lacunas. Como resultado, as avaliações de estabilidade são realizadas em modelos bidimensionais e também tridimensionais, sendo o método de equilíbrio-limite o mais frequentemente utilizado (Bretas, 2020).

Os métodos bidimensionais de fatias propostos por Bishop, Janbu, Spencer e Morgenstern-Price, fundamentados nos princípios de equilíbrio de forças e/ou momentos, apresentam a viabilidade de expansão para um método tridimensional de colunas. Nessa abordagem, as forças e momentos são resolvidos em duas direções ortogonais. No contexto da análise de colunas, as forças verticais desempenham um papel crucial na

determinação da tensão normal, enquanto as forças na base exercem influência na tensão de cisalhamento (Oliveira, 2020).

Chen e Chameau (1982) delinearam um modo de aplicação do método de equilíbrio limite para análise 3D. A abordagem proposta por esses autores considera a massa em situação de ruptura como simétrica, dividida em várias colunas verticais, como demonstrado na Figura 7.

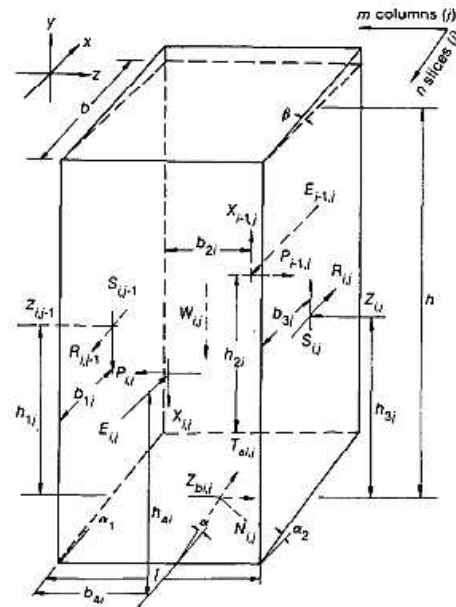
Figura 7 - Massa de ruptura tridimensional



Fonte: Chen e Chameau (1982).

A Figura 8 esboça um diagrama de corpo livre de uma coluna da massa de ruptura. As forças entre as fatias mantêm uma inclinação uniforme em todo o maciço, e as forças de cisalhamento entre as colunas são consideradas paralelas à base da coluna, variando com suas posições. As tensões cisalhantes horizontais na base, no início do processo de escorregamento, são tratadas como nulas. Os equilíbrios de forças e momentos são satisfeitos para cada coluna, bem como para a massa total.

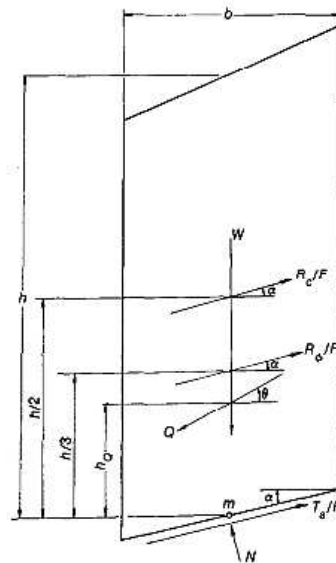
Figura 8 - Diagrama de corpo livre



Fonte: Chen e Chameau (1982).

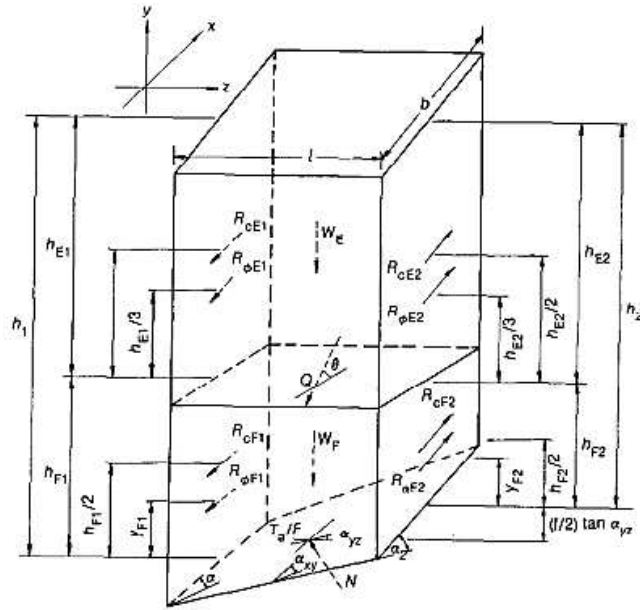
Outra suposição postulada por estes autores é que as forças entre as fatias que atuam nos lados das colunas mantêm uma inclinação uniforme ao longo de toda a massa de solo. Sob tais premissas, as incógnitas remanescentes consistem nas tensões normais horizontais nas laterais das colunas, nas forças normais atuantes na base da coluna, no fator de segurança e no ângulo de inclinação da resultante das forças entre as fatias em relação à horizontal. Na Figuras 9 e 10 é possível visualizar a vista lateral do sistema de força entre uma coluna e um diagrama de corpo livre considerando as suposições.

Figura 9 - Vista lateral do sistema de força entre uma coluna



Fonte: Chen e Chameau (1982).

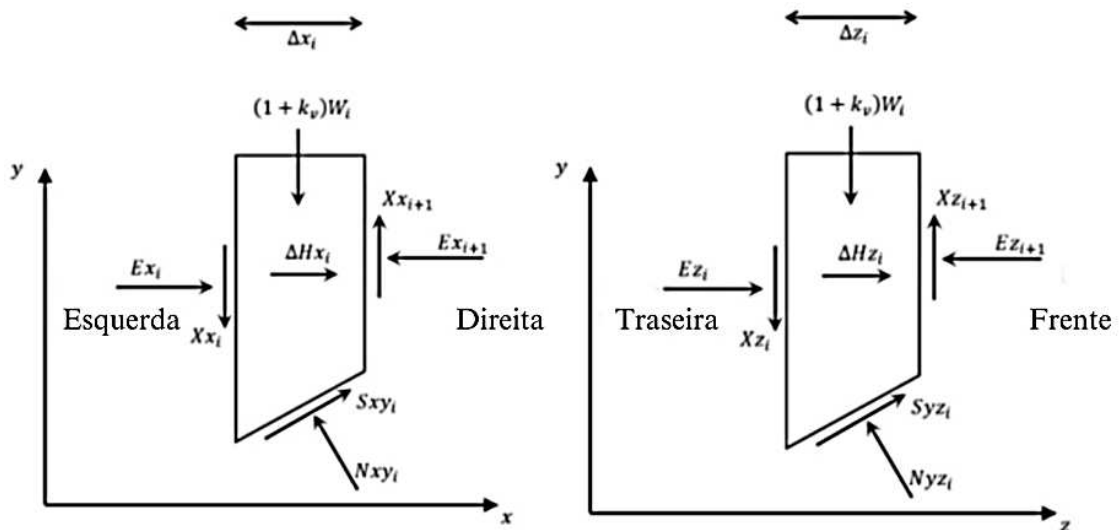
Figura 10 - Diagrama de corpo livre considerando as hipóteses



Fonte: Chen e Chameau (1982).

As formulações em 2D e 3D são, em sua essência as mesmas. É propício conceber uma análise tridimensional como duas análises bidimensionais independentes, mas mutuamente dependentes. Em uma análise 2D, o sistema de coordenadas é estabelecido como x-y, sem a atuação de forças nas partes traseira e frontal das colunas, e as forças de cisalhamento e normais são localizadas no plano x-z (ou seja, sem componentes de força z). Já em uma análise 3D, o equilíbrio é primeiramente alcançado no plano x-y, seguido pelo plano z-y, conforme ilustrado na Figura 11 (Seequent, 2023).

Figura 11 - Vistas em corte de uma coluna 3D



Fonte: Seequent (2023).

A análise de estabilidade de taludes tridimensional para situações complexas em que a geometria do talude e a superfície de deslizamento apresentam variações significativas torna-se fundamental. Nesses casos, a abordagem bidimensional pode não ser suficiente para capturar com precisão o comportamento do solo ou das estruturas envolvidas. Além disso, é importante quando as propriedades do material são heterogêneas ou anisotrópicas, o que significa que essas propriedades variam em diferentes direções. Nestas situações, a simplificação bidimensional pode levar a resultados imprecisos, já que não captura as variações nas propriedades do material em todas as direções (Chakraborty; Goswami, 2016). Stark e Eid (1998) defendem a vantagem de uma análise tridimensional em projetos de taludes com topografia, resistência ao cisalhamento ou condições de poropressão complicados.

2.7 Análise de estabilidade de taludes em aterros Sanitários

Nas análises de estabilidade de aterros sanitários, como são obras compostas por um maciço formado por solo e resíduos, deve-se considerar também a presença dos resíduos, na massa de solo. Conforme Oliveira (2002), a realização dessas análises é complexa devido à ausência de teorias, modelos e normas que reproduzam de maneira realista o comportamento dessas estruturas.

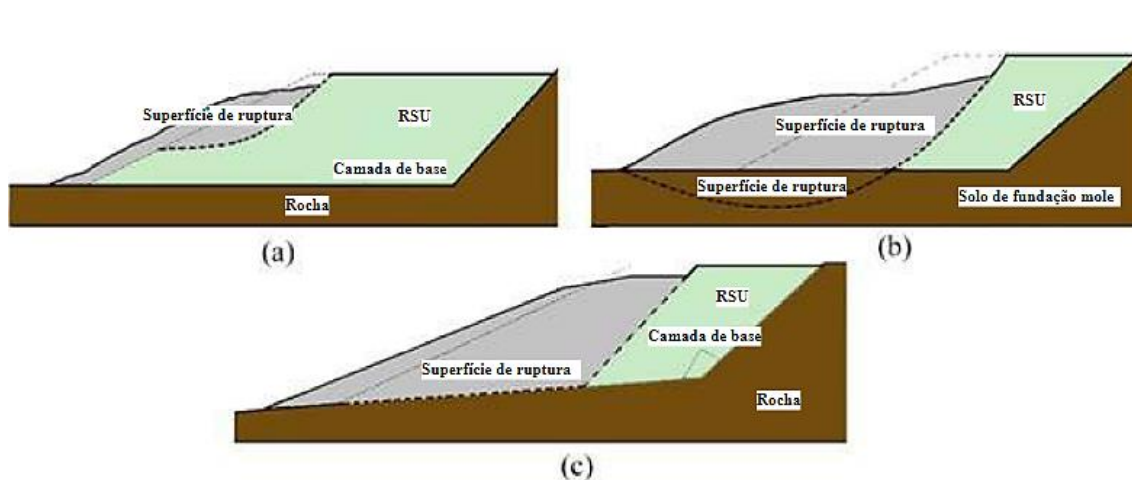
Assim, como não há métodos específicos para esse tipo de estudo, as análises de estabilidade de aterros sanitários seguem um procedimento semelhante ao aplicado em problemas geotécnicos tradicionais. No contexto dessas obras, podem ocorrer falhas no solo de base, na camada de RSU, na cobertura do aterro sanitário ou em zonas de contato (resíduo/solo; resíduo/geomembrana; geomembrana/solo) (Strauss, 1998; Abramson *et al.*, 2002). As falhas podem acontecer em diversas fases da construção e operação, incluindo a fase de aplicação da camada de cobertura, deposição dos resíduos e após o fechamento do aterro (Abramson *et al.*, 2002).

Existem três tipos principais de falhas: a circular, que ocorre dentro da massa de resíduos e é mais comum em materiais homogêneos; a por bloco, que ocorre ao longo de um plano de ruptura no interior da massa de resíduos ou na interface entre a massa de resíduos e estruturas circundantes (resíduo/solo e resíduo/geomembrana) e a de cobertura, que ocorre ao longo de interfaces frágeis entre os resíduos e camada de cobertura do aterro. Uma falha de cobertura pode ser mais provável durante a construção da camada

de cobertura e é influenciada por fatores como infiltração de água e cargas de equipamentos pesados (Abramson *et al.*, 2002).

A Figura 12 ilustra três modos comuns de ruptura de taludes no contexto de uma determinada configuração de aterro. No modo 1, a superfície de ruptura é gerada no interior da camada de resíduos, no modo 2, a superfície de ruptura passa pelo solo de fundação e no modo 3, a superfície de ruptura desenvolve-se ao decorrer da interface entre a camada de base e a camada de resíduos (Zhang *et al.*, 2020).

Figura 12 - Modos de instabilidade de talude de aterro sanitário: (a) Modo 1; (b) Modo 2; (c) Modo 3.



Fonte: Zhang *et al.*, (2020).

Segundo Strauss (1998), os principais fatores que regem a análise de estabilidade em aterros sanitários são:

1. Propriedades do solo de fundação;
2. Resistência ao cisalhamento e peso específico dos RSU;
3. Geometria do talude;
4. Nível do lixiviado e seu padrão de fluxo dentro do aterro;
5. Tipo de cobertura;
6. Resistência da cobertura à erosão.

Conforme Borgatto (2006), dentre os fatores preponderantes que exercem influência sobre a estabilidade de aterros sanitários, podem ser destacados:

- Parâmetros geotécnicos dos resíduos;
- Geometria do aterro;
- Altura e inclinação dos taludes;
- Poropressões na base do aterro;
- Sistema hidrogeológico do local do aterro;
- Interface das forças de cisalhamento entre os materiais geossintéticos;
- Interface das forças de cisalhamento entre geossintéticos e solo;
- Controle, operação e monitoramento do aterro.

2.8 Estado da arte em estabilidade de taludes de aterros sanitários

Para adentrar ao panorama do estado da arte em estabilidade de taludes de aterros sanitários foi realizado um levantamento bibliográfico com o intuito de obter uma compilação de estudos que delineiam as metodologias, abordagens e dimensões consideradas nesses estudos. O levantamento foi realizado buscando artigos científicos, teses e dissertações que apresentam análises de estabilidade de aterros sanitários. As fontes incluíram o Google Acadêmico, a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), bem como as bases de dados da *scopus* e *web of science*.

A diversidade de fontes consultadas, incluindo trabalhos científicos nacionais e internacionais contribuiu para a construção de um panorama representativo das práticas empregadas na área. O Quadro 10 apresenta uma compilação dos estudos encontrados.

Quadro 10 - Resultado do levantamento bibliográfico sobre estudos de análises de estabilidade de taludes de aterros sanitários

Aterro	Metodologia/ Abordagem/Dimensão	Software utilizado	Referência
Aterro sanitário em Curitiba Aterro sanitário em São Paulo	MEL/ Método de Bishop simplificado / Determinística / 2D	Slide 6 e <i>slope/w</i>	(Andrades, 2018)
Aterro de Caetetuba - SP	MEL / Método de Bishop Simplificado, Fellenius, Jambu Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price / Determinística / 2D	<i>slope/w</i>	(Remédio, 2014)
Aterro não controlado (Portugal)	MEL / Método de Morgenstern-Price/ Determinística / 2D	<i>slope/w</i>	(Silva, 2014)

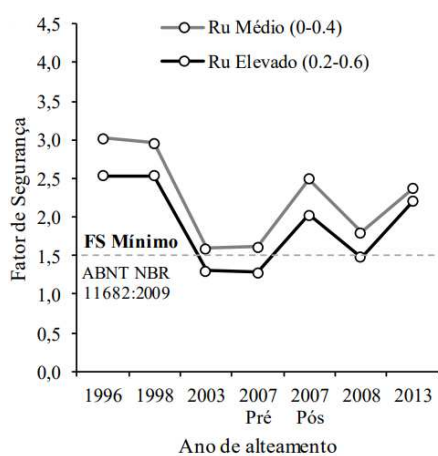
Aterro sanitário em Porto Alegre	MEL / Método de Jambu Simplificado, Bishop e Spencer/ Determinística / 2D	PCSTABL	(Strauss, 1998)
Aterro Sanitário de Rosário do Sul - RS	-	<i>slope/w</i>	(Cirolini <i>et al.</i> , 2020)
Aterro Sanitário de Bandeirantes Aterro Sanitário da Zona Norte de Porto Alegre Aterro Controlado de Canabrava Aterro Sanitário Metropolitano Centro	MEL / Método de Bishop Simplificado/ Determinística / 2D	<i>slope/w</i>	(Medeiros; Norberto; Mariano, 2020)
Aterro sanitário (Minas Gerais)	MEL / Método de Morgenstern-Price e Bishop Simplificado/ Determinística / 2D	<i>slope/w</i>	(Damasceno <i>et al.</i> , 2020)
Aterro de resíduos de Kettleman Hills	MEL/ Determinística / 2D e 3D	-	(Seed; Mitchell; Seed, 1990))
Aterro sanitário Sítio São João - SP	MEL / Método de Morgenstern-Price/ Determinística/ Probabilística/ 2D	Slide	(Daciolo, 2020)
Aterro sanitário de Rumpke Aterro sanitário de Durban	MEL / Método de Morgenstern-Price / Probabilística/ 2D	<i>slope/w</i>	(Jahanfar <i>et al.</i> , 2017)
Aterro de Suzhou - China	MEL / Método de Bishop Simplificado / Determinística/ 2D	-	Zhan, Chen e Ling (2008)
Aterro sanitário Bulbul em Durban	MEL/ Método de Bishop simplificado, Janbu, Morgenstern-Price e método de equilíbrio universal / Determinística/ 2D	<i>slope/w</i>	Lu <i>et al.</i> , (2019)
Aterro sanitário de Meethotamulla	MEL / Método de Morgenstern-Price / Probabilística / 2D	-	(Basha; Raviteja, 2018)

O uso expressivo do Método de Bishop Simplificado e do Método de Morgenstern-Price indica uma preferência por métodos consagrados e rigorosos. A escolha pela abordagem determinística e, em alguns casos, probabilística, evidencia a preocupação com a incerteza relacionada a obtenção de parâmetros geotécnicos.

A variedade de *softwares* utilizados, como *slope/w*, Slide, e PCSTABL, reflete a disponibilidade de potenciais ferramentas. A predominância de análises bidimensionais é notável, seguindo uma tradição consolidada na literatura técnica. No entanto, para o Aterro de Resíduos de Kettleman Hills, os autores incorporaram análises tridimensionais, indicando uma consideração de modelos mais complexos e representativos da realidade. De modo geral, a falta de análises tridimensionais nas pesquisas examinadas sugere uma lacuna para realização de pesquisas que exploram a influência da terceira dimensão na estabilidade de taludes de aterros sanitários.

Dentre os resultados obtidos pelos estudos, Daciolo (2020) e Jahanfar *et al.*, (2017), abordaram os fatores responsáveis por causar variações no fator de segurança, como o alteamento da Célula, parâmetros de resistência ao cisalhamento e de poropressão. Na Figura 13 é apresentada uma relação entre o fator de segurança, o ano de alteamento e o parâmetro de poropressão (Ru), permitindo a compreensão das variações do fator de segurança ao longo do processo de alteamento e o do comportamento da poropressão no aterro sanitário Sítio São João - SP.

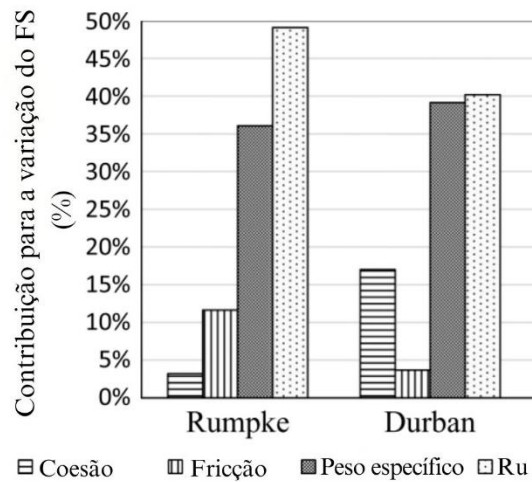
Figura 13 - Resultados do fator de segurança para análise determinística do aterro Sítio São João



Fonte: Daciolo (2020).

A Figura 14 ilustra a contribuição da coesão, do ângulo de atrito e do peso específico para as oscilações do fator de segurança nos dois casos analisados pelos autores. O fator de segurança do aterro de Rumpke exibiu variações mais significativas, atribuídas à influência da poropressão existente no interior do maciço. Já o fator de segurança obtido para o aterro de Durban, além de ser afetado pela poropressão, também demonstrou ser mais sensível ao peso específico dos materiais considerados nas análises.

Figura 14 - Contribuição de diferentes parâmetros para a variação do fator de segurança dos casos em estudo



Fonte: Adaptado de Jahanfar *et al.*, (2007).

Fatores estes que os projetistas e as empresas responsáveis pela operação dos aterros devem considerar durante as etapas de concepção, funcionamento e encerramento dessas obras geotécnicas, atentando-se as peculiaridades e finalidades, a exemplo das características e composições dos resíduos dispostos ao longo da operação.

Nessa perspectiva, realizar análises de sensibilidade, mediante a alteração individual de parâmetros como coesão, ângulo de atrito e peso específico, relacionando o fator de segurança com o valor de cada parâmetro, representa uma abordagem eficaz para avaliar o efeito das propriedades geotécnicas dos materiais que compõem o maciço sanitário na estabilidade da estrutura.

2.9 Rupturas de Taludes de Aterros Sanitários

Diversas rupturas já ocorreram em aterros sanitários, resultando em deslocamentos significativos por longas distâncias e velocidades e danos às vidas, e ao patrimônio dos habitantes de áreas próximas a essas construções, além de impactos ambientais substanciais (Araújo Neto, 2021). Assim, as rupturas de taludes de aterros sanitários que aconteceram na última década trazem à tona a necessidade de melhorar as análises de estabilidade desses empreendimentos (Datta; Sivakumar Babu, 2016).

A Tabela 7 traz informações acerca de acidentes envolvendo rupturas de aterros sanitários ocorridas no Brasil e a Tabela 8, acidentes envolvendo rupturas de aterros

sanitários ocorridas no mundo. Ambas trazem, ainda, dados sobre o volume deslizado, altura do aterro e distância percorrida por este volume, para alguns aterros.

Tabela 5 - Acidentes envolvendo rupturas de aterros sanitários ocorridas no Brasil

Ano	Aterro	Volume deslizado (m ³)	Altura do aterro (m)	Distância percorrida (m)
1991	Bandeirantes (SP)	65.000	120	250
1992	Itapecerica da Serra (SP)	8.000	-	-
1995	Mauá (SP)	100.000	-	-
2000	Itaquaquecetuba (SP)	1.000.000	-	-
2004	Juiz de Fora (MG)	70.000	-	-
2004	Guaryjá (SP)	40.000	-	-
2006	Itapecerica da Serra (SP)	15.000	-	-
2007	Sítio São João (SP)	220.000	120	120
2011	Itaquaquecetuba (SP)	300.000	-	-

Fonte: Adaptado de Kölsch e Ziehmann, (2004); Benvenuto (2007); Blight (2008).

Tabela 6 - Acidentes envolvendo rupturas de aterros sanitários ocorridas no mundo

Ano	Aterro	Volume deslizado (m ³)	Altura do aterro (m)	Distância percorrida (m)
1993	Istambul (Turquia)	12 a 15.000	40	60
1996	La Coruña (Espanha)	1.400.000	-	-
1996	Rumpke (EUA)	1.200.000	75	360
1997	Dona Juana (Colômbia)	1.500.000	65	150
1997	Saravejo (Iugoslávia)	200.000	50	1000
1997	Durban (África do Sul)	150 a 180.000	45	80
2000	Payatas (Filipinas)	16.000	25	40
2001	Navarro (Colômbia)	250.000	-	-
2005	Leuwigaiah (Indonésia)	2.700.000	70	900

Fonte: Adaptado de Kölsch e Ziehmann, (2004); Benvenuto (2007); Blight (2008).

Há desafios ao relacionar os volumes deslizados com a distância percorrida pelos escorregamentos. A obtenção dessas correlações é dificultada pelas particularidades de

cada aterro, a exemplo da topografia, tipo de solo, tipo de resíduos dispostos, e diferenças na operação do aterro, como a compactação, o sistema de drenagem, tipos de cobertura final, entre outros fatores (Batista, 2010).

Zhang *et al.*, (2020) analisaram 62 casos de rupturas de aterros sanitários de 22 países diferentes. Desses, 38 casos foram relatados na literatura técnica, conforme apresentado no Quadro 11. Os autores buscaram determinar os fatores que contribuíram para a ocorrência das falhas. Com base na localização da superfície de ruptura, categorizou-se a instabilidade de taludes em aterros nos três modos, já apresentados na Figura 12.

Quadro 11 - Casos de falhas em aterros de resíduos sólidos urbanos relatados na literatura técnica

Aterro	Referência	Localização	Ano	Causa da falha	Modo de instabilidade
Aterro sanitário de Sarajevo	Blight, 2008	Antiga Iugoslávia	1977	Chuva	Modo 1
Aterro sanitário global	Chang, 2005	EUA	1984	Fundação não suportou o carregamento	Modo 2
Aterro sanitário de Kettleman	Byrne <i>et al.</i> , 1992 ; Chang, 2005	EUA	1988	Falha no sistema de revestimento	Modo 3
Aterro sanitário de Maine	Koerner e Soong, 2000	EUA	1989	Alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro Bandeirantes	Bauer <i>et al.</i> , 2008	Brasil	1991	Chuva	Modo 1
Aterro sanitário Radiowo	Koda e Paprocki, 1995	Polônia	1991	Compactação incompleta	Modo 1
Aterro sanitário de Skellingsted	Kjeldsen e Fischer, 1995	Polônia	1991	Liberação de gases de aterro	Modo 1
Aterro sanitário de Belo Horizonte	Lavigne <i>et al.</i> , 2014	Dinamarca	1992	Chuva	Modo 1
Aterro sanitário de Gnojna Gora	Bouazza e Wojnarowicz, 2000	Polônia	1993	Compactação incompleta	Modo 1
Aterro sanitário de Gembloux	Lavigne <i>et al.</i> , 2014	Polônia	1993	Liberação de gases de aterro	Modo 1
Aterro Ümraniye – Hekimbashi	Kocasoy e Curi, 1995	Turquia	1993	Chuva	Modo 1
Aterro OII	Matasovic <i>et al.</i> , 1994	EUA	1994	Terremoto	Modo 1

Aterro sanitário de Xianrenjiao	Cheng, 1996	China	1994	Compactação incompleta e alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro sanitário de Yangjiaoshan	Cheng, 1996	China	1994	Compactação incompleta e alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro sanitário de Guanshan	Cheng, 1996	China	1994	Compactação incompleta e Liberação de gás	Modo 1
Aterro sanitário de Beirolas	Rowe, 1999	EUA	1995	Fundação não suportou o carregamento	Modo 2
Aterro sanitário de Mahoning	Jahanfar <i>et al.</i> , 2017	EUA	1996	Baixa resistência da geomembrana	Modo 3
Aterro Rumpke	Eid <i>et al.</i> , 2000	EUA	1996	Fundação não suportou o carregamento	Modo 2
Aterro sanitário Bens Coruña	Landva e Dickinson, 2000	Espanha	1996	Alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro Dona Juana	Caicedo <i>et al.</i> , 2002	Colômbia	1997	Altos níveis de poropressão	Modo 1
Aterro sanitário de Bulbul drive	(Blight, 2004)	África do Sul	1997	Alto nível de água lixiviada	Modo 3
Aterro sanitário de Hiriya	(Huvaj-Sarihan and Stark, 2008)	Israel	1997	Compactação incompleta e alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro sanitário de Payatas	(Merry <i>et al.</i> , 2005)	Filipinas	2000	Chuvas e baixa resistência da fundação	Modo 2
Aterro sanitário de Xiaping	(Hu, 2002)	China	2001	Chuvas e baixa resistência da fundação	Modo 2
Aterro sanitário de Ano Liossia	(Landva and Dickinson, 2000)	Grécia	2003	alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro de Cruz das Almas	(Gharabaghi <i>et al.</i> , 2008)	Brasil	2005	Compactação incompleta	Modo 1
Aterro sanitário de Leuwigajah	(Lavigne <i>et al.</i> , 2014)	Indonésia	2005	Chuvas e liberações rápidas de gás	Modo 1
Aterro sanitário de Datong	(Su and Zhao, 2008)	China	2005	Baixa resistência da fundação	Modo 2
Aterro sanitário de Bantar Gebang	(Lavigne <i>et al.</i> , 2014)	Indonésia	2006	Alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro sanitário de La Torre	(Merri <i>et al.</i> , 2009)	Itália	2006	Alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro de São João	(De Oliveira <i>et al.</i> , 2015)	Brasil	2007	Alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro de Galuga	(Lavigne <i>et al.</i> , 2014)	Indonésia	2010	Compactação incompleta	Modo 1
Aterro sanitário de Xerolakka	(Athanasopoulos <i>et al.</i> , 2013)	Grécia	2010	Compactação incompleta, alto nível de água lixiviada	Modo 1

Aterro de Jiangcungou	(Yang <i>et al.</i> , 2014)	China	2011	Alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro de Cianjur	(Lavigne <i>et al.</i> , 2014)	Indonésia	2013	Alto nível de água lixiviada	Modo 1
Aterro de Koshe	(Raviteja and MunwarBasha, 2017)	Etiópia	2017	Chuva	Modo 1
Aterro sanitário de Meethotamulla	(National Building Research Organisation, 2017)	Sri Lanka	2017	Compactação incompleta e baixa resistência da fundação	Modo 2

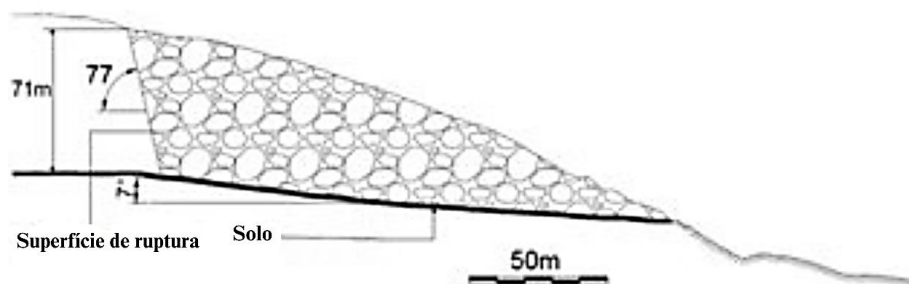
Fonte: Zhang *et al.*, (2020).

Analisando todos os casos, foi constatado como modo de ruptura mais frequente, o modo 1, representando 69,4% dos casos. Enquanto o segundo e o terceiro modo representam, 19,32% e 11,28%, respectivamente. Os autores destacaram ainda as principais causas da instabilidade nos maciços, sendo estas: a presença de altos níveis de lixiviados, compactação dos resíduos inadequada, fundação com capacidade de suporte insuficiente, baixa resistência ao cisalhamento na interface camada de base/RSU, e a liberação rápida de gases seguida de combustão (Zhang *et al.*, 2020).

2.9.1 Casos de rupturas de taludes de aterros sanitários

Aterro de Rumpke: O aterro de Rumpke é um dos maiores aterros dos EUA e recebia resíduos com a maior parte sendo composta por material fibroso (frações de materiais fibrosos > 50%). Em março de 1996, ocorreu nesse aterro, a maior ruptura em aterros sanitários já ocorrida nos EUA a qual houve o deslizamento de aproximadamente 1,2 milhão de m³ de resíduos após uma escavação adicional de 45 m na frente da base do aterro. O local estava sobrecarregado em 13-15 metros na época. A falha ocorreu devido a cortes nos resíduos e no solo nativo marrom saturado subjacente aos resíduos (Eid *et al.*, 2000). Na Figura 15 é possível visualizar a geometria da secção transversal do aterro antes da ruptura e na Figura 16 a superfície de ruptura.

Figura 15 - Geometria da secção transversal do aterro de Rumpke antes da ruptura



Fonte: Jahanfar *et al.*, (2017).

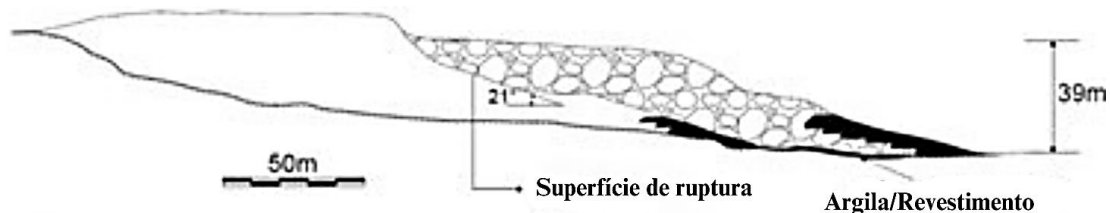
Figura 16 - Superfície de ruptura do aterro de Rumpke



Fonte: Eid *et al.*, (2000).

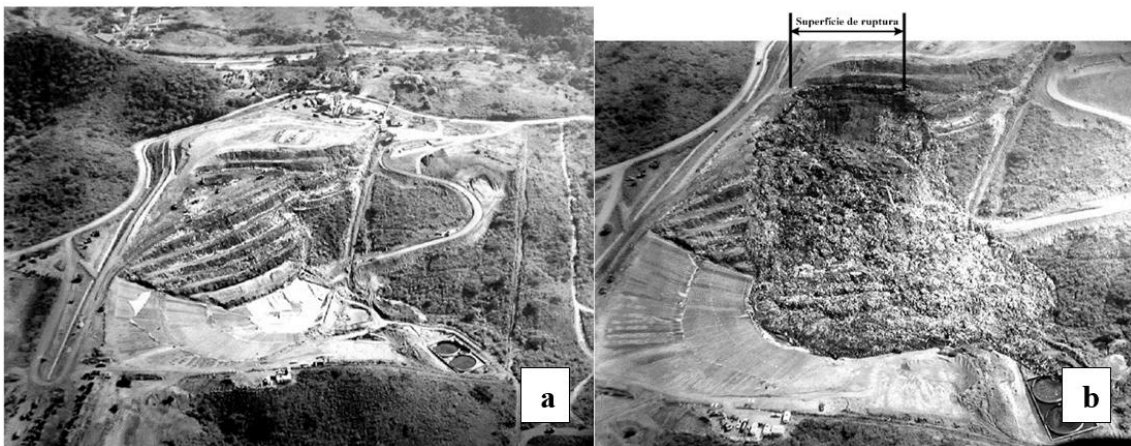
Aterro de Durban: esse aterro sanitário foi projetado para receber disposição simultânea de resíduos líquidos e secos. Nesse aterro a maioria dos resíduos dispostos era composta por materiais não fibrosos (resíduos alimentares). Em 1997 ocorreu uma ruptura e os resíduos invadiram uma área destinada para uma nova fase do aterro (Jahanfa *et al.*, 2017), conforme é possível visualizar na Figura 6b. A ruptura classificada como translacional ocorreu subitamente. A ausência de sistemas de drenagem no projeto foi um fator que contribuiu para o acidente, permitindo o acúmulo de líquidos no corpo de resíduos e, conseqüentemente, gerando poropressão (Blight, 2008). Essa ruptura não causou danos ao meio ambiente, pois o fluxo ficou confinado ao local. A Figura 17 apresenta a geometria da seção transversal do aterro antes de haver a ruptura e a Figura 18 o aterro antes e depois da ruptura.

Figura 17 - Geometria da seção transversal do aterro de Durban antes da ruptura



Fonte: Jahanfar *et al.*, (2017).

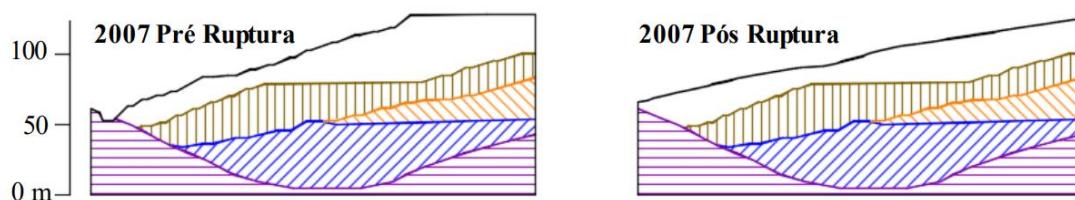
Figura 18 - Aterro de Durban (a) antes e (b) depois da ruptura



Fonte: Blight (2008).

Aterro Sítio São João: esse aterro Sítio São João localizado na zona metropolitana de São Paulo foi operado entre 1991 e 2009. Porém, em 2007 ocorreu uma ruptura rotacional no maciço sanitário deslocando aproximadamente 220.000 metros cúbicos de material (Batista, 2010). Um fator agravante para a estabilidade que pode ter contribuído para a ruptura do aterro foi o aumento dos níveis de poropressão e sua distribuição desigual no maciço sanitário (Oliveira *et al.*, 2015). A Figura 19 ilustra seções do aterro antes e depois de haver a ruptura e a 20 Figura a superfície de ruptura.

Figura 19 - Seções esquemáticas do aterro Sítio São João antes e depois da ruptura



Fonte: Daciolo (2020).

Figura 20 - Superfície de ruptura do aterro Sítio São João

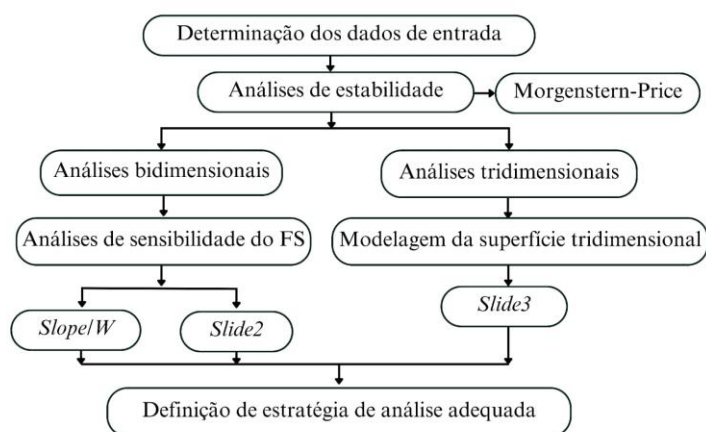


Fonte: Batista (2010).

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as etapas para a realização das análises de estabilidade bidimensionais, de sensibilidade e estabilidade tridimensional. Esse estudo iniciou-se com a coleta dos dados de entrada, determinação dos métodos utilizados nas análises de estabilidade e os *softwares* para as simulações numéricas. A Figura 21 apresenta o fluxograma das etapas que compõem a metodologia.

Figura 21 - Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa



3.1 Caracterização da área de estudo

O Aterro Sanitário objeto desse estudo está localizado no semiárido paraibano, o qual encontrasse ilustrado na Figura 22. Conforme os dados da AESA (2022), a região apresenta um clima semiárido, com uma temperatura média anual máxima de 28,6 °C e mínima de 19,5 °C, resultando em uma média de 22,7°C. A evaporação anual é estimada em 1417,4 mm, enquanto a precipitação média anual atinge 802,7 mm por ano.

Figura 22 – Aterro Sanitário objeto de estudo



Fonte: Adaptado do Google Earth Pro (2020)

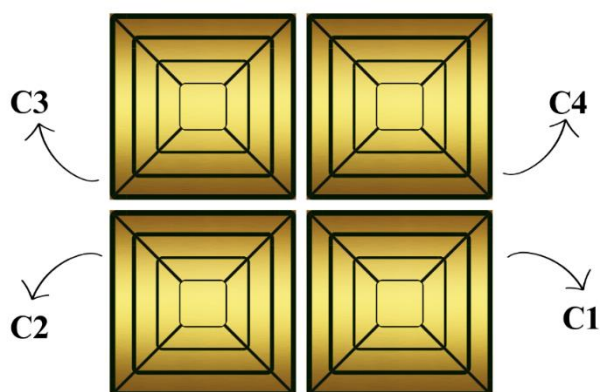
Esse trabalho é uma continuação da tese de doutorado de Araújo Neto (2021) em que análises de estabilidade foram iniciadas pelo autor. De tal modo, a geometria utilizada nas análises de estabilidade propostas por esse trabalho é referente à configuração em que a Célula do aterro apresentou ao terminar a operação em fevereiro de 2020.

Desde 2016, o Aterro vem sendo objeto de estudos desenvolvidos pelo Grupo de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande (GGA - UFCG). Isso acontece por meio de um acordo de parceria firmado entre a UFCG e a empresa responsável pela gestão do aterro, com a interveniência da Fundação Parque Tecnológico da Paraíba (PaqTcPB), a qual atua como mediadora nessa parceria.

Esse Aterro Sanitário, abrange 64 hectares, sendo 40 destinados à disposição de RSU. Com relação a configuração no período considerado por este estudo, a camada de base do aterro é composta por uma mistura de solo e bentonita compactada numa de 4:1. Ao final do processo operacional de cada camada de RSU, estes são cobertos por uma camada de solo similar a utilizado na base, variando de 60 a 80 centímetros, porém sem a inclusão de bentonita.

Do início da operação do Aterro Sanitário até o período abordado nesse estudo, foram implantadas 4 Células distintas identificadas como C1, C2, C3 e C4, conforme ilustrado na Figura 23. Estas Células, ao atingirem sua capacidade operacional, passavam por um processo de união por meio da disposição de resíduos entre elas, com o objetivo de integrá-las em um único maciço, conforme ilustrado na Figura 24.

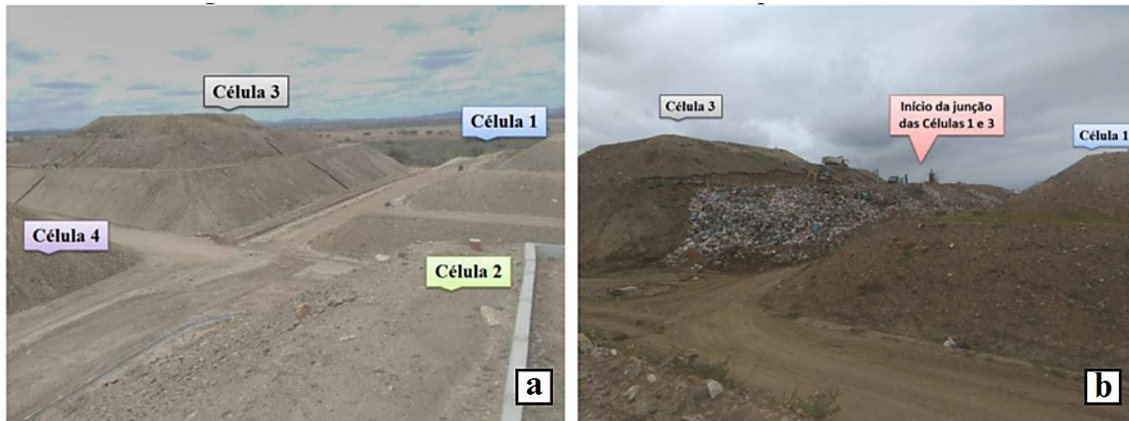
Figura 23 - Configuração das Células do aterro C1, C2, C3 e C4



O processo de integração das Células do Aterro Sanitário foi conduzido progressivamente. Inicialmente, as quatro Células apresentavam a configuração

apresentada na Figura 24 (a). Posteriormente, o processo de união foi iniciado utilizando resíduos e solo, como demonstrado na Figura 24 (b), em que a disposição estratégica de resíduos entre as Células permitiu sua integração gradual.

Figura 24 - Células do aterro sanitário (a) antes do início do processo de união (b) após início do processo de união



Fonte: Guedes (2018)

A finalização do processo de união das Células C1, C2, C3 e C4 resultou na formação de uma única Célula com dimensões consolidadas de 225 x 225 metros, como ilustrado na Figura 25. Esta Célula integrada é caracterizada pela presença de camadas de resíduos provenientes das Células individuais com diferentes idades de aterramento, proporcionando uma configuração heterogênea e complexa ao maciço sanitário.

Figura 25 - Célula do aterro após junção das C1, C2, C3 e C4



Fonte: (GGA, 2020)

Neste período o Aterro apresentou variação na espessura da camada de cobertura de 0,6 a 1,0 m de solo compactado (Araújo Neto, 2017; Souza; 2021). Por esse motivo, foi adotada uma espessura média de 0,8 m para essa camada. Quanto à camada de base do Aterro, foi constatada uma espessura média de 0,6 m de solo compactado (SILVA, 2017). Por meio de investigação do subsolo utilizando sondagem à percussão (SPT) foram observadas profundidades entre 0,4 e 0,8 m de solo, para as análises de estabilidade considerou-se uma espessura média de 0,6 m para a camada deste material.

O maciço sanitário era constituído por camadas de resíduos com distintos tempos de aterramento: 0 ano (recém aterrados), 1 ano e 2 anos. A determinação das espessuras dessas camadas foi baseada em acompanhamento da operação do Aterro, combinado com levantamentos topográficos. Essa abordagem garante a representatividade dos modelos gerados.

3.2 Análises de estabilidade

3.2.1 Dados de entrada

Os dados de entrada necessários aos estudos de estabilidade são os parâmetros geotécnicos e o nível piezométrico de líquidos presente no interior do maciço. Nesse estudo, os parâmetros geotécnicos (ângulo de atrito, coesão e peso específico) dos RSU e dos solos, além do nível piezométrico de líquidos foram obtidos por estudos realizados por Araújo Neto (2021).

Os parâmetros dos RSU considerados nas análises de estabilidade foram determinados em laboratório por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento na condição drenada e não drenada e associados a aplicação de Redes Neurais Artificiais desenvolvidas por Araújo Neto (2021). Devido a não existir normativas para ensaios de cisalhamento direto em RSU, a metodologia utilizada foi a apresentada para ensaios geotécnicos em solos que considera o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e na D3080 (ASTM, 2011).

Para análises de estabilidade de taludes de aterros sanitários, além dos aspectos mecânicos dos resíduos sólidos urbanos deve-se considerar a capacidade de suporte do solo subjacente, que recebe a carga do aterro sanitário e do solo utilizado na camada de cobertura do maciço. Araújo Neto (2021) obteve os parâmetros geotécnicos dos solos da

área do Aterro, do subsolo local do Aterro, da camada de base e de cobertura por meio de ensaios em campo e laboratório seguindo o que preconiza as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da American Society for Testing and Materials (ASTM). Para o peso específico foram realizados ensaios de laboratório e campo e quanto aos parâmetros de resistência ao cisalhamento, o ensaio drenado e não drenado da D3080/D3080M (ASTM, 2011).

As análises de estabilidade do aterro foram realizadas considerando dois cenários quanto a situação a qual se encontra o nível piezométrico de líquidos no interior do maciço sanitário. Sendo estes:

- Cenário 1 (condição não saturada): Sem a presença de nível piezométrico de líquidos no interior do maciço (Cenário referente a condição mais favorável à estabilidade global do maciço);
- Cenário 2 (condição saturada): Com a presença de 17 metros de nível piezométrico de líquidos no interior do maciço, sendo o maior nível constatado durante o monitoramento do aterro (Cenário referente a condição mais desfavorável à estabilidade global do maciço).

Na Tabela 9 são apresentados os parâmetros geotécnicos dos RSU e dos solos referentes aos dois cenários considerados.

Tabela 7 - Parâmetros geotécnicos para os dois cenários considerados

Material	Peso Específico (KN/m ³)	Coesão (kPa)		Ângulo de Atrito (°)	
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2
		1	2	1	2
Resíduo recém-aterrados	10	1,4	5,2	28,3	21,6
Resíduos com 1 ano	15	41	52,7	35,6	27
Resíduos com 2 anos	15	41,6	28,4	31,9	29,7
Camada de cobertura	14,5	7,8		31	
Camada de base	18,8	1,7		26	
Subsolo	14,5	7,8		31	
Rocha	26	-		-	

Fonte: Adaptado de Araújo Neto (2021)

Os dados dos níveis piezométricos de líquidos foram obtidos por meio de monitoramento dos piezômetros instalados na Célula do aterro com o auxílio de um

sensor eletrônico de nível piezométrico. O sensor de nível era inserido no piezômetro e ao registrar a presença de lixiviado emitia um sinal sonoro e luminoso. Com o auxílio de uma escala, era medido a distância entre o sensor e o limite marcado no fio do equipamento, determinando, portanto, o nível de lixiviado. O nível piezométrico de líquidos foi obtido subtraindo a altura do piezômetro pela altura do nível do lixiviado em relação a extremidade superior do piezômetro. O valor considerado para esta pesquisa foi o mais crítico detectado durante todo o monitoramento do aterro que foi de 17 metros.

3.2.2 Métodos utilizados nas análises de estabilidade

Quanto a abordagem escolhida relacionada a consideração dos dados de entradas dos parâmetros geotécnicos dos materiais componentes do maciço sanitário, utilizou-se análises de estabilidade de taludes determinísticas. As análises de estabilidade de taludes determinísticas são conduzidas considerando o fator de segurança, que é determinado pela relação entre as tensões cisalhantes atuantes e a resistência ao cisalhamento (GERSCOVICH, 2016). Recentemente, os modelos mais prevalentes para avaliação de estabilidade de taludes têm sido os modelos determinísticos, como os de Bishop, Spencer, Morgenstern-Price e Janbu, os quais desfrutam de ampla aceitação na comunidade técnico-científica.

A escolha para o método de análise de estabilidade dos taludes do Aterro Sanitário deste trabalho foi o método de equilíbrio limite, uma vez que, esse método é reconhecido como a técnica tradicional e predominante na avaliação da estabilidade de taludes convencionais em solos (Qi *et al.*, 2021). Seed; Mitchell; Seed (1990), Strauss (1998), Zhan, Chen e Ling (2008), Remédio (2014), Silva (2014), Jahanfar *et al.*, (2017), Basha; Raviteja (2018), Andrades (2018), Lu *et al.*, (2019), Daciolo (2020), Damasceno *et al.*, (2020), Medeiros; Norberto; Mariano (2020) também realizaram análises de estabilidades empregando o método do equilíbrio limite.

Assim, os dados relacionados aos parâmetros geotécnicos disponíveis poderiam ser empregados em análises de estabilidade conduzidas por esse método, ao contrário de abordagens mais complexas, como o Método dos Elementos Finitos, que requer parâmetros de entrada derivados de ensaios de compressão triaxial.

Dentro deste método, foi selecionado o método de Morgenstern-Price, os outros métodos não foram considerados devido a este satisfazer todas as condições de equilíbrio estático e ser amplamente utilizado na prática profissional (Bretas, 2020). Reunindo assim todos os requisitos necessários para obter resultados acurados. Além de que, este

considera a interação entre as fatias, proporcionando uma representação mais precisa do comportamento do maciço (Rahardjo & Fredlund, 1984).

Nos métodos mais avançados, como o de Morgenstern-Price, é exigido um processo iterativo de cálculo, por meio de tentativa e erro, para garantir o equilíbrio de momento e força em cada fatia, o que torna inviável a realização de cálculos manuais (Abramson *et al.*, 2002). Assim, uma gama de programas computacionais foi desenvolvida para análise de estabilidade de taludes, capazes de lidar com diversas geometrias, resistências ao cisalhamento, poropressões e cargas externas, além de identificarem automaticamente a superfície de deslizamento mais crítica com o menor fator de segurança (Duncan & Wright, 2005).

3.2.3 Softwares utilizados

Os programas computacionais voltados a estudos de estabilidade oferecem uma variedade de análises determinísticas baseadas em métodos consagrados, como de Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price.

Os *Softwares* utilizados nesse trabalho foram determinados por meio de pesquisa bibliográfica. Durante essa etapa, ao consultar os estudos sobre análises de estabilidade de taludes de aterros sanitários, constatou-se que vários autores têm explorado o potencial dos *softwares slope/w* da Geostudio e o Slide da Rocscience, investigando a estabilidade de diferentes aterros sanitários em diversas regiões. Daciolo (2020) utilizou o Slide, enquanto Andrades (2018) empregou tanto o Slide quanto o *slope/w*.

Além disso, Remédio (2014), Silva (2014), Medeiros, Norberto e Mariano (2020), Damasceno *et al.*, (2020), Cirolini *et al.*, (2020), Jahanfar *et al.*, (2017), e Lu *et al.*, (2019) realizaram suas análises por meio do *slope/w*. Esses estudos não só destacam a eficácia dessas ferramentas, mas também evidenciam sua relevância no campo da investigação geotécnica desses tipos de empreendimentos.

O *software slope/w* da Geostudio mostrou-se como uma ferramenta amplamente utilizada devido a sua versatilidade na modelagem de materiais com geometrias complexas, levando em consideração múltiplas superfícies de deslizamento e a poropressão e com a capacidade de calcular o fator de segurança por meio de diversas metodologias baseadas em análises de equilíbrio limite.

Reconhecido por sua praticidade e disponibilidade de versões gratuitas para estudantes, o *slope/w* é eficaz na resolução de diversos problemas, incluindo estabilidade de taludes, encostas naturais de terra e rocha, aterros, entre outros. Nele, a definição da superfície de pesquisa é realizada manualmente dentro do *software*, oferecendo flexibilidade ao usuário. Nesse trabalho, o critério de buscas da superfície de ruptura adotado no *slope/w* foi o de determinação das entradas e saídas, assim, para cada seção foram delimitadas as entradas e saídas consideradas mais críticas.

Além do *slope/w*, o *slide2* e 3 da *rocscience* também foram utilizados para realizar as análises de estabilidade, sendo estes amplamente reconhecidos no campo técnico e científico da geotecnia (Jahanfar *et al.*, 2017). O *slide2* é um programa de estabilidade de taludes 2D utilizado para avaliar o fator de segurança ou a probabilidade de falha de superfícies de falha circulares ou não circulares em taludes de solo ou rocha (Rocscience, 2024a).

Já o *slide3* é um *software* de estabilidade de taludes de equilíbrio limite 3D, destinado a analisar o fator de segurança de superfícies de falha tridimensionais em taludes de solo ou rocha. Este programa computacional permite a análise da estabilidade de superfícies de deslizamento tridimensionais utilizando métodos de equilíbrio de limite de coluna vertical (Rocscience, 2024b).

Nesse estudo, o *slide3* viabilizou a realização das análises em três dimensões, superando as limitações computacionais de outros *softwares* ao importar arquivos de representação tridimensional, os quais exigem expressiva capacidade de processamento computacional. Assim, foi possível importar o modelo tridimensional da área em estudo e realizar as simulações numéricas.

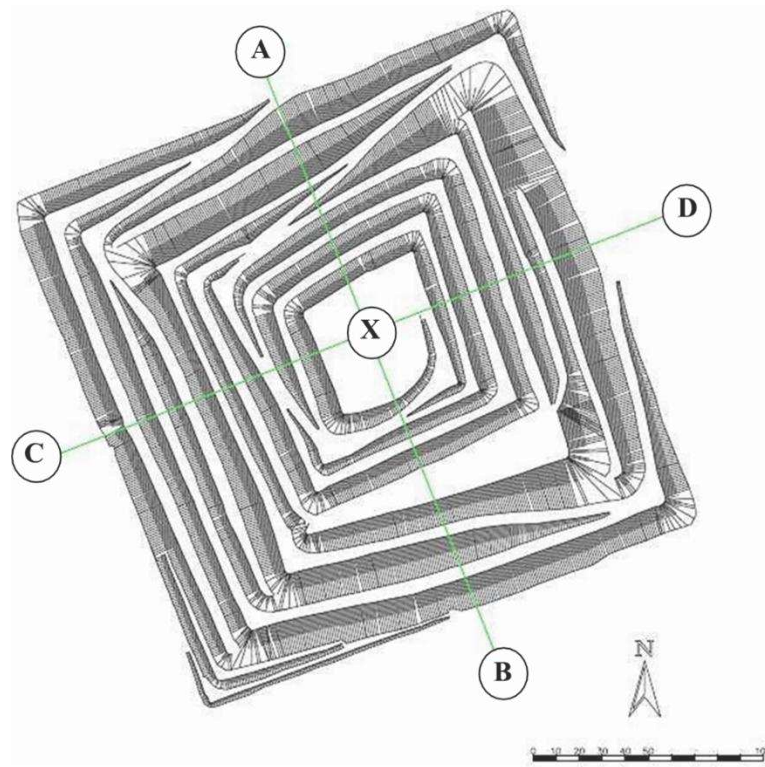
Em ambos os *softwares*, a definição das superfícies de pesquisa adotada foi a busca automatizada, considerando a região com maior risco de ruptura com base nos dados de projeto inseridos, enquanto o cálculo do fator de segurança foi realizado por meio de metodologias embasadas em análises de equilíbrio limite.

3.2.4 Análises bidimensionais

Conforme destaca Araújo Neto (2021), para determinar as seções críticas utilizadas nas análises bidimensionais, foram modeladas as seções com as cotas topográficas mais elevadas. Essa abordagem foi adotada para que as seções

representassem o cenário mais desfavorável. Na Figura 26 é apresentada a geometria e as seções utilizadas nas análises de estabilidade.

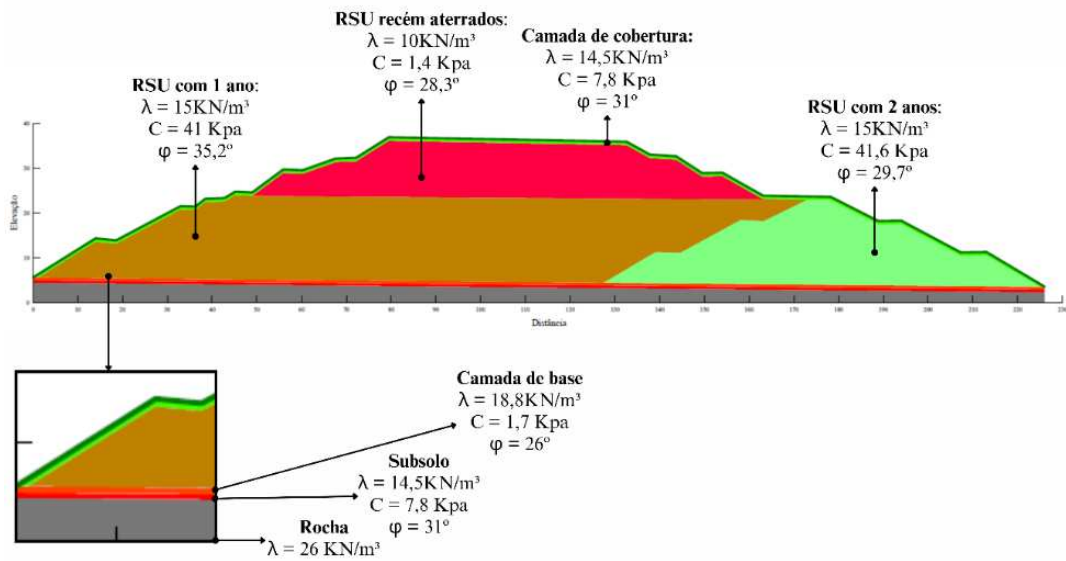
Figura 26 - Geometria utilizada nas análises de estabilidade



Fonte: Araújo Neto (2021)

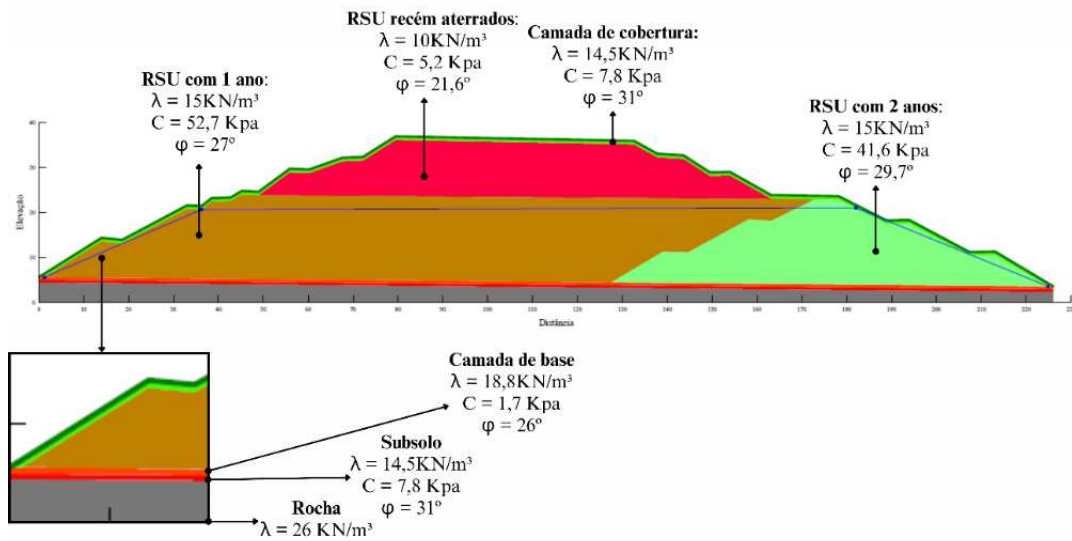
Na Figura 27, é apresentado o perfil da seção transversal do Corte AB para o Cenário 1 e na Figura 28 para o Cenário 2, enquanto a Figura 28 é apresentado o perfil da seção transversal do Corte CD para o Cenário 1 e na Figura 30 para o Cenário 2. Esses perfis foram modelados utilizando as informações da geometria do aterro e da composição das camadas, apresentando os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, do solo e da camada impenetrável para os dois cenários analisados. Isso garante a representatividade das características geométricas das seções críticas consideradas nas análises de estabilidade.

Figura 27- Perfil do corte AB – Cenário 1



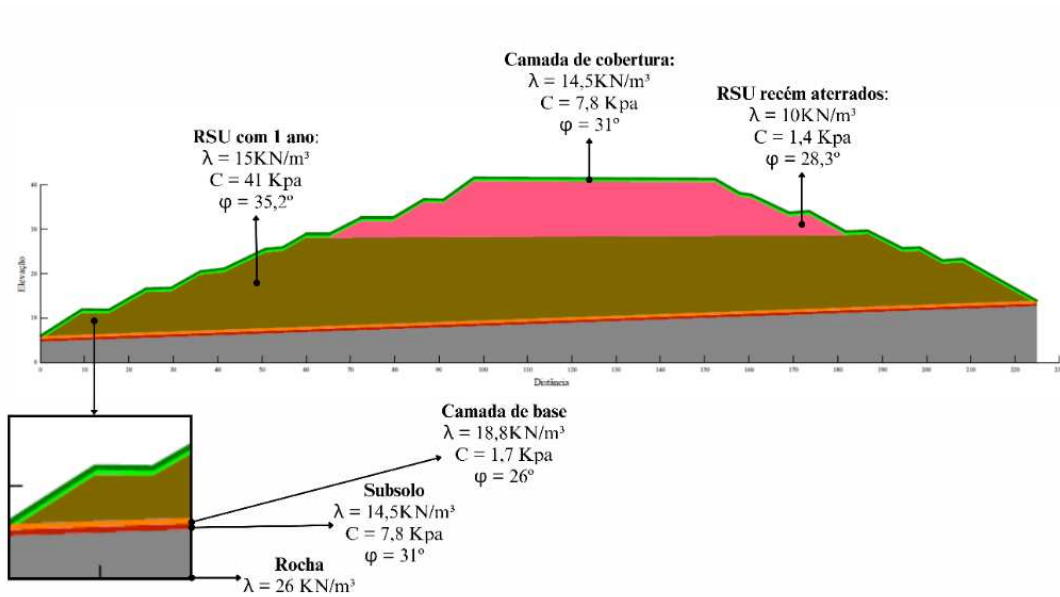
Fonte: Araújo Neto (2021)

Figura 28 - Perfil do corte AB – Cenário 2



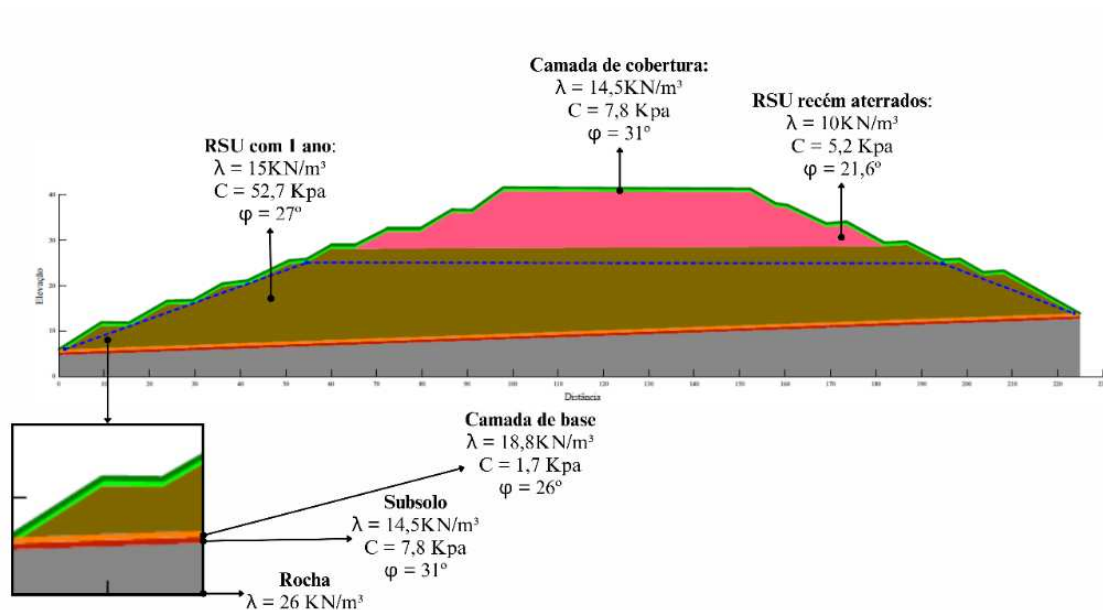
Fonte: Araújo Neto (2021)

Figura 29 - Perfil do corte CD - Cenário 1



Fonte: Araújo Neto (2021)

Figura 30 - Perfil do corte CD - Cenário 2



Fonte: Araújo Neto (2021)

3.2.5 Análises de sensibilidade do fator de segurança

Para analisar o efeito da variabilidade das propriedades de resistência no fator de segurança, obtido para as análises bidimensionais, foram conduzidas análises de sensibilidade nos *softwares slope/w* e no *slide2*. Adotou-se intervalos de variação dos

parâmetros geotécnicos dos materiais representantes da configuração do maciço sanitário referentes as seções AB e CD e aos dois cenários considerados neste estudo.

As análises de cada seção foram realizadas em relação aos parâmetros geotécnicos de cada cenário, sendo eles: coesão e o ângulo de atrito. Devido ao peso específico, para todos os materiais que compõem a configuração do maciço sanitário, nos dois cenários ser o mesmo, não foram realizadas análises de sensibilidade do FS a este parâmetro.

Os intervalos de variação foram determinados em relação aos valores fixos considerados nas análises de estabilidade. As análises de sensibilidade foram realizadas, individualmente, para cada parâmetro, enquanto um parâmetro foi variado os outros foram mantidos fixos. Este critério foi adotado para que fosse possível avaliar a sensibilidade do FS a cada parâmetro.

Os valores e a faixa de variabilidade considerados para o Cenário 1 e Cenário 2 estão apresentados nas Tabelas 10 a 17. Ressalta-se que a faixa de variação de todos os parâmetros foi a mesma para que os valores mínimos de nenhum parâmetro ficassem abaixo de 0, com exceção da coesão dos RSU com 0 ano de aterramento e do solo da camada de base (Cenário 1) em que se adotou uma faixa de variação menor. Essa consideração ocorreu em decorrência das limitações que o *software* apresenta para que os valores mínimos não fiquem abaixo de 0.

Tabela 8 - Intervalo de variação da coesão das análises de sensibilidade da Seção A - B para o Cenário 1

Material	Coesão (kPa)	Intervalo de variação (kPa)
RSU 0 ano	1,4 kPa	0,4 – 2,4
RSU 1 ano	41 kPa	36 – 46
RSU 2 anos	41,6 kPa	36,6 – 46,6
Camada de cobertura	7,8 kPa	3,8 – 12,8
Camada de base	1,6 kPa	0,6 – 2,6
Subsolo	7,8 kPa	3,8 – 12,8

Tabela 9 - Intervalo de variação do ângulo de atrito das análises de sensibilidade da Seção A – B para o Cenário 1

Material	Ângulo de Atrito (°)	Intervalo de variação (°)
RSU 0 ano	28,3°	23,3 – 33,3
RSU 1 ano	35,2°	30,2 – 40,2
RSU 2 anos	29,7°	24,7 – 34,7
Camada de cobertura	31°	26 – 36
Camada de base	26°	21 – 31
Subsolo	31°	26 – 36

Tabela 10 - Intervalo de variação da coesão das análises de sensibilidade da Seção C - D para o Cenário 1

Material	Coesão (kPa)	Intervalo de variação (kPa)
RSU 0 ano	1,4 kPa	0,4 – 2,4
RSU 1 ano	41 kPa	36 – 46
Camada de cobertura	7,8 kPa	3,8 – 13,8
Camada de base	1,6 kPa	0,6 – 2,6
Subsolo	7,8 kPa	3,8 – 13,8

Tabela 11 - Intervalo de variação do ângulo de atrito das análises de sensibilidade da Seção C – D para o Cenário 1

Material	Ângulo de Atrito (°)	Intervalo de variação (°)
RSU 0 ano	28,3°	23,3 – 33,3
RSU 1 ano	35,2°	30,2 – 40,2
Camada de cobertura	31°	26 – 36
Camada de base	26°	21 – 31
Subsolo	31°	26 – 36

Tabela 12 - Intervalo de variação da coesão das análises de sensibilidade da Seção A - B para o Cenário 2

Material	Coesão (kPa)	Intervalo de variação (kPa)
RSU 0 ano	5,2 kPa	0,2 – 10,2
RSU 1 ano	52,7 kPa	47,7 – 57,7
RSU 2 anos	41,6 kPa	36,6 – 46,6
Camada de cobertura	7,8 kPa	3,8 – 12,8
Camada de base	1,6 kPa	0,6 – 2,6
Subsolo	7,8 kPa	3,8 – 12,8

Tabela 13 - Intervalo de variação do ângulo de atrito das análises de sensibilidade da Seção A – B para o Cenário 2

Material	Ângulo de Atrito (°)	Intervalo de variação (°)
RSU 0 ano	21,6°	16,6 – 26,6
RSU 1 ano	27°	22 – 32
RSU 2 anos	29,7°	24,7 – 34,7
Camada de cobertura	31°	26 – 36

Camada de base	26°	21 – 31
Subsolo	31°	26 – 36

Tabela 14 - Intervalo de variação da coesão das análises de sensibilidade da Seção C - D para o Cenário 2

Material	Coesão (kPa)	Intervalo de variação (kPa)
RSU 0 ano	5,2 kPa	0,2 – 10,2
RSU 1 ano	52,7 kPa	47,7 – 57,7
Camada de cobertura	7,8 kPa	3,8 – 13,8
Camada de base	1,6 kPa	0,6 – 2,6
Subsolo	7,8 kPa	3,8 – 13,8

Tabela 15 - Intervalo de variação do ângulo de atrito das análises de sensibilidade da Seção C – D para o Cenário 2

Material	Ângulo de Atrito (°)	Intervalo de variação (°)
RSU 0 ano	21,6°	16,6 – 26,6
RSU 1 ano	27°	22 – 32
Camada de cobertura	31°	26 – 36
Camada de base	26°	21 – 31
Subsolo	31°	26 – 36

3.2.6 Análises tridimensionais

Nas análises de estabilidade 3D, o modelo tridimensional do aterro sanitário utilizado foi gerado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) desenvolvido por Martildes (2021), o qual representa a configuração da Célula do aterro referente ao período de estudo analisado nesse trabalho. Os dados topográficos em formato digital, conhecidos como MDE desempenham um papel crucial como ponto de partida em muitos estudos e abordagens dedicadas à análise espacial. Esses modelos constituem representações tridimensionais da superfície terrestre, permitindo a geração de uma variedade de informações sobre as características de uma determinada região de interesse. Entre essas informações, destacam-se medidas como declividade e elevação (Gomes; Zaidan; Rocha, 2022).

Para que fosse possível importar a geometria do modelo 3D para o *slide3*, devido às limitações de esforço computacional, o MDE foi convertido em arquivo de pontos. Esse procedimento foi realizado no *software* de geoprocessamento Qgis vetorizando o arquivo *raster* do MDE e depois implementando pontos para obter as coordenadas e a elevação do terreno. Ao importar o arquivo de pontos para o *slide3* o programa gera o

modelo tridimensional por meio de uma técnica de processamento denominada triangulação conforme apresentado na Figura 31 que apresenta a malha gerada; A Figura 32 apresenta a superfície gerada após a triangulação os pontos.

Figura 31 – Malha gerada após triangulação dos pontos

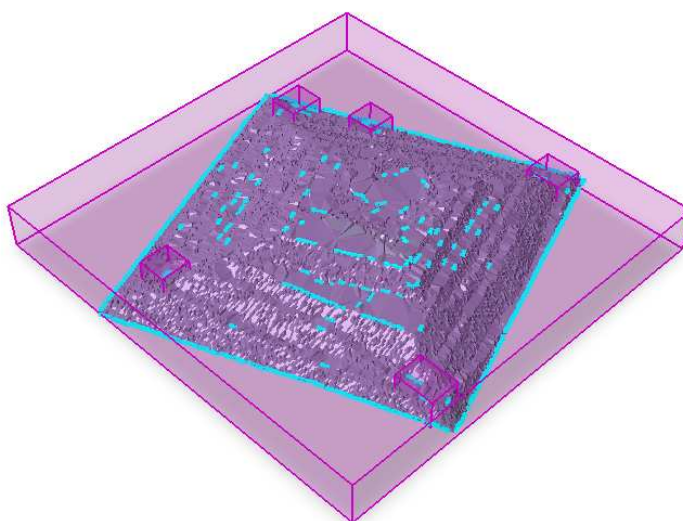


Figura 32 – Superfície após triangulação



A superfície gerada foi verificada para reparo de possíveis falhas. A Figura 33 apresenta a identificação de falhas a serem corrigidas.

Figura 33 - Verificação de falhas a serem corrigidas na superfície



Depois de corrigidas as falhas, para obter uma representação das diferentes camadas da área em estudo. Esse procedimento foi realizado por meio da ferramenta *borehole manager* que significa furos artesanais que viabiliza a simulação de furos para criar camadas de materiais representativas dentro do modelo tridimensional, delimitando as superfícies limites referentes as camadas.

Por meio dessa ferramenta, foram alocados furos com dados da configuração das espessuras das camadas da Célula do aterro no modelo 3D. A configuração desses furos foi adaptada das seções bidimensionais de maneira a reproduzir a disposição das camadas do aterro, sendo consideradas também as informações obtidas durante o monitoramento realizado pelo grupo de pesquisa em Geotecnia Ambiental da UFCG.

O *software* realiza uma interpolação e as camadas são determinadas, caracterizando assim, as propriedades geotécnicas dos resíduos e do solo que formam o maciço sanitário. Após determinar as camadas foram realizadas as análises de estabilidade determinísticas tridimensionais para indicar as áreas com menor fator de segurança de cada cenário em estudo, adotando o método de Morgenstern-Price.

4. RESULTADOS

4.1 Análises de estabilidade bidimensionais

4.1.1 Análises bidimensionais para o Cenário 1

Para o Cenário 1, foram realizadas análises de estabilidade das seções A-X, B-X, C-X e D-X, utilizando os *softwares slope/w* e *slide2*. As Figuras de 34 a 41 apresentam os resultados dos fatores de segurança mais críticos de cada seção e *software* específico analisado.

Figura 34 – Fator de segurança da Seção A – X (Corte AB) para o Cenário 1 - *software slope/w*

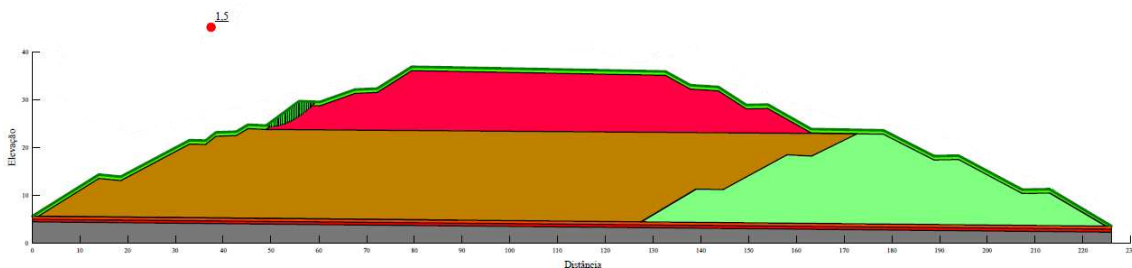


Figura 35 - Fator de segurança da Seção A – X (Corte AB) para o Cenário 1 - *software slide2*



Nas Figuras 34 e 35, para a seção A – X, conforme pode-se visualizar nas Figuras 34 e 35, ao comparar os FS obtidos para os dois softwares é notável a convergência entre as regiões onde a superfície de ruptura mais críticas ficou localizada, além de que os valores ficaram próximos.

Figura 36 - Fator de segurança da Seção B – X (Corte AB) para o Cenário 1 - *software slope/w*

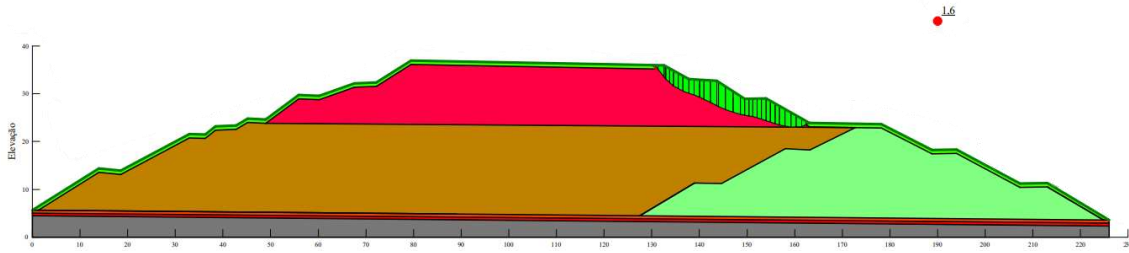


Figura 37 - Fator de segurança da Seção B – X (Corte AB) para o Cenário 1 - *software slide2*



Para a seção B – X, ao observar as Figuras 36 e 37 é possível visualizar que os FS obtidos para os dois softwares tiveram valores iguais, porém a área em que as regiões onde a superfície de ruptura mais críticas ficou localizada foi maior na análise realizada no *slope/w* (Figura 34).

Figura 38 - Fator de segurança da Seção C – X (Corte CD) para o Cenário 1 - *software slope/w*

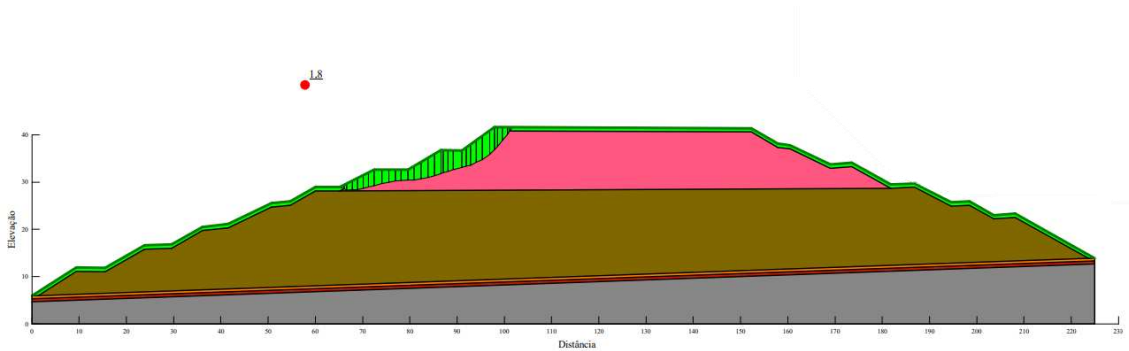


Figura 39 - Fator de segurança da Seção C – X (Corte CD) para o Cenário 1 - *software slide2*



Para a seção C – X (Figuras 38 e 39), tanto os valores dos FS, quanto a área abrangida pelas potenciais superfícies de rupturas mais críticas foram diferentes nos dois softwares.

Figura 40 - Fator de segurança da Seção D – X (Corte CD) para o Cenário 1 - *software slope/w*

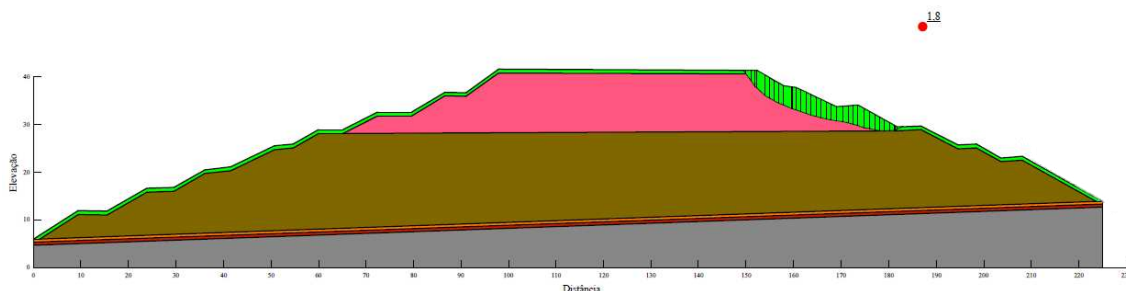
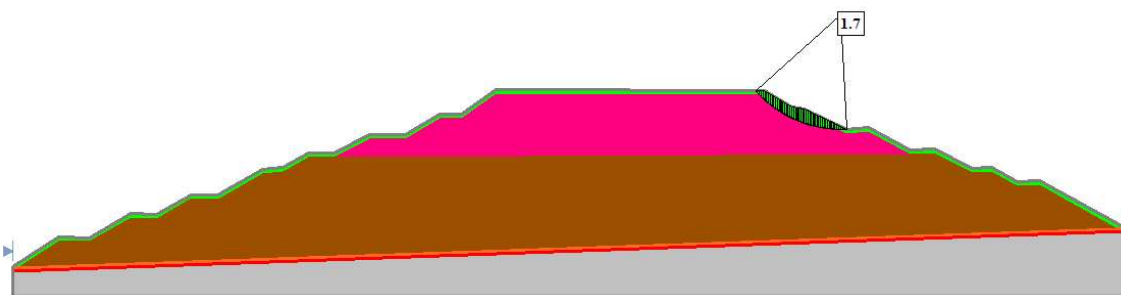


Figura 41 - Fator de segurança da Seção D – X (Corte CD) para o Cenário 1 - *software slide2*



Na seção D – X (Figura 40 e 41), os FS de segurança e as áreas abrangidas pelas potenciais superfícies de ruptura ficaram próximos. De modo geral, para o Cenário 1, a principal diferença nos FS obtidos pelo *slope/w* e *slide2* pode ser atribuído ao método de busca das superfícies de ruptura. De modo que no *slope/w*, as possíveis entradas e saídas da superfície de ruptura são delimitadas, manualmente, enquanto no *slide2* essa busca é realizada automaticamente de forma a considerar a região com maior risco de ruptura com base nos dados de projeto inseridos.

Além disso, a definição da superfície de pesquisa é feita automaticamente pelo *software slide2* que leva em consideração a região com maior risco de ruptura a partir dos dados de projeto inseridos. Já no *software slope/w* como é realizada manualmente pode interferir negativamente nos valores encontrados.

Cada *software* de análise geotécnica, como o *slope/w* e o *slide2*, é projetado com suas próprias metodologias e algoritmos para simular o comportamento do solo e das condições do terreno. As simplificações empregadas na modelagem das simulações

numéricas para tornar os cálculos viáveis e eficientes como a discretização do modelo ou os algoritmos de busca das superfícies de ruptura podem introduzir limitações que resultem em superfícies críticas diferentes considerando o mesmo método.

Como é possível visualizar nas Figuras 37 a 44, os fatores de segurança mínimos obtidos pelos dois *softwares* foram identificados nas áreas correspondentes às camadas de resíduos recentemente aterrados. Observa-se que as camadas superiores nas Células de resíduos, que correspondem aos RSU mais jovens possuem menores resistências ao cisalhamento, uma vez que os parâmetros geotécnicos destes resíduos são inferiores aos RSU com 1 e 2 anos de aterramento.

Isso ocorre, pois devido à idade de aterramento desses resíduos e avanço da operação. Na configuração da Célula referente a esse estudo, as camadas de RSU recém aterrados ainda não haviam sido submetidas aos efeitos das pressões de sobrecargas das camadas superiores, além de apresentarem uma menor evolução dos processos degradativos por serem resíduos jovens. Isso resulta em uma menor resistência ao cisalhamento em relação a de resíduos aterrados em camadas mais profundas e há mais tempo.

No estudo conduzido por Remédio (2014), a estabilidade do Aterro de Caetetuba localizado em São Paulo, foi analisada considerando seis cenários com diferentes parâmetros geotécnicos dos resíduos obtidos por meio de ensaios de penetração (correlações empíricas) e pesquisa bibliográfica. Os resultados destacaram a influência direta dos parâmetros de resistência ao cisalhamento adotados nos fatores de segurança calculados, evidenciando diferenças significativas entre os diversos cenários analisados ao manter o valor da coesão e variar do ângulo atrito, e vice-versa.

Notavelmente, os parâmetros obtidos a partir de correlações empíricas forneceram os maiores valores de fator de segurança. Além disso, esse autor constatou que aplicação de diferentes métodos de equilíbrio limite no *software slope/w* revelou que o método de Morgenstern-Price, apresentou os valores mais altos, juntamente, com o método de Spencer, considerados métodos rigorosos, corroborando com a escolha do método analítico considerado neste estudo.

A pesquisa conduzida por Strauss (1998) investigou a estabilidade de um aterro sanitário localizado na Zona Norte de Porto Alegre, considerando a incerteza associada aos valores dos parâmetros geotécnicos dos RSU. O estudo foi dividido em duas fases

distintas: uma focada na análise dos resíduos novos e antigos, e outra abordando análises paramétricas que consideraram a massa dos RSU como homogênea. Foram utilizados ensaios de cone para determinação dos parâmetros geotécnicos. Na análise paramétrica de estabilidade, foram aplicados métodos como o de Bishop Simplificado e Spencer. Além disso, o autor conduziu análises específicas considerando diferentes pares de parâmetros c' e ϕ' . Essas análises destacam como as variações nesses parâmetros afetam a estabilidade do aterro sanitário, destacando a importância de realizar essas considerações para estudos de estabilidade destes tipos de obras.

No estudo conduzido por Daciolo (2020) sobre uma análise da ruptura do aterro sanitário do Sítio São João - SP, foram realizadas análises probabilísticas para avaliar a estabilidade de aterros de RSU considerando a variabilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento desses materiais. A pesquisa envolveu uma extensa revisão bibliográfica e meta-análise de dados geotécnicos disponíveis na literatura técnica. Os resultados destacaram a alta dispersão dos valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, decorrente da diversidade de métodos de amostragem e procedimentos experimentais.

A classificação mecânica-morfológica proposta permitiu reduzir essa dispersão e fornecer recomendações específicas para cada tipo de RSU. Além disso, as análises de estabilidade probabilísticas realizadas no estudo indicaram a importância desses estudos para a avaliação de riscos e a tomada de decisão em projetos geotécnicos. Os resultados obtidos por este autor fornecem indicadores importantes sobre os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU e seus comportamentos estatísticos, destacando a necessidade de considerar dados locais e ensaios *in situ* em análises de estabilidade e projetos de aterros de resíduos.

Destacando que diferentemente da análise determinística, a probabilística explora a variabilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento em um contexto mais abrangente. Isso pode resultar em diferenças nos resultados de estabilidade, pois a análise probabilística considera a incerteza nos parâmetros geotécnicos.

Corroborando com este estudo, Awad-Allah (2022) investigou a estabilidade de aterros sanitários utilizando parâmetros geotécnicos obtidos a partir de ensaios em campo. Os resultados revelaram que os valores do fator de segurança foram significativamente

influenciados pela inclinação dos taludes laterais e pelos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

4.1.2 Análises bidimensionais para o Cenário 2

Para o Cenário 2, as Figuras de 42 a 49 apresentam os resultados dos fatores de segurança para cada seção e *software* específico.

Figura 42 - Fator de segurança da Seção A – X (Corte AB) para o Cenário 2 - *software slope/w*

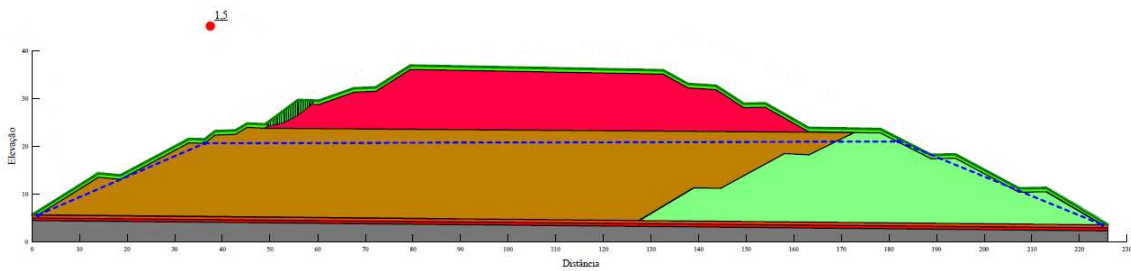
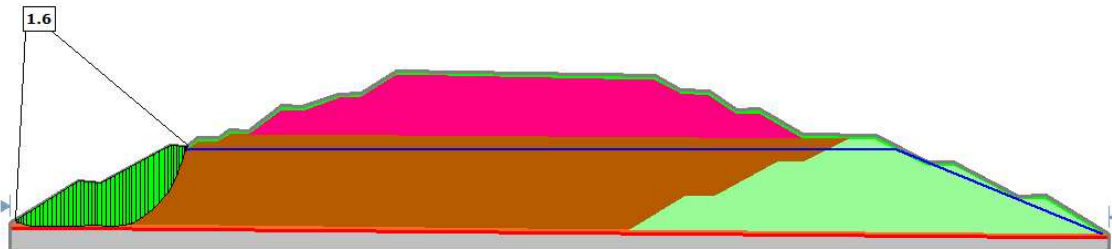


Figura 43 - Fator de segurança da Seção A – X (Corte AB) para o Cenário 2 - *software slide2*



Na seção A – X (Figuras 42 e 43), os FS obtiveram valores próximos, porém a potencial de superfície de ruptura mais crítica apresenta-se em regiões diferentes no *slope/w* e no *slide2*.

Figura 44 - Fator de segurança da Seção B – X (Corte AB) para o Cenário 2 - *software slope/w*

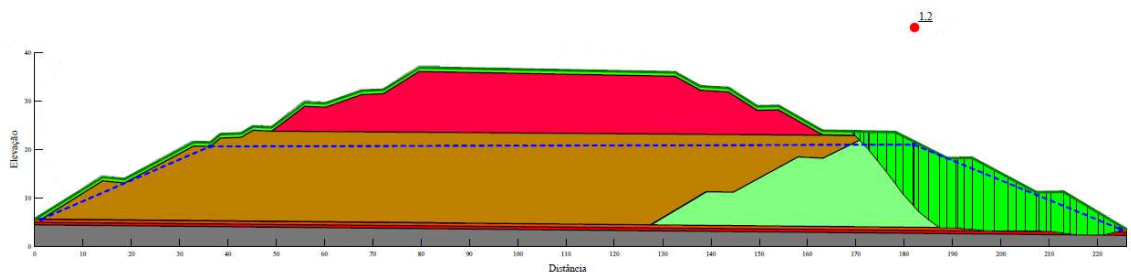
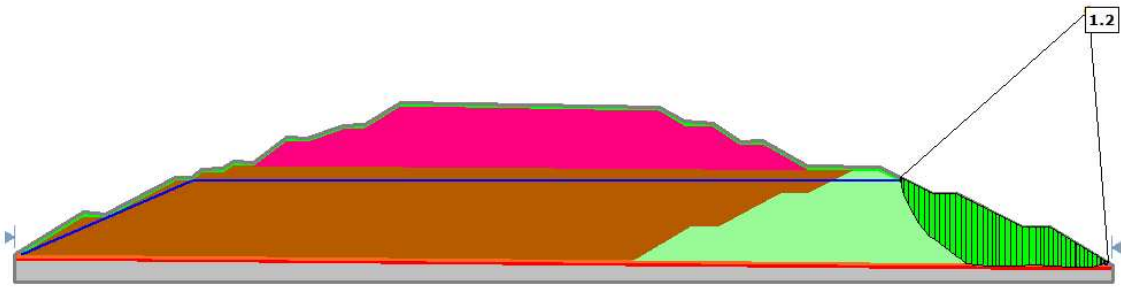


Figura 45 - Fator de segurança da Seção B – X (Corte AB) para o Cenário 2 - *software slide2*



Já para seção B – X, conforme apresentado nas Figuras 44 e 45, os FS foram iguais e as potenciais superfícies de ruptura mais críticas abrangeram em áreas próximas.

Figura 46 - Fator de segurança da Seção C – X (Corte CD) para o Cenário 2 - *software slope/w*

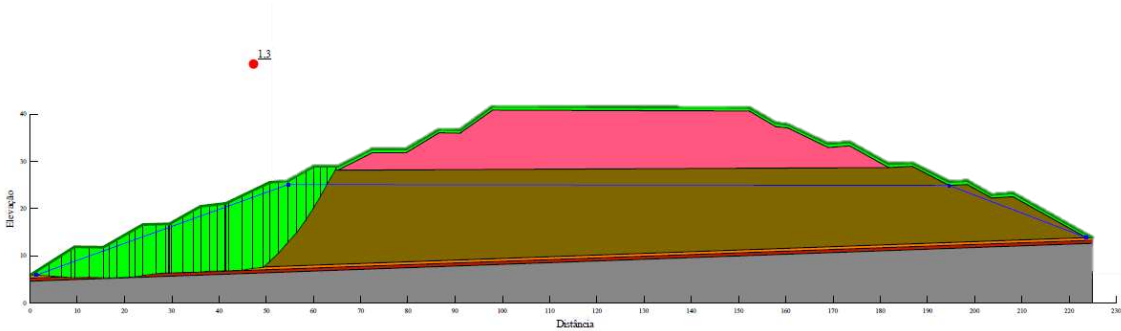
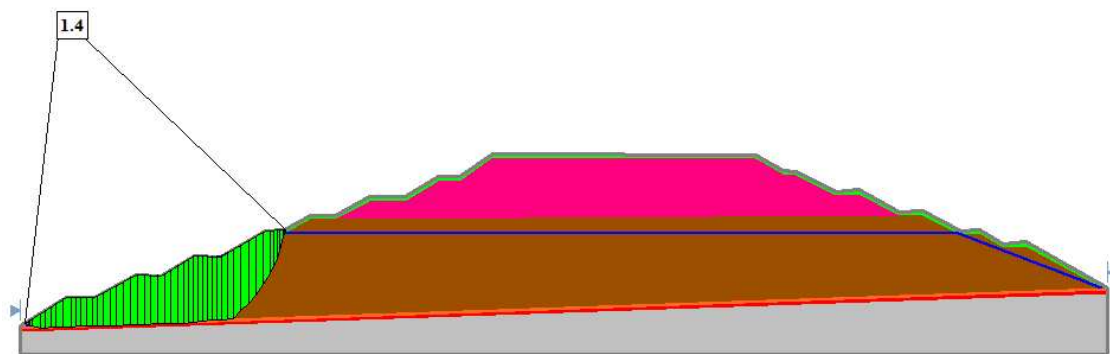


Figura 47 - Fator de segurança da Seção C – X (Corte CD) para o Cenário 2 - *software slide*



Na seção C – X (Figuras 46 e 47), os FS apresentaram valores próximos e potencial superfície de ruptura mais crítica abrangendo a mesma área.

Figura 48 - Fator de segurança da Seção D – X (Corte CD) para o Cenário 2 - *software slope/w*

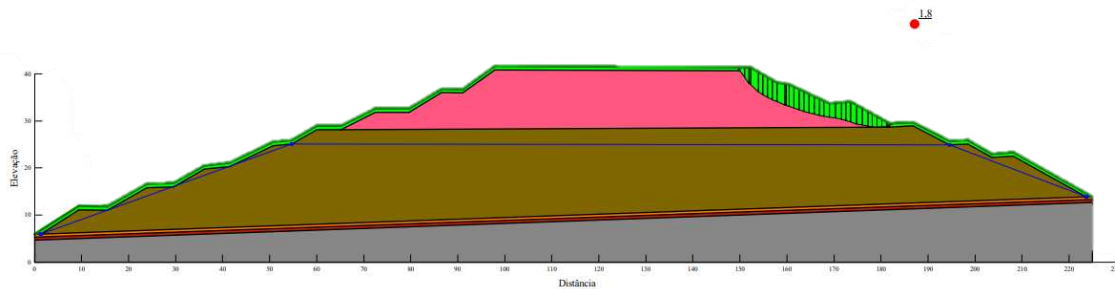
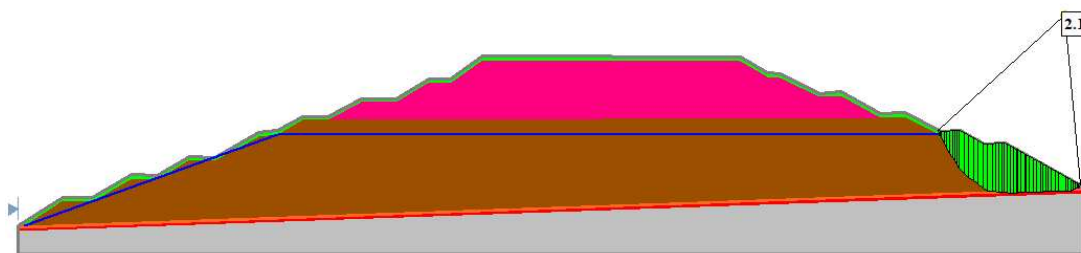


Figura 49 - Fator de segurança da Seção D – X (Corte CD) para o Cenário 2 – *software slide2*



Assim como na seção A – X, na seção D – X (Figuras 48 e 49), os FS obtiveram valores próximos, porém a potencial superfície de ruptura mais crítica apresenta-se em regiões diferentes no *slope/w* e no *slide2*.

Nas Seções B-X e C-X nos dois cenários estudados, observou-se que os fatores de segurança do Cenário 2 foram menores do que no Cenário 1, tanto no *slope/w* quanto no *slide2*. Essa redução nos FS pode ser atribuída ao posicionamento da superfície de ruptura mais crítica que ficou abaixo da linha piezométrica em ambos os *softwares*. Para as Seções A-X e D-X, o FS do Cenário 2, calculado no *slide2*, foi maior que o do Cenário 1. Isso se deve ao fato de que ao considerar o excesso de poropressão na configuração do projeto, o *slide2* realiza as buscas das superfícies de ruptura mais críticas apenas na região abaixo da linha piezométrica, resultando em um aumento do FS obtido quando comparado ao do *slope/w* para o Cenário 2.

Ao observar os cenários estudados, notou-se que, mesmo com a presença de níveis de líquidos, a camada de resíduos localizada acima da linha piezométrica apresenta resíduos com menor resistência ao cisalhamento e taludes de maior cota topográfica. Justificando que essa condição influenciou, significativamente, nos valores dos FS, já que a combinação de resíduos com menor resistência ao cisalhamento e taludes mais acentuados tende a resultar em condições de estabilidade mais críticas.

Outros autores, como Sheng *et al.*, (2021) também constataram a influência negativa dos líquidos na estabilidade de um aterro sanitário. Ao investigar a expansão vertical dessas estruturas, especialmente considerando a presença de lixiviado, os autores constataram uma diminuição no fator de segurança. Por exemplo, quando esse nível passa de 2 m para 20 m, o fator de segurança do aterro diminui em 13,2–15,4%. Corroborando, com o que ocorreu neste estudo em que nas seções B – X e C – X também demonstraram uma diminuição no fator de segurança sob o Cenário 2.

Em sua análise da estabilidade de um aterro convencional, diferentemente, deste estudo, que considerou o melhor e pior cenário à estabilidade, Andrades (2018) ao a estabilidade de um aterro sanitário localizado na região metropolitana de Curitiba e de um aterro sanitário localizado na região metropolitana de São Paulo, empregou dados de monitoramento de níveis piezométricos de líquidos medidos ao longo de 12 meses e obteve os parâmetros geotécnicos dos RSU da literatura técnica. Utilizando os *softwares* Slide 6 e *slope/w* com o método de Bishop Simplificado, observou-se que os FS foram mais altos no Slide 6 em comparação com o *slope/w*. A média anual dos FS foi de 1,8 no Slide 6, enquanto no *slope/w* os valores foram inferiores, com média anual de FS = 1,7. Assim como Andrades (2018), o presente estudo destaca a importância de considerar diferentes *softwares* para analisar as variações nos fatores de segurança.

Conforme o que preconiza a NBR 11682 (ABNT, 2009), por meio dos fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade é possível avaliar a situação da estabilidade do aterro para os cenários em estudo. De acordo com esta norma, os fatores de segurança abaixo de 1,5 estão em desconformidade com o mínimo recomendado, considerando a condição de alto nível de segurança ao risco contra danos materiais e ambientais, e médio ao risco de perda de vidas humanas (classificação mencionada no Quadros 4, 5 e 6). A Tabela 18 apresenta a classificação dos FS de cada seção em relação a conformidade e desconformidade com o mínimo recomendado pela NBR 11682 (ABNT, 2009).

Tabela 16 – Classificação dos fatores de segurança para cada seção com base na NBR 11682 (ABNT, 2009)

Cenário	Seção	<i>slope/w</i>	Situação	<i>slide2</i>	Situação
1	A-X	1,5	Conformidade	1,3	Desconformidade
	B-X	1,6	Conformidade	1,6	Conformidade
	C-X	1,8	Conformidade	1,5	Conformidade
	D-X	1,8	Conformidade	1,7	Conformidade
Média dos FS		1,7	Conformidade	1,5	Conformidade

2	A-X	1,5	Conformidade	1,6	Conformidade
	B-X	1,2	Desconformidade	1,2	Desconformidade
	C-X	1,3	Desconformidade	1,4	Desconformidade
	D-X	1,8	Conformidade	2,1	Conformidade
Média dos FS		1,4	Desconformidade	1,6	Conformidade

Inicialmente, as seções foram classificadas como estáveis ou instáveis, com base nos valores de FS obtidos para cada seção. No caso de ausência de líquidos no interior da Célula, as seções A-X, B-X, C-X e D-X apresentaram FS variando de 1,5 a 1,8 no *slope/w* e de 1,3 a 1,7 no *slide2*. Estes valores indicam uma condição geral de estabilidade, embora com algumas variações entre as seções e os *softwares* utilizados.

No cenário sem a presença de líquidos observa-se que todas as seções apresentaram fatores de segurança satisfatórios no *slope/w*, com valores variando entre 1,5 e 1,8. No entanto, ao utilizar o *slide2*, os resultados mostram que o FS da seção A-X é considerado desconforme, com um FS de 1,3, enquanto as demais seções permanecem em conformidade, com valores de FS entre 1,5 e 1,7. Isso pode estar atribuído as diferenças nas simulações numéricas realizadas nos *softwares*, onde as buscas pelas superfícies de ruptura críticas podem variar de um *software* em relação ao outro.

Já no cenário com o maior nível piezométrico monitorado na Célula, os resultados revelam uma variação nos valores de FS entre as seções e os *softwares*. O *slope/w* mostra FS semelhantes na seção B-X em relação com um FS de 1,2, enquanto o *slide2* também indica desconformidade nessa seção apresentando o mesmo resultado. A seção C-X mostrou-se em desconformidade em ambos os *softwares*, com valores de FS de 1,3 no *slope/w* e 1,4 no *slide2*. As demais seções permanecem em conformidade nos dois *softwares*, apenas com variações nos valores do FS. Esses resultados destacam a influência significativa de líquidos na estabilidade do maciço, evidenciando a importância de considerar diferentes cenários nesses estudos.

Em outra perspectiva, analisando as médias dos FS determinados por cada *software* nos dois cenários considerados, tem-se que apenas o FS do *slope/w* para o Cenário 2 está em desconformidade com o mínimo recomendado pela NBR 11682 (ABNT, 2009).

Os FS obtidos por Araujo Neto (2021) foram observados como superiores aos do presente estudo. Essas divergências de valores podem ser atribuídas aos diferentes métodos de busca empregados para determinar as superfícies de ruptura mais críticas. No

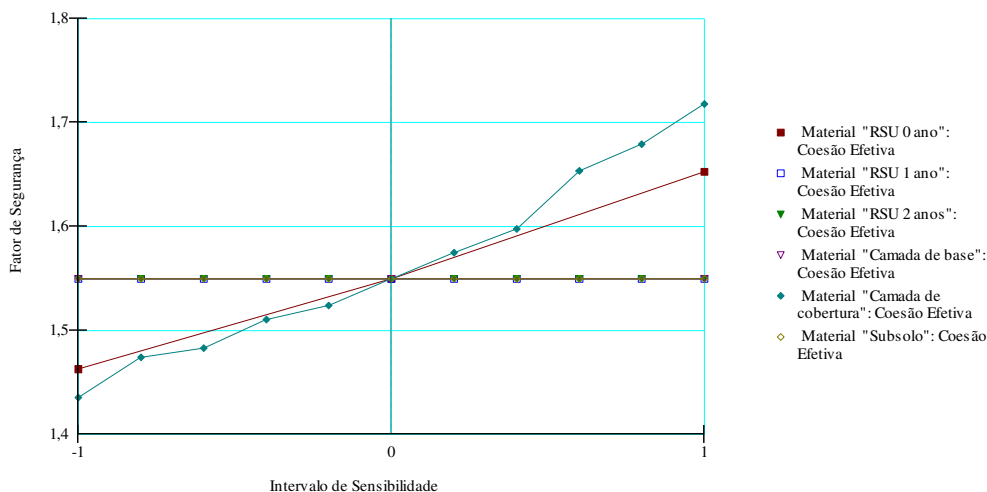
estudo conduzido por Araujo Neto (2021), a busca pelas superfícies críticas foi realizada variando o raio e o centro do círculo que intersecta o maciço sanitário no *software* GEO5 2021. Isso significa que as buscas realizadas não capturaram eventuais rupturas pontuais que poderiam ocorrer ao longo dos taludes. Essa abordagem, embora ofereça uma visão abrangente do comportamento do talude, pode subestimar a ocorrência de falhas localizadas ou pontuais.

Ao comparar os resultados obtidos nesta pesquisa com os de Strauss (1998), Remédio (2014), Andrades (2018), Daciolo (2020), Sheng *et al.*,(2021) Awad-Allah (2022), tem-se que, os fatores de segurança obtidos para este estudo são representativos, uma vez que os parâmetros geotécnicos utilizados para determinação das propriedades dos resíduos foram obtidos por meio de coletas de dados semelhantes, métodos similares e situações de campos. Esse método de obtenção de dados, que reflete as condições reais do local, confere uma relevância particular aos resultados apresentados.

4.1.3 Análises de sensibilidade do fator de segurança

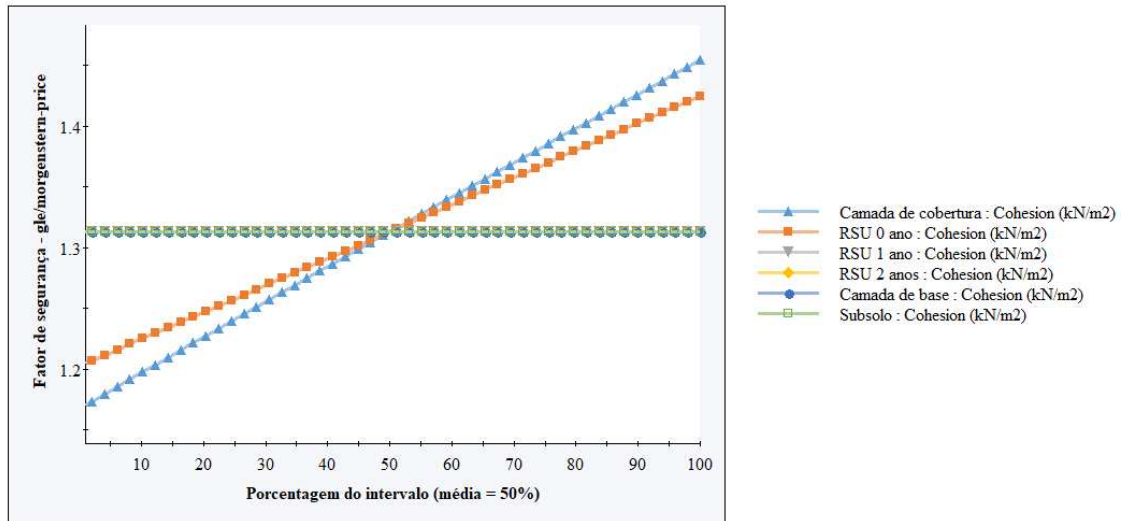
As Figuras 50 a 58, que representam os resultados das análises de sensibilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU e dos solos do Aterro em relação ao fator de segurança para a seção A-X para os dois cenários e *softwares* analisados. A percepção de sensibilidade é visualizada por meio da inclinação da reta que reflete a alteração do FS em relação aos valores de cada parâmetro. A convergência de todas as retas representa o fator de segurança para as análises que consideram os valores fixos de cada parâmetro.

Figura 50 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A – X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 1 software slope/w



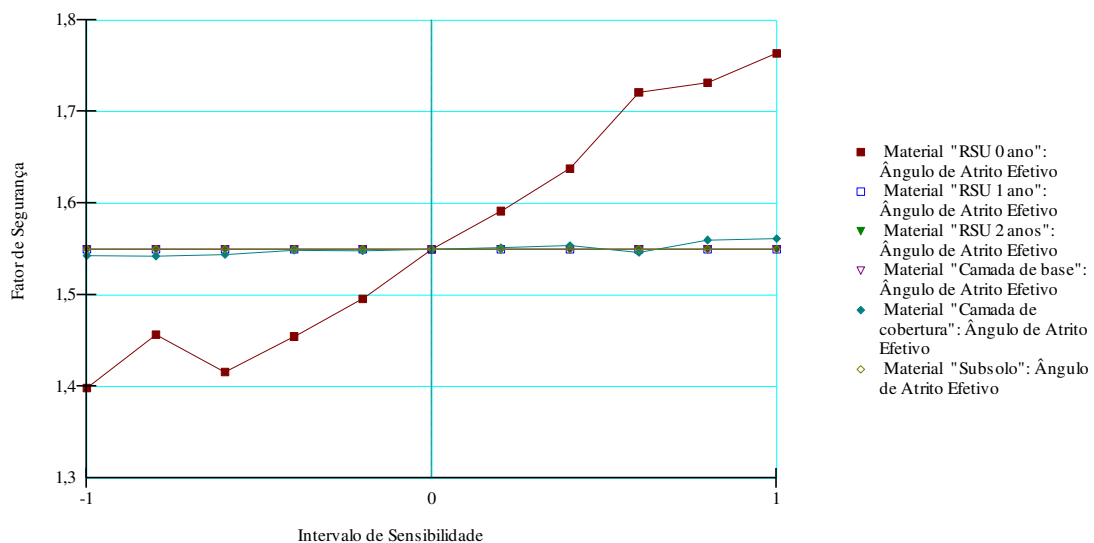
Para o Cenário 1, como se pode observar na Figura 50, para a seção A – X utilizando o $slope/w$, a camada que mais causa oscilações no FS ao variar a coesão é a camada de cobertura em que o FS se aproxima de 1,4 até o máximo 1,7.

Figura 51 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A – X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 1 *software slide2*



Na Figura 51, ao examinar a seção A-X por meio do software Slide2, é evidente que a camada que mais gera oscilações no FS em resposta à variação da coesão é, novamente, a camada de cobertura do aterro.

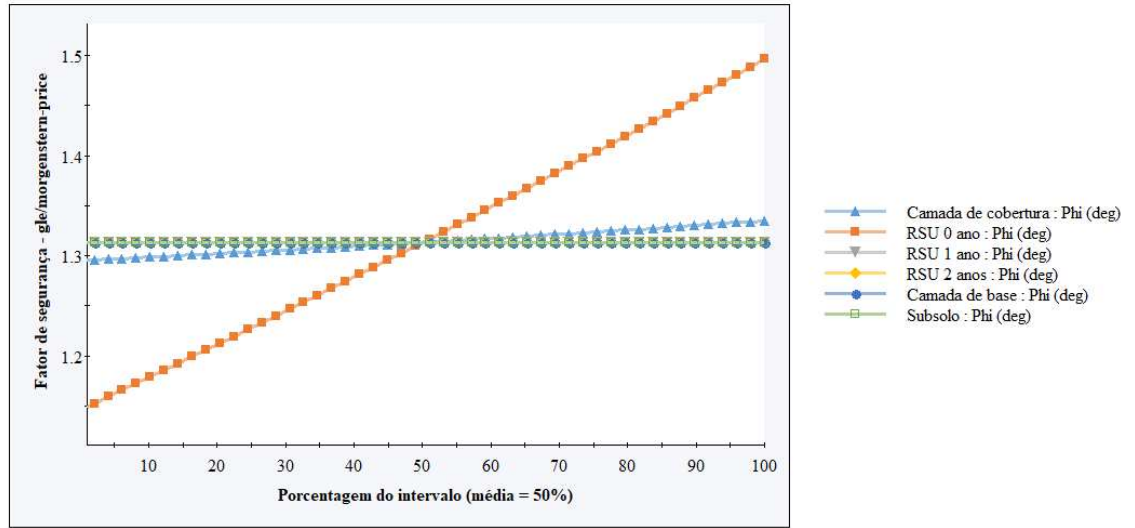
Figura 52 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A – X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 *software slope/w*



Como se pode observar na Figura 52, para a seção A – X utilizando o $slope/w$, a camada que mais causa oscilações no FS ao variar o ângulo de atrito é a camada de

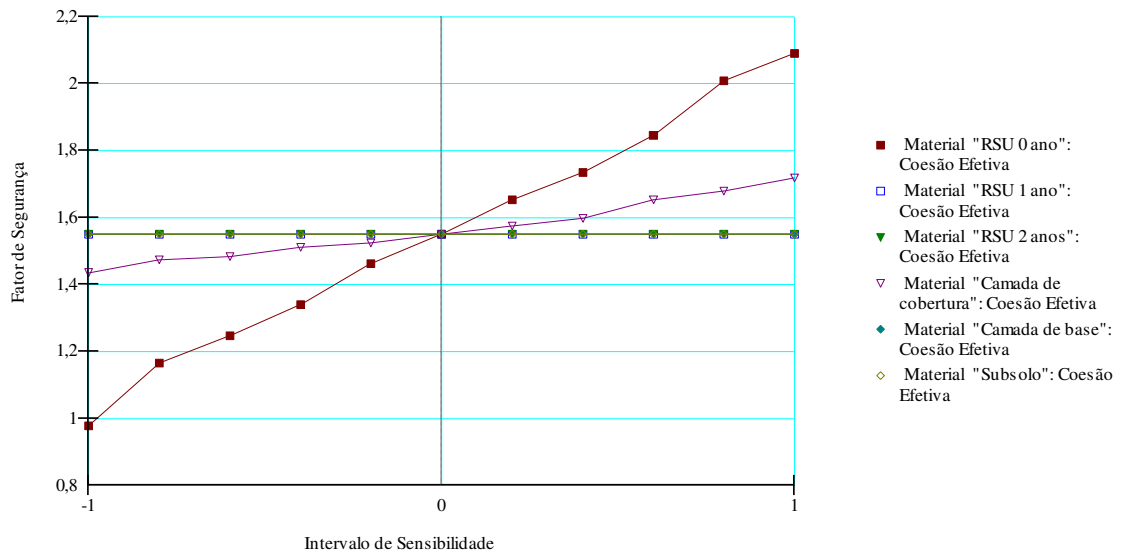
resíduos recém aterrados em que o FS atinge um mínimo de 1,4 até o máximo próximo de 1,8.

Figura 53 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A – X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 *software slide2*



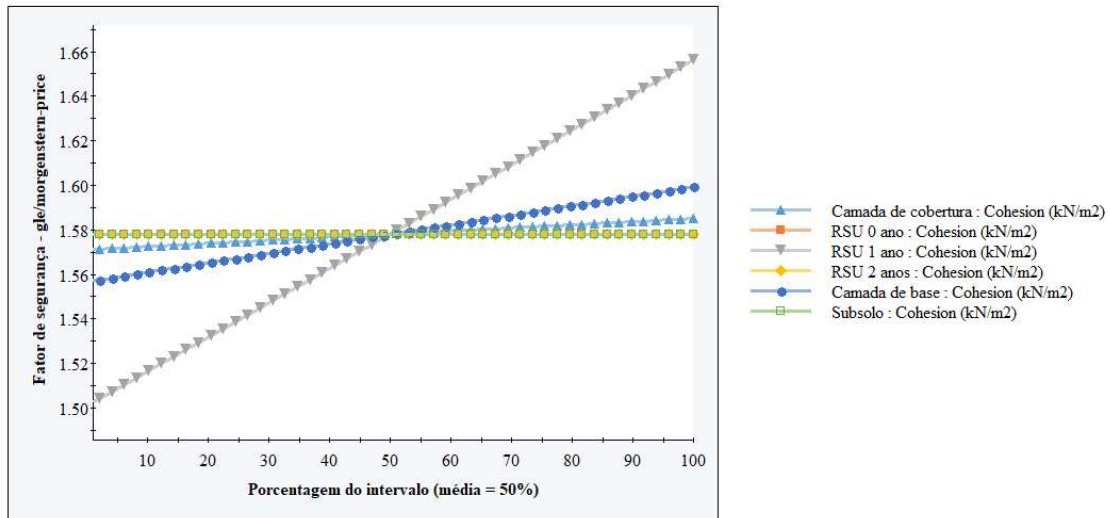
Como se pode observar na Figura 52, para a seção A – X utilizando o *slide2*, a camada que mais causa oscilações no FS ao variar o ângulo de atrito é a camada de resíduos recém aterrados em que o FS atinge um mínimo próximo de 1,2 até o máximo próximo de 1,5.

Figura 54 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A - X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 2 *software slope/w*



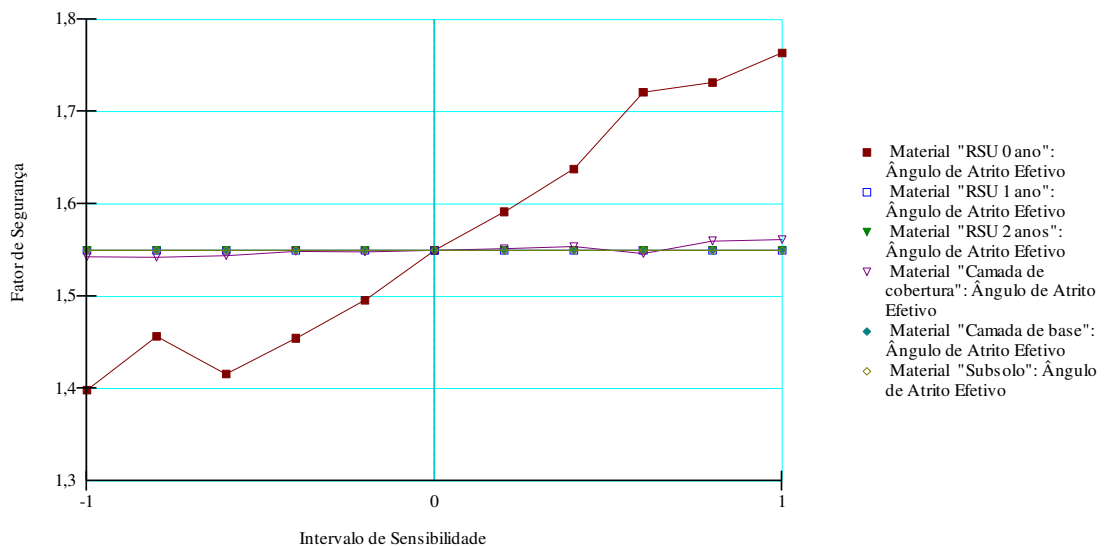
Já para o Cenário 2, ainda para a mesma seção, utilizando o *slope/w*, a camada que mais causa oscilações no FS ao variar a coesão é a camada de resíduos recém aterrados em que o FS atinge um mínimo próximo de 1,0 até o máximo próximo de 2,0.

Figura 55 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A - X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 2 *software slide2*



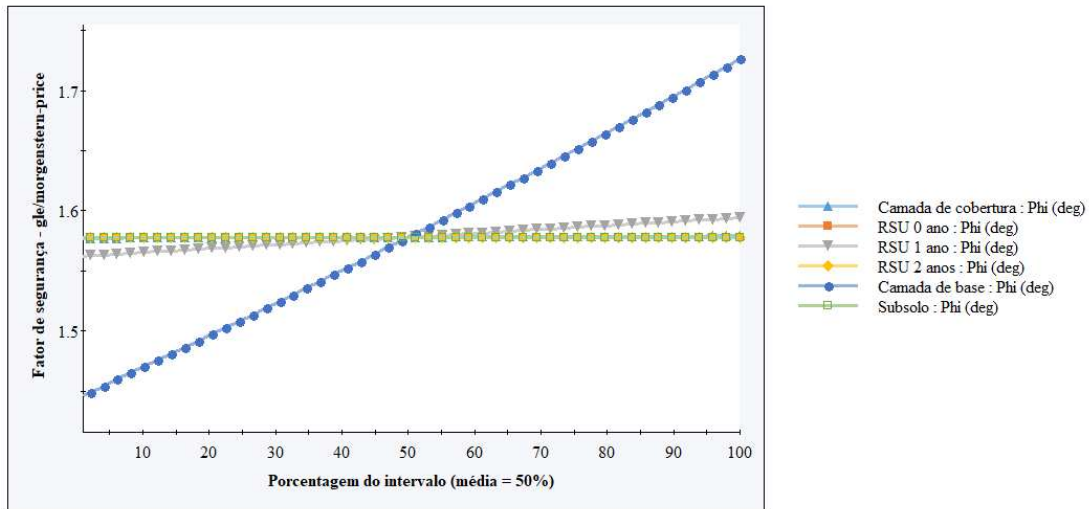
Na Figura 67, utilizando o *slope/w*, a camada que mais causa pequenas oscilações no FS ao variar a coesão é a camada de resíduos com 1 ano de aterramento.

Figura 56 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A - X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 2 *software slope/w*



Ainda para a mesma seção, utilizando o *slope/w*, a camada que mais causa oscilações no FS ao variar o ângulo de atrito é a camada de resíduos recém aterrados em que o FS atinge um mínimo próximo de 1,4 até o máximo próximo de 1,8

Figura 57 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção A - X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 2 *software slide2*



Para o Cenário 2 no *slide2*, a camada que mais causa oscilações no FS ao variar o ângulo de atrito é a camada de base em que o FS atinge um mínimo próximo de 1,5 até o máximo próximo de 1,7.

Ao verificar os resultados das análises de sensibilidade de todas as seções (os resultados referentes as seções B-X, C-X e D-X para o cenário 1 e 2 constam no apêndice A) é possível verificar que as variações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, especialmente, nos RSU com 0 ano de aterramento (recém-aterrados), exerceram a maior influência no fator de segurança. A Tabela 19 apresenta uma compilação dos resultados obtidos nas análises de sensibilidade destacando as camadas que mais influenciam em oscilações no fator de segurança de acordo com a variação dos parâmetros para cada seção e *software* utilizado (*slope/w* e *slide2*) nos dois cenários analisados.

Tabela 17 - Camadas que mais influenciam no FS de acordo com a variação dos parâmetros para cada seção e *software*

Cenário	Seção	Parâmetro variado	Camadas que mais influenciam no FS	
			<i>slope/w</i>	<i>slide2</i>
1	A-X	Coesão	Camada de cobertura	RSU 1 ano
			RSU 0 ano	Camada de cobertura
	B-X	Coesão	RSU 0 ano	RSU 0 ano
			RSU 1 ano	Camada de cobertura
	C-X	Coesão	RSU 0 ano	Camada de cobertura
			Camada de cobertura	RSU 0 ano
		Ângulo de atrito	RSU 0 ano	

2	D-X	Coesão	Camada de cobertura RSU 0 ano	RSU 0 ano
		Ângulo de atrito	RSU 0 ano	RSU 0 ano
	A-X	Coesão	Camada de cobertura RSU 0 ano	RSU 1 ano
		Ângulo de atrito	RSU 0 ano	Camada de base
	B-X	Coesão	RSU 2 anos	RSU 2 anos
		Ângulo de atrito	Camada de base	Camada de base
	C-X	Coesão	RSU 1 ano	RSU 1 ano
		Ângulo de atrito	Camada de base	RSU 1 ano
	D-X	Coesão	Camada de cobertura RSU 0 ano	RSU 1 ano
		Ângulo de atrito	RSU 0 ano	Camada de base

De modo geral, no Cenário 1, nota-se que as camadas que mais influenciam no FS variam dependendo do parâmetro e da seção analisada, com destaque para a camada de cobertura e dos RSU recém aterrados que, frequentemente, apresenta influência significativa, especialmente para variações na coesão. Isso sugere que a estabilidade dessas seções está fortemente ligada às propriedades mecânicas dessa camada, principalmente, quando os resíduos são recentemente depositados.

Isso é observado pois os resíduos recém aterrados apresentam grande variabilidade devido a sua heterogeneidade ligada aos diversos materiais que os compõem. À medida que esses resíduos vão passando pelos processos degradativos sofrem alterações em suas características e propriedades.

Já no Cenário 2, as camadas mais influentes também variam de acordo com o parâmetro e a seção, com maior ênfase na camada de base para variações no ângulo de atrito. Esses resultados evidenciam a importância de considerar as características específicas das camadas de material ao avaliar a estabilidade de aterros sanitários.

Quanto aos softwares, para o Cenário 1 o *slope/w* e o *slide2* mostram diferentes sensibilidades em relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento, especialmente na Seção A-X, onde a camada de cobertura de RSU com 0 ano é mais influente no FS no *slope/w*, enquanto no *slide2*, são os RSU com 1 ano. No Cenário 2, novamente são observadas diferenças entre os softwares, destacando-se a maior influência da camada de base no *slide2* para variações no ângulo de atrito, em comparação com o *slope/w*.

Estudos como os de Daciolo (2020) e Jahanfar *et al.*, (2017), destacam a importância de considerar os fatores responsáveis por causar variações no fator de

segurança, como os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Demonstrando como esses fatores podem influenciar significativamente a estabilidade dos taludes ao longo do tempo e em diferentes condições operacionais.

Os vários parâmetros que compõem o maciço exercem expressiva influência sobre sua estabilidade e, por conseguinte, sobre o fator de segurança dos taludes. Sendo crucial considerar a variação dessas condições durante a concepção de projetos de aterros, para garantir sua estabilidade ao longo do tempo (Khoshand *et al.*, 2018).

A sensibilidade dos FS às variações nos parâmetros de resistência ao cisalhamento ressalta a importância do monitoramento contínuo das condições do aterro sanitário. Mudanças nas características dos materiais ao longo do tempo em decorrência dos processos de compactação, decomposição ou infiltração de água, podem afetar significativamente a estabilidade dos taludes e devem ser monitoradas.

Os resultados destacam a importância de uma caracterização precisa dos materiais dispostos no aterro sanitário, especialmente dos resíduos recém aterrados. Uma compreensão das propriedades geotécnicas desses materiais é crucial para prever com precisão o comportamento dos taludes e garantir sua estabilidade.

4.2 Análises de estabilidade tridimensionais

4.2.1 Análises tridimensionais para o Cenário 1

Para o Cenário 1 o FS de segurança obtido foi de 1,6, estando em conformidade com o mínimo recomendado pela NBR 11682 (ABNT, 2009). As Figuras 82 a 85 ilustram representações dos FS especializados referentes as análises de estabilidade 3D para o Cenário 1.

Figura 58 – Modelo tridimensional para o Cenário 1 - Espacialização do fator de segurança

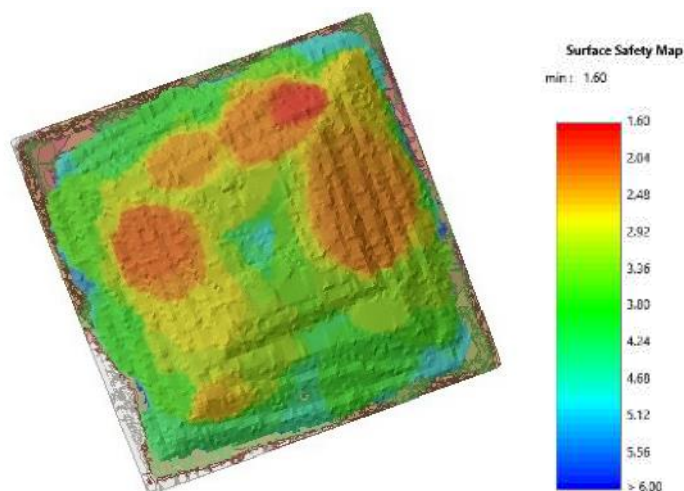
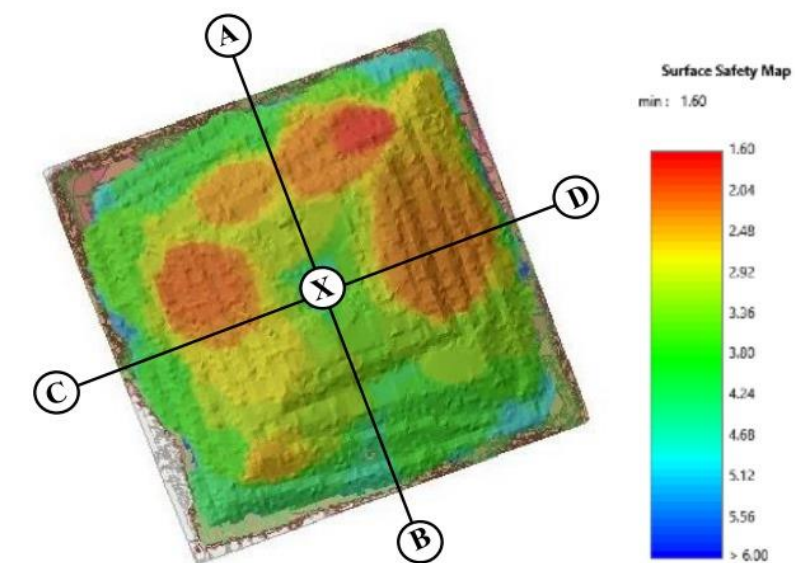


Figura 59 - Cortes AB e CD no modelo tridimensional para o Cenário 1 - Espacialização do fator de segurança



Ao observar as Figuras 82 e 83, percebe-se que superfície de ruptura mais crítica identificada pelo modelo 3D para o Cenário 1 está localizada em uma área além das seções analisadas no 2D. Essa divergência indica que a modelagem tridimensional revelou características do terreno que não foram capturadas nas análises de estabilidade 2D. As Figura 84 e 85 apresentam vistas em perspectiva do FS de segurança espacializado, com destaque para área onde o FS foi crítico (Figura 85).

Figura 60 – Vista em perspectiva do fator de segurança espacializado na superfície 3D – Cenário 1

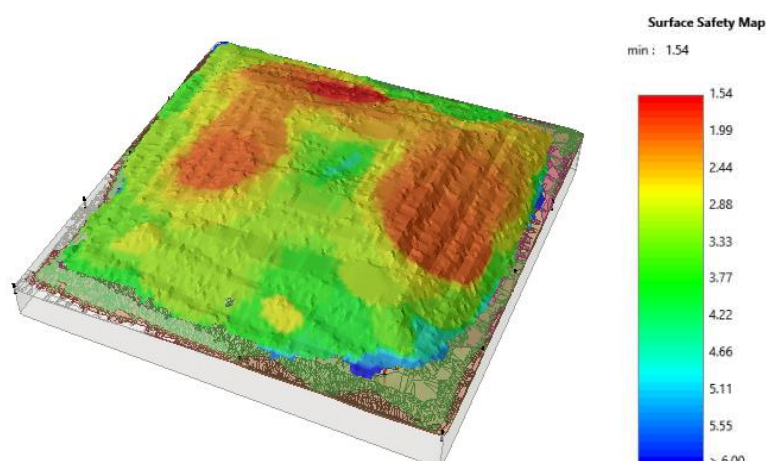
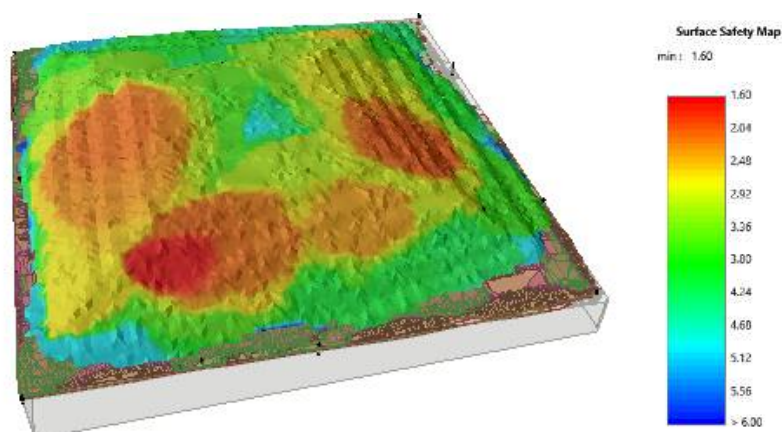


Figura 61 - Vista em perspectiva do fator de segurança espacializado na superfície 3D – Cenário 1 (área de menor FS)



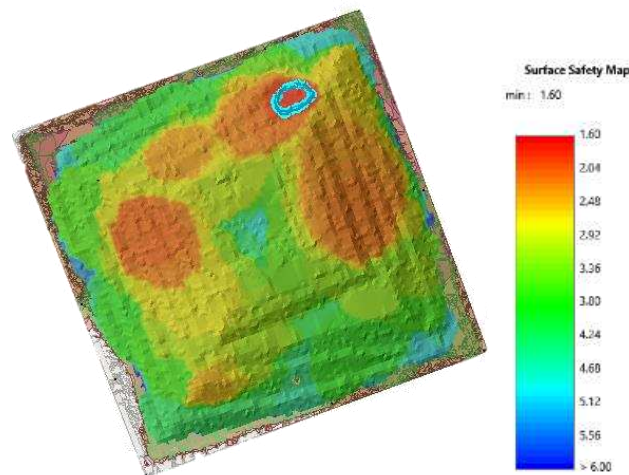
O FS obtido para o Cenário 1 do modelo é significativamente próximo às médias dos FS encontrados nas análises de estabilidade 2D. Enquanto no modelo estabilidade 3D, foi de 1,6, nas análises 2D realizadas no *software slope/w*, a média foi ligeiramente superior, atingindo 1,7. Por outro lado, ao utilizar o *slide2* o FS médio foi um pouco inferior, sendo 1,5.

Ao investigar as superfícies críticas de deslizamento nas análises de estabilidade bidimensional e tridimensional do Cenário 1, constata-se convergências em determinadas áreas e divergências em outras. Na seção A-X, a identificação da superfície de ruptura mais crítica pelo *slope/w* coincide com o resultado do modelo 3D, evidenciando consistência entre as metodologias. Entretanto, na proximidade da seção B-X, o fator de segurança do modelo 3D excede 1,2, indicando maior estabilidade em comparação com

as análises de estabilidade 2D. Nas seções C-X e D-X, a localização da superfície de ruptura crítica identificada pelo modelo 3D está em área próxima à obtida nas análises de estabilidade bidimensionais.

A Figura 86 ilustra a espacialização do FS do modelo 3D com a superfície de ruptura mais crítica referente a este FS destacada. Embora as análises de estabilidade 2D tenham fornecido uma visão detalhada das condições de estabilidade em cada seção específica, a análise 3D considera o sistema talude como um todo, levando em conta as interações tridimensionais entre os diferentes elementos do terreno e seções não avaliadas nas análises de estabilidade bidimensionais.

Figura 62 - Modelo tridimensional para o Cenário 1 - Espacialização do fator de segurança com a superfície de ruptura mais crítica em destaque



Uma interpretação possível desses resultados é que as análises de estabilidade 2D não capturam completamente as complexas interações tridimensionais que ocorrem no terreno. Por outro lado, a análise 3D fornece uma avaliação mais abrangente.

4.2.2 Análises tridimensionais para o Cenário 2

Para o Cenário 2 o FS de segurança obtido foi de 1,5, estando em conformidade com o mínimo recomendado pela NBR 11682 (ABNT, 2009). As Figuras 87 a 90 ilustra representações dos FS especializados referentes as análises de estabilidade 3D para o Cenário 2.

Figura 63 - Modelo tridimensional para o Cenário 2 - Espacialização do fator de segurança com a superfície de ruptura mais crítica em destaque

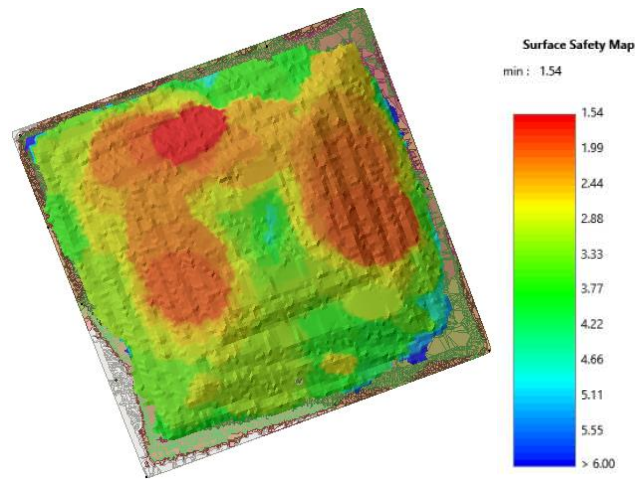
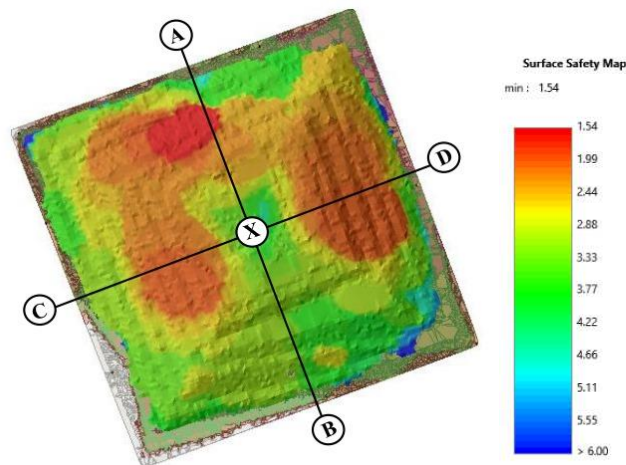


Figura 64 - Cortes AB e CD no modelo tridimensional para o Cenário 2 - Espacialização do fator de segurança



Ao comparar as superfícies de deslizamento críticas das análises de estabilidade bidimensional e tridimensional para esse cenário há uma convergência notável em algumas áreas, enquanto em outras há discrepâncias (Figuras 87 e 88). As Figura 89 e 90 apresentam vistas em perspectiva do FS de segurança espacializado, com destaque para área onde o FS foi crítico (Figura 90).

Figura 65 - Vista em perspectiva do fator de segurança especializado na superfície 3D – Cenário 1

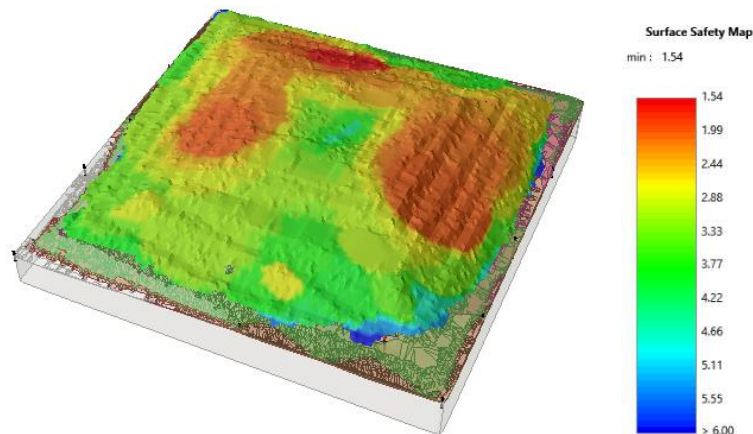
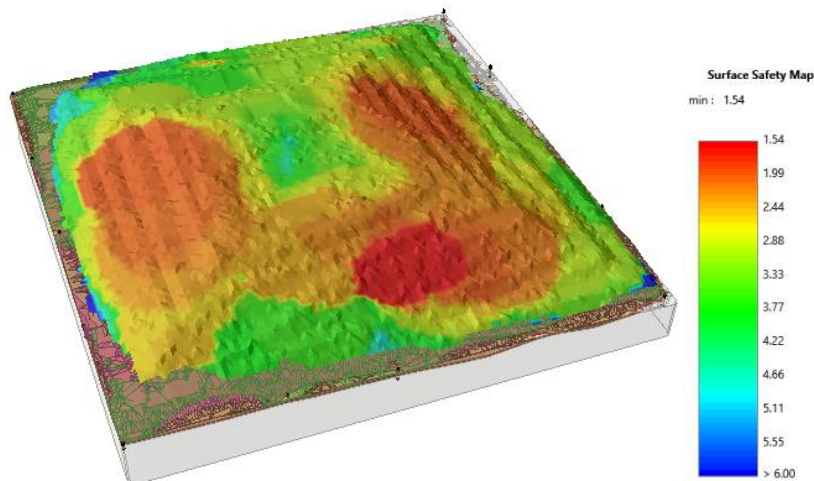


Figura 66 - Vista em perspectiva do fator de segurança especializado na superfície 3D – Cenário 2 (área de menor FS)



Assim como ocorreu no Cenário 1, o FS obtido para o Cenário 2 do modelo está notavelmente próximo às médias dos FS encontrados nas análises de estabilidade 2D. No modelo 3D, registrou-se um valor de 1,5, enquanto nas análises 2D conduzidas com o software *slope/w*, a média foi 1,4. Em contrapartida, ao empregar o *slide2*, o FS foi 1,6.

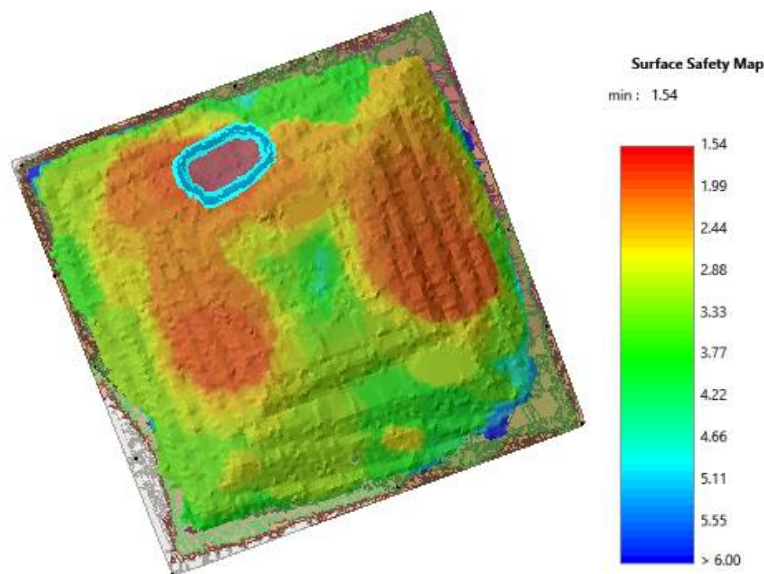
Na seção A-X, por exemplo, a superfície de ruptura mais crítica identificada pelo *slope/w* coincide com o resultado do modelo 3D, indicando consistência entre as abordagens de análise. No entanto, ao analisar a área próxima à seção B-X, observa-se que o FS do modelo 3D está acima de 1,2, sugerindo uma condição de melhor estabilidade para essa região em comparação com as análises de estabilidade 2D.

Na seção C-X, a superfície de ruptura mais crítica identificada pelo modelo 3D está localizada em uma área que difere daquela obtida nos resultados bidimensionais, em

ambos os *softwares* utilizados. A Figura 91 ilustra o mapa de segurança da Célula com a superfície de ruptura mais crítica em destaque. Essa disparidade indica que a modelagem tridimensional revelou características do terreno que não foram capturadas nas análises de estabilidade 2D. Na seção D-X, as superfícies de ruptura críticas foram identificadas em regiões semelhantes às do modelo 3D, sugerindo uma concordância entre as abordagens nessa área específica.

Cheng (2005) reanalisou a estabilidade do aterro de Kettleman que rompeu em 1988. Assim como neste estudo, por meio de análises bidimensionais e tridimensionais, os resultados apresentaram concordância geral entre as abordagens em algumas áreas do aterro, como a localização das superfícies críticas de ruptura, porém também foram identificadas diferenças em outras. O autor obteve fatores de segurança para o 3D ligeiramente maiores do que os valores de deformação plana associados. Essas discrepâncias refletem as diferentes abordagens de modelagem e análise utilizadas em cada estudo.

Figura 67 - Modelo tridimensional para o Cenário 2 - Espacialização do fator de segurança com a superfície de ruptura mais crítica em destaque



O estudo de Mitchell, Seed e Seed (1990) examinou a estabilidade de um aterro de resíduos perigosos por meio de análises de estabilidade 2D e 3D. As análises 2D forneceram fatores de segurança de 1,2-1,25 e 1,1-1,15 para o caso de umedecimento mínimo e o caso de umedecimento da base total, respectivamente, enquanto as análises 3D registraram 1,08 e 1,01 para esses dois casos. Esses resultados corroboram com os

obtidos nesta pesquisa, que indica uma proximidade entre os fatores de segurança médios das análises 2D e os obtidos na análise 3D.

Isso significa que, apesar das simplificações inerentes à modelagem bidimensional, as superfícies críticas identificadas permanecem consistentes quando a análise é expandida para o espaço tridimensional. Esse resultado fortalece a confiabilidade das análises de estabilidade bidimensionais, especialmente, quando se trata de identificar as áreas de maior risco de instabilidade, considerando que as seções críticas bidimensionais escolhidas para realizar as análises de estabilidade foram as de maior cota topográfica.

Portanto, enquanto as análises de estabilidade bidimensionais oferecem uma visão detalhada e localizada da estabilidade do talude referente as seções críticas, as análises de estabilidade tridimensionais fornecem uma avaliação mais abrangente, considerando as interações tridimensionais do terreno. Dessa forma, a combinação de ambas as abordagens fornece uma compreensão mais completa e precisa da estabilidade de taludes de aterros sanitários em diferentes cenários e condições.

5. CONCLUSÕES

Os fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade bidimensional e tridimensional elucidam que, de modo geral, os taludes do Aterro Sanitário em estudo podem ser considerados como estáveis, com algumas ressalvas decorrentes de divergências nas simulações numéricas, elevada saturação dos resíduos e simplificações nas análises que não consideram o efeito da pressão dos gases e dos processos degradativos dos resíduos.

A precisão das potenciais superfícies de ruptura crítica detectadas nas simulações numéricas das análises de estabilidade bidimensionais e tridimensionais está condicionada a qualidade e representatividade dos dados de entrada, enfatizando a importância da obtenção dos parâmetros geotécnicos dos RSU e dos solos por meio ensaios de campo e de laboratório, além de dados de nível piezométrico de líquidos provenientes de monitoramento das poropressões.

Por meio da aplicação de análises de sensibilidade tem-se que a maior variabilidade do FS à variação dos parâmetros de resistência está associada as propriedades dos RSU recém arretados em decorrência da sua baixa resistência ao cisalhamento desses resíduos.

Entres os *softwares* avaliados nas análises bidimensionais, o *slope/w* foi considerado o mais satisfatório para análises considerando o Cenário 2, identificando de forma mais precisa as superfícies de ruptura críticas em toda a seção analisada. Já para o Cenário 1, o *slide2* apresentou o melhor desempenho.

A similaridade entre os fatores de segurança resultantes das análises bidimensionais e tridimensionais indica que ambas as abordagens são válidas para avaliar a estabilidade de taludes de aterros sanitários, porém a análise tridimensional se destaca por obter avaliações mais amplas e abrangentes por considerar características e propriedades do maciço que análises em duas dimensões não consideram, destacando a capacidade de identificar áreas críticas que podem não ser detectadas nas análises de estabilidade em duas dimensões.

REFERÊNCIAS

ABRAMSON, L. (2002). **Slope Stability and Stabilization Methods**. John Wiley & Sons, Hoboken.

ABREU, A. E. S.; VILAR, O. M. Influence of composition and degradation on the shear strength of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 68, p. 263-274, 7 jun. 2017.

AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. AESA: Meteorologia – Chuvas. Campina Grande: AESA. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/?formdate=2019-0830&produto=municipio&periodo=anual>. Acesso em: 2 fevereiro. 2024.

ALBUQUERQUE, J. B. **Torres de. Resíduos sólidos**. Leme: Independente, 2011.

ANDRADES, S. A. de. **Estudo do fator de segurança de um aterro sanitário tipo convencional comparando com um aterro sanitário tipo encosta**. 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

ARAÚJO NETO, C. L. de. **Modelagem da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos para análises da estabilidade de taludes de aterros sanitários**. 2021. 295 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2021.

ARAÚJO NETO, C. L. **Análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para previsão das deformações de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

ARUNBABU, V.; INDU, K. S.; RAMASAMY, E. V. Leachate pollution index as an effective tool in determining the phytotoxicity of municipal solid waste leachate. **Waste Management**, v. 68, p. 329-336, out. 2017. Elsevier BV.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 10004:2004**. Resíduos Sólidos - Classificação. ABNT, Brasil.

AWAD-ALLAH, M. F. Field and numerical studies to evaluate slope stability in municipal solid waste sites. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 7, n. 2, p. 1-15, 7 fev. 2022.

BABU, G. L. S.; LAKSHMIKANTHAN, P.; SANTHOSH, L. G. Shear strength characteristics of mechanically biologically treated municipal solid waste (MBT-MSW) from Bangalore. **Waste Management**, v. 39, p. 63-70, maio 2015. Elsevier BV.

BAREITHER, C. A.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. Effects of Waste Composition and Decomposition on the Shear Strength of Municipal Solid Waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2012.

- BARLAZ, M. A.; SCHAEFER, D. M.; HAM, R. Bacterial population development and chemical characteristics of refuse decomposition in a simulated sanitary landfill. **Applied and environmental microbiology**, v. 55, n. 1, p. 55-65, 1989.
- BASHA, B. M.; RAVITEJA, K. V. N. S. Meethotamulla Landfill Failure Analysis: a probabilistic approach. *Developments In Geotechnical Engineering*, p. 341-351, 2018. Springer Singapore.
- BLIGHT, G. Slope failures in municipal solid waste dumps and landfills: a review. **Waste Management & Research**, v. 26, n. 5, p. 448-463, nov. 2008.
- Borgatto, A. V. A. (2006). **Estudo do Efeito Fibra e da Morfologia na Estabilidade de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro.157p.
- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010.
- BRAY, J. D. et al. Shear strength of municipal solid waste. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 135, n. 6, p. 709-722, 2009.
- BRETAS, T. C. **Retroanálise probabilística tridimensional por equilíbrio-limite de rupturas de talude em Belo Horizonte/MG**. 2020. 168 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- CAICEDO, B.; YAMIN, L.; GIRALDO, E.; CORONADO, O. Geomechanical properties of municipal solid waste in Doña Juana sanitary landfill. **Fourth International Congress in Environmental Geotechnics**, Rio de Janeiro, Brasil, v. 1, p. 177-182, 2002.
- CARVALHO, A. R. **Desenvolvimento de um equipamento para determinação de parâmetros geotécnicos de resíduos sólidos**. 2006. 180 p. Doutorado (Tese em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- CARVALHO, M. de F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- CASTRO ALVES, C. F.; BERTOLO, R. A. Geoquímica de águas subterrâneas impactadas por aterros de resíduos sólidos. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], v. 26, n. 1, 2012.
- CHAKRABORTY, A.; GOSWAMI, D. State of the art: three dimensional (3d) slope-stability analysis. **International Journal Of Geotechnical Engineering**, v. 10, n. 5, p. 493-498, 21 abr. 2016. Informa UK Limited.
- CHANG, Muhsung. Three-dimensional stability analysis of the Kettleman Hills landfill slope failure based on observed sliding-block mechanism. **Computers And Geotechnics**, v. 32, n. 8, p. 587-599, dez. 2005. DOI: 10.1016/j.compgeo.2005.11.002
- CHEN, R. H.; CHAMEAU, J. -L. Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes. **Géotechnique**, v. 33, n. 1, p. 31-40, mar. 1983. Thomas Telford Ltd.

Chowdhury, R.; Bhattacharya, G.; & Flentje, P. (2009). **Geotechnical slope analysis**. Crc Press.

Cirolini, A., Bruch, A. F., Marquezan, R. G., da Silva, F. M. M., & Carneiro, M. (2020). Análise da Estabilidade de Taludes do Aterro Sanitário de Rosário do Sul/RS. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, 16(5).

COX, Jason T.; YESILLER, Nazli; HANSON, James L. Implications of variable waste placement conditions for MSW landfills. **Waste Management**, [S.L.], v. 46, p. 338-351, dez. 2015. Elsevier BV.

DACIOLO, L. V. P. **Parâmetros de resistência de RSU: abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos**. 126f. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

DACIOLO, L. V. P.; CORREIA, N. S.; BOSCOV, M. E. G. Extensive database of MSW shear strength parameters obtained from laboratorial direct shear tests: proposal for data classification. **Waste Management**, v. 140, p. 245-259, mar. 2022. Elsevier BV.

DAMASCENO, L. G.; FERREIRA, P. H.; DUARTE, L. N.; SOUSA, D. H. S.; OLIVEIRA, T. APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM TALUDES DE ATERRO SANITÁRIO. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, [S.L.], p. 1-8, 12 mar. 2020. ABMS.

DATTA, S.; SIVAKUMAR BABU, G. L. Prediction of the slope stability of municipal solid waste landfills using the reliability analysis. **In: Geo-Chicago 2016**. 2016. p. 668-677.

DEHDARI, V.; AJDARI, M.; ROSTAMI, A. Experimental study on shear strength parameters of municipal solid waste employing a large direct shear apparatus. **Geomechanics And Geoengineering**, v. 17, n. 4, p. 1184-1199, 27 maio 2021.

DIXON, N.; JONES, D. R. V. Engineering properties of municipal solid waste. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, n. 3, p. 205-233, 2005.

Duncan JM, Wright SG. Soil strength and slope stability. Wiley, New York, 2005.

FAN, X.; HUANG, M.; LIU, Y.; WANG, H. Stability analysis of MSW slope layered by aging. **Japanese Geotechnical Society Special Publication**, v. 2, n. 50, p. 1753-1756, 2016. The Japanese Geotechnical Society.

FENG, S. J.; LU, S. F.; CHEN, H. X.; FU, W. D.; LÜ, F. Three-dimensional modelling of coupled leachate and gas flow in bioreactor landfills. **Computers And Geotechnics**, v. 84, p. 138-151, abr. 2017. Elsevier BV.

FENG, S.-J. et al. Stability analysis and control measures of a sanitary landfill with high leachate level. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 147, n. 10, p. 05021009, 2021.

FENG, S.-J.; CHEN, Z.-W.; CHEN, H.-X.; ZHENG, Q.-T.; LIU, R. Slope stability of landfills considering leachate recirculation using vertical wells. **Engineering Geology**, v. 241, p. 76-85, jul. 2018. Elsevier BV.

FENG, S.-J.; GAO, K.-W.; CHEN, Y.-X.; LI, Y.; ZHANG, L. M.; CHEN, H. X. Geotechnical properties of municipal solid waste at Laogang Landfill, China. **Waste Management**, v. 63, p. 354-365, maio 2017. Elsevier BV.

FREDLUND, D. G.; KRAHN, J. Comparison of slope stability methods. **Canadian Geotechnical Journal**, n. 14, p. 429-439, 1977.

FUCALE, S. P. **Influência dos componentes de reforço na resistência de resíduos sólidos urbanos**. Tese de Doutorado, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2005.

GAO, W. *et al.*, Storage capacity and slope stability analysis of municipal solid waste landfills. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 32, n. 4, p. 04018036, 2018.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GHASEMIAN, A.; KARIMPOUR-FARD, M.; NADI, B. Reliability analysis and risk assessment of a landfill slope failure in spatially variable municipal solid waste. **International Journal of Environmental Science and Technology**, p. 1-14, 2024.

GOMES, C.; LOPES, M. L.; OLIVEIRA, P. J. V. Municipal solid waste shear strength parameters defined through laboratorial and in situ tests. **Journal Of The Air & Waste Management Association**, v. 63, n. 11, p. 1352-1368, 24 jun. 2013. Informa UK Limited.

GOMES, F. C. M.; ZAIDAN, R. T.; ROCHA, C. H. B. Análise comparativa entre a aplicação de métodos de interpolação, para a geração de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 15, n. 5, p. 2448-2462, jun. 2022.

GUEDES, M. J. F. **Estudo das emissões de biogás em aterro de resíduos sólidos urbanos no semiárido brasileiro**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

HANSON, J. L.; YESILLER, N.; VON STOCKHAUSEN, S. A.; WONG, W. W. Compaction Characteristics of Municipal Solid Waste. **Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 8, p. 1095-1102, ago. 2010. American Society of Civil Engineers (ASCE).

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. The landslide handbook – A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. **Geological Survey Circular 1325**, 2008. 129p.

HUANG, M.; ZHANG, Z.; ZHU, B.; ZHANG, J.; XU, H. Effects of moisture content and landfill age on the shear strength properties of municipal solid waste in Xi'an, China. **Environmental Science And Pollution Research**, v. 30, n. 24, p. 65011-65025, 19 abr. 2023. Springer Science and Business Media LLC.

HUANG, M.; ZHANG, Z.; ZHU, B.; ZHANG, J.; XU, H. Effects of moisture content and landfill age on the shear strength properties of municipal solid waste in Xi'an, China. **Environmental Science And Pollution Research**, v. 30, n. 24, p. 65011-65025, 19 abr. 2023.

JAHANFAR, A.; GHARABAGHI, B.; MCBEAN, E. A.; DUBEY, B. K. Municipal Solid Waste Slope Stability Modeling: a probabilistic approach. **Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering**, [S.L.], v. 143, n. 8, p. 1-10, ago. 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE).

JAIN, P.; KO, J. H.; KUMAR, D.; POWELL, J.; KIM, H.; MALDONADO, L.; TOWNSEND, T.; REINHART, D. R. Case study of landfill leachate recirculation using small-diameter vertical wells. **Waste Management**, v. 34, n. 11, p. 2312-2320, nov. 2014. Elsevier BV.

JIANGUO, J.; YONG, Y.; SHIHUI, Y.; BIN, Y.; CHANG, Z. Effects of leachate accumulation on landfill stability in humid regions of China. **Waste Management**, v. 30, n. 5, p. 848-855, maio 2010.

JUAREZ, M.; MONDELLI, G.; GIACHETI, H. Shear strength of municipal solid waste rejected from material recovery facilities in the city of São Paulo, Brazil. **Soils And Rocks**, v. 46, n. 2, p. 1-10, 27 abr. 2023. ABMS - Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.

KE, H.; MA, P.; CHEN, Y.; DONG, D.; ZHAO, S.; YANG, Y.; NHEMA, C. C. Instability of municipal solid waste along the constant deviatoric stress path and its engineering significance. **Géotechnique**, v. 72, n. 11, p. 1025-1034, nov. 2022. Thomas Telford Ltd.

KE, H.; ZHANG, C. S.; HU, J.; QIN, R.; CHEN, Y. M.; LAN, J. W. Evaluation of leachate production and level in municipal solid waste landfills considering secondary compression. **Environmental Science And Pollution Research**, v. 29, n. 14, p. 20542-20555, 5 nov. 2021. Springer Science and Business Media LLC.

KERAMATI, M. *et al.*, Evaluating the stress–strain behavior of MSW with landfill aging. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 11, p. 6885–6894, 11 nov. 2018.

KERAMATI, M.; GOODARZI, S.; MOGHADAM, H. M.; RAMESH, A. Evaluating the stress–strain behavior of MSW with landfill aging. **International Journal Of Environmental Science And Technology**, v. 16, n. 11, p. 6885-6894, 11 nov. 2018. Springer Science and Business Media LLC.

KHANAL, S. K. **Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production**. 2008.

KHOSHAND, A.; FATHI, A.; ZOGHI, M.; KAMALAN, H. Seismic stability analyses of reinforced tapered landfill cover systems considering seepage forces. **Waste Management & Research**, v. 36, ed. 4, p. 361-372, 2018. DOI: 10.1177/0734242X18757628

KUMAR, S.; CHOUDHARY, S. S.; BURMAN, A. Recent advances in 3D slope stability analysis: a detailed review. **Modeling Earth Systems And Environment**, v. 9, n. 2, p. 1445-1462, 23 nov. 2022. Springer Science and Business Media LLC.

LI, Junchao; CHEN, Ruiqi; LIN, Haoyu. Limit Equilibrium Analysis of Landfill Instability Based on Actual Failure Surface. **Applied Sciences**, v. 13, n. 18, p. 10498, 20 set. 2023. DOI: 10.3390/app131810498

LI, X. L.; LI, J. F. A study of deformation and strength properties and stress-strain model for municipal solid waste (MSW). **Hydrogeology & Engineering Geology**, 43: 70–75, 2016.

LIMA, A. P. **Deformabilidade e estabilidade de taludes em solo grampeado**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: PUC-RIO, Departamento de Engenharia Civil, 2002, 180p.

LÜ, X.; XUE, D.; HUANG, M.; LIM, K. W. A shear hardening plasticity model with nonlinear shear strength criterion for municipal solid waste. **Computers and Geotechnics**, v. 104, p. 207-215, 2018.

LUO, H.; ZHAO, L.; ZHANG, Z. The impacts of social interaction-based factors on household waste-related behaviors. **Waste Management**, v. 118, p. 270-280, dez. 2020.

MA, W.; WENGA, T.; FRANDBSEN, F. J.; YAN, B.; CHEN, G. The fate of chlorine during MSW incineration: vaporization, transformation, deposition, corrosion and remedies. **Progress In Energy And Combustion Science**, v. 76, p. 100789, jan. 2020. Elsevier BV.

MACHADO, S. L.; CARVALHO, M. F.; VILAR, O. M. Constitutive model for municipal solid waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 128: 940–951, 2002.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MADON, I.; DREV, D.; LIKAR, J. Long-term risk assessments comparing environmental performance of different types of sanitary landfills. **Waste Management**, v. 96, p. 96-107, ago. 2019.

Massad, F. (2003). **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos.

MEDEIROS, R. M.; NORBERTO, A. S.; MARIANO, M. O. H. Avaliação de estabilidade de taludes de aterros sanitários. **Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales**. Investigación, Desarrollo y Práctica, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 749, 6 dez. 2020. Universidad Nacional Autonoma de Mexico.

MEHDIZADEH, M. J.; SHARIATMADARI, N.; KARIMPOUR-FARD, M. Probabilistic slope stability analysis in Kahrizak landfill: effect of spatial variation of msw's geotechnical properties. **Bulletin Of Engineering Geology And The Environment**, [S.L.], v. 79, n. 5, p. 2679-2695, 2 jan. 2020. Springer Science and Business Media LLC.

MEHDIZADEH, M. J.; SHARIATMADARI, N.; KARIMPOUR-FARD, M. Probabilistic slope stability analysis in Kahrizak landfill: effect of spatial variation of MSW's geotechnical properties. **Bulletin Of Engineering Geology And The Environment**, v. 79, n. 5, p. 2679-2695, 2 jan. 2020. Springer Science and Business Media LLC.

MITCHELL, J. K.; BRAY, J. D.; MITCHELL, R. A. Material Interactions in Solid Waste Landfills. In: GEOENVIRONMENT 2000 - Characterization, Containment, Remediation, And Performance In Environmental Geotechnics. New Orleans, Louisiana: ASCE, **Geotechnical Special Publication** n.46, 1995, p.568-590.

MITCHELL, James K.; SEED, Raymond B.; SEED, H. Bolton. Falha na encosta do aterro de resíduos de Kettleman Hills. I: Propriedades do sistema liner. **Revista de engenharia geotécnica**, v. 116, n. 4, pág. 647-668, 1990.

NANDA, S.; BERRUTI, F. Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, n. 2, p. 1433–1456, 2021.

NASCIMENTO, J. C. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

NORBERTO, A. de S. *et al.*, Análise estatística da variabilidade de parâmetros de resistência ao cisalhamento de aterros sanitários. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 1, p. 108-116, 2020.

OLIVEIRA, D. A. F. **Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos**. 2002, 154 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2002.

OLIVEIRA, D. M. A. de. **Análise de estabilidade tridimensional e estudo de sensibilidade dos parâmetros condicionantes da ruptura de um talude de cava**. 2020. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

OWEIS, I. S. **Stability of Landfills. In: Geotechnical Practice for Waste Disposal**. Edited by David E. Daniel. Published in 1993 by Chapman & Hall, London.

PASALARI, H.; FARZADKIA, M.; GHOLAMI, M.; EMAMJOMEH, M. M. Management of landfill leachate in Iran: valorization, characteristics, and environmental approaches. **Environmental Chemistry Letters**, v. 17, n. 1, p. 335-348, 6 set. 2018. Springer Science and Business Media LLC.

RAHARDJO, H.; FREDLUND, D. G. General limit equilibrium method for lateral earth force. **Canadian Geotechnical Journal**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 166-175, 1 fev. 1984. Canadian Science Publishing.

RAMAIAH, B. J.; RAMANA, G. V. Study of stress-strain and volume change behavior of emplaced municipal solid waste using large-scale triaxial testing. **Waste Management**, v. 63, p. 366-379, maio 2017. Elsevier BV.

RAMAIAH, B. J.; RAMANA, G. V.; DATTA, M. Mechanical characterization of municipal solid waste from two waste dumps at Delhi, India. **Waste Management**, v. 68, p. 275–291, 2017.

RAVITEJA, K. V. N. S.; BASHA, B. M. Characterization of Variability of Unit Weight and Shear Parameters of Municipal Solid Waste. **Journal Of Hazardous, Toxic, And Radioactive Waste**, v. 25, n. 2, p. 1-10, abr. 2021.

REIS, R. F. **Sistema de medição automatizado e com transmissão de dados para monitoramento de recalques em obras de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

REMÉDIO, F. H. **Análise de estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com Nspt**. 2014. 130 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2014.

ROCSCIENCE. **Slide 3: documentation and theory overview**. Documentation and Theory Overview. 2024b. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/slide3/overview>. Acesso em: 20 fev. 2024.

ROCSCIENCE. **slide2: documentation and theory overview**. Documentation and Theory Overview. 2024a. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/slide2/overview>. Acesso em: 20 fev. 2024.

SAEED, M. S.; MAAREFVAND, P.; YAAGHUBI, E. Two and three-dimensional slope stability analyses of final wall for Miduk mine. **International Journal Of Geo-Engineering**, v. 6, n. 1, p. 1-13, 8 set. 2015. Springer Science and Business Media LLC.

SANTOS, S. M.; PONTES, FILHO, I.; JUCÁ, J. F. T.; SANTOS, E. A. **Simulação Numérica de Provas de Carga Realizadas em um Aterro de Resíduos Sólidos**. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Vol.I, Brasília. 1998.

SARSBY, R. **Environmental Geotechnics**. ICE Publishing, 2013.

SEED, R. B.; MITCHELL, J. K.; SEED, H. B. Kettleman Hills waste landfill slope failure. II: Stability analyses. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 116, n. 4, p. 669-690, 1990.

SEQUEENT. **Stability modeling with geostudio**. 2023. Disponível em: <https://downloads.geoslope.com/geostudioresources/books/23/1/SlopeStabilityModeling.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2024.

SHARIATMADARI, N.; SADEGHPOUR, A. H.; RAZAGHIAN, F. Effects of aging on the shear strength behavior of municipal solid waste. **International Journal of Civil Engineering**, v. 12, n. 3, p. 226-237, 2014.

SHENG, Hui; REN, Yinbang; HUANG, Man; ZHANG, Zhenying; LAN, Jiwu. Vertical Expansion Stability of an Existing Landfill: a case study of a landfill in xi an, china. **Advances In Civil Engineering**, v. 2021, p. 1-14, 7 jul. 2021.

SILVA JÚNIOR, P. C. da. **Análise probabilística de estabilidade de um talude grampeado sobre emboque de um túnel**. 2023. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

SILVA, D. L. M. da. **Mecanismos de transporte de metais pesados em misturas de solos utilizados como camada de base em aterro sanitário.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2023.

SILVA, J. P. M. da. **Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes.** 2011. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2011.

Silva, R. A. C. da; Moura, A. S.; Carneiro, A. de A.; Pinheiro, C. G.; Vasconcelos, S. M. S. Utilização de ensaios de campo para a avaliação da resistência mecânica de um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos (RSU). **Geosciences**, v. 40, n. 3, p. 673-692, 18 out. 2021. UNESP - Universidade Estadual Paulista.

SILVA, T. F. da. **Estudo de mistura de solos para impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

SILVEIRA, A. L. da; BERTÉ, R.; PELANDA, A. M. **Gestão de Resíduos Sólidos: Cenários e mudanças de paradigmas.** Curitiba: Intersaberes, 2018.

SIMÕES, G. F. **Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos.** 2000. 139p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A. Monitoring and modeling of long-term settlements of an experimental landfill in Brazil. **Waste Management**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 420-430, fev. 2013. Elsevier BV.

SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A.; GALVÃO, T. C. B.; BATISTA, H. P. (2003). Monitoramento Geotécnico de Aterros Sanitários - A Experiência da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040 em Belo Horizonte - MG. **In: 5 Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental**, 2003, Porto Alegre. Anais do 5 Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2003.

SOARES, N. D. **Resistência dos resíduos sólidos urbanos em função do nível de compactação e presença de plásticos moles.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.

SOUZA, J. C. M. de. **Condições Intervenientes Nas Emissões Fugitivas De Biogás Em Camada De Cobertura De Solo Compactado Em Aterros Sanitários.** 2021. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-Pb, 2021.

STARK, T. D.; EID, H. T. Performance of three-dimensional slope stability methods in practice. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 124, n. 11, p. 1049-1060, 1998.

STARK, T. D.; HUVAJ-SARIHAN, N.; LI, G. Shear strength of municipal solid waste for stability analyses. **Environmental Geology**, v. 57, n. 8, p. 1911–1923, 2009.

STRAUSS, M. **Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

TAPAHUASCO, W. F. C. **Análise do comportamento de maciços sanitários e proposta de um novo modelo de previsão de recalques considerando a parcela de biodegradação**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

TOWNSEND, T. G.; POWELL, J.; JAIN, P.; XU, Q.; TOLAYMAT, T.; REINHART, D. **Sustainable Practices for Landfill Design and Operation**. New York: Springer, 2015.

VILAR, O.M. (2021) – **Fundamentos da Mecânica dos Solos Não Saturados**, 623p. São Carlos, 2021.

YANG, R. *et al.*, A review of characteristics of landfilled municipal solid waste in several countries: Physical composition, unit weight, and permeability coefficient. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 27, n. 6, p. 2425–2435, 2018.

YUAN, Xukai; ZHANG, Xin. Research on slope stability of quarry based on geostudio and madis/Gts. **World Scientific Research Journal**, v. 7, n. 12, p. 96-105, 2021.

ZEKKOS, D.; BRAY, J. D.; RIEMER, M. F. Drained response of municipal solid waste in large-scale triaxial shear testing. **Waste Management**, 32: 1873–1885, 2012.

ZHAN, T. L. T.; CHEN, Y. M.; LING, W. A. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. **Engineering Geology**, v. 97, n. 3-4, p. 97-111, abr. 2008. Elsevier BV.

ZHANG, Z.; WANG, Y.; FANG, Y.; PAN, X.; ZHANG, J.; XU, H. Global study on slope instability modes based on 62 municipal solid waste landfills. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [S.L.], v. 38, n. 12, p. 1389-1404, 2 out. 2020. SAGE Publications.

ZHOU, X. P.; CHENG, H. Analysis of stability of three-dimensional slopes using the rigorous limit equilibrium method. **Engineering Geology**, v. 160, p. 21-33, jun. 2013. Elsevier BV.

APÊNDICE A

Figura 68 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção B – X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 1 *software slope/w*

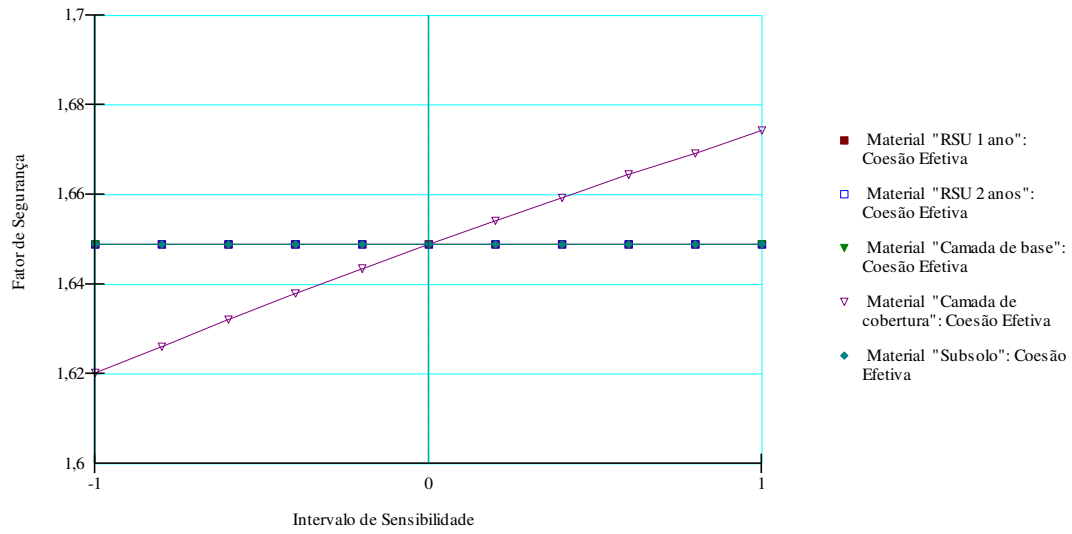


Figura 69 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção B – X (Corte AB) variando a coesão - Cenário 1 *software slide2*

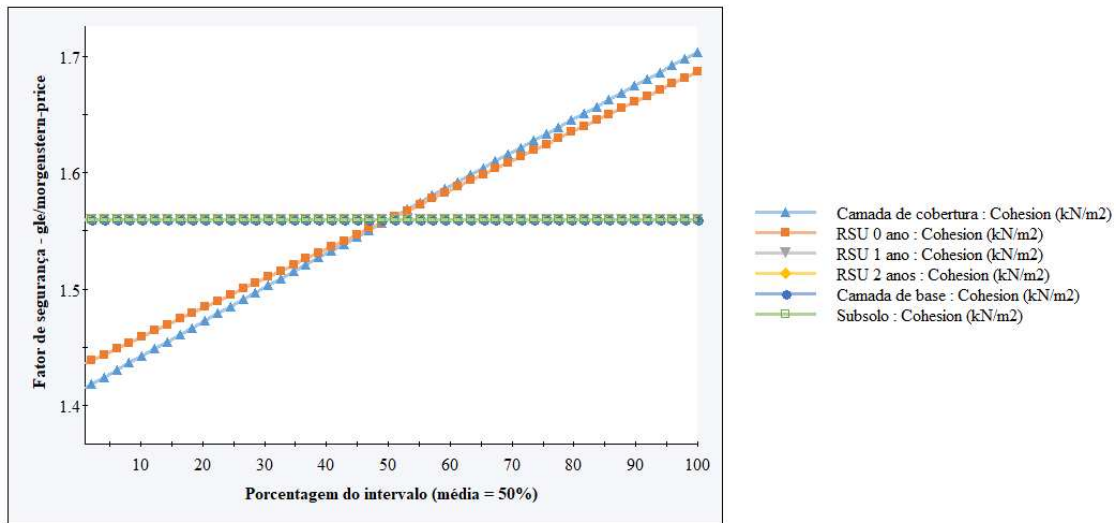


Figura 70 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção B – X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 *software slope/w*

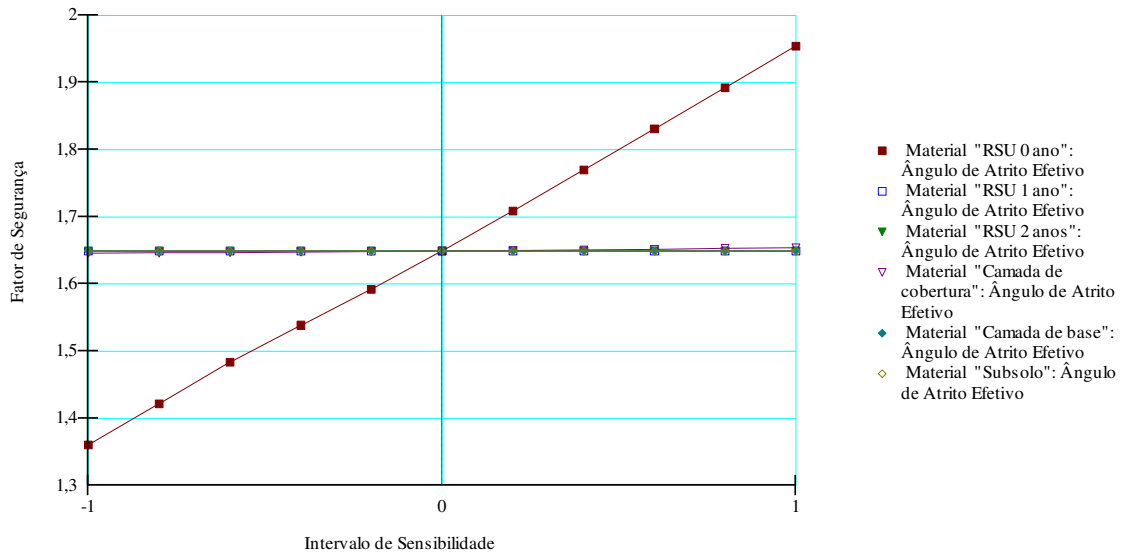


Figura 71 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção B – X (Corte AB) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 *software slide2*

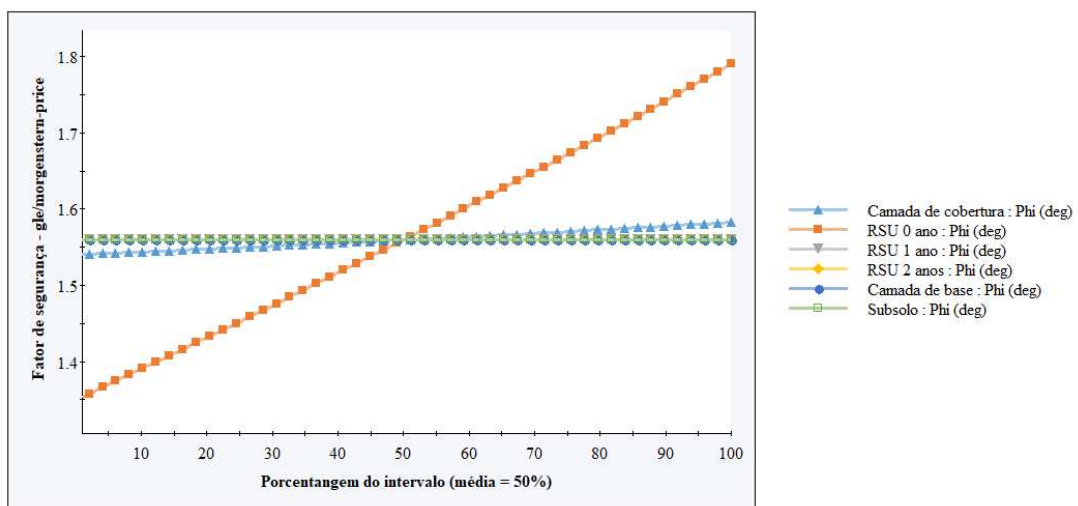


Figura 72 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção C – X (Corte CD) variando a coesão - Cenário 1 *software slope/w*

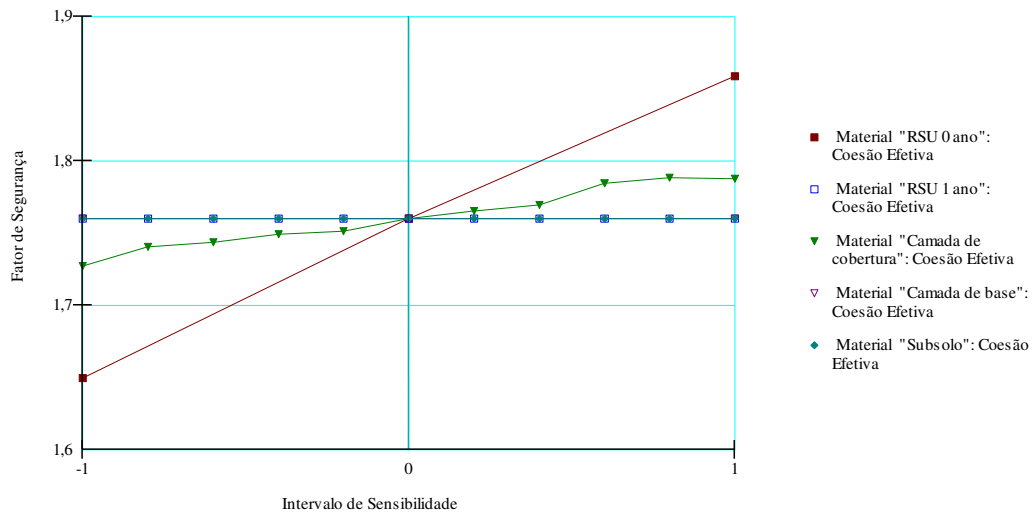


Figura 73 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção C – X (Corte CD) variando a coesão - Cenário 1 *software slide2*

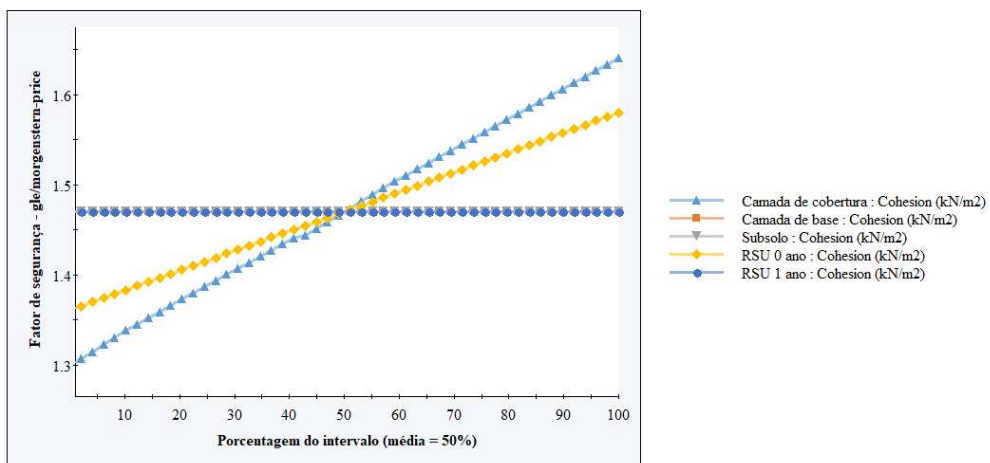


Figura 74 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção C – X (Corte CD) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 *software slope/w*

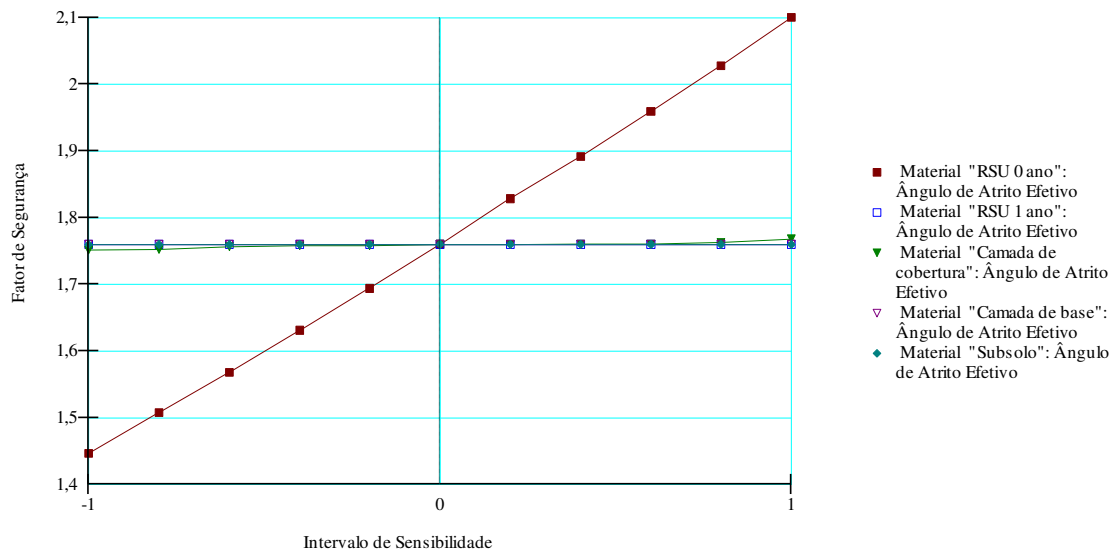


Figura 75 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção C – X (Corte CD) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 *software slide2*

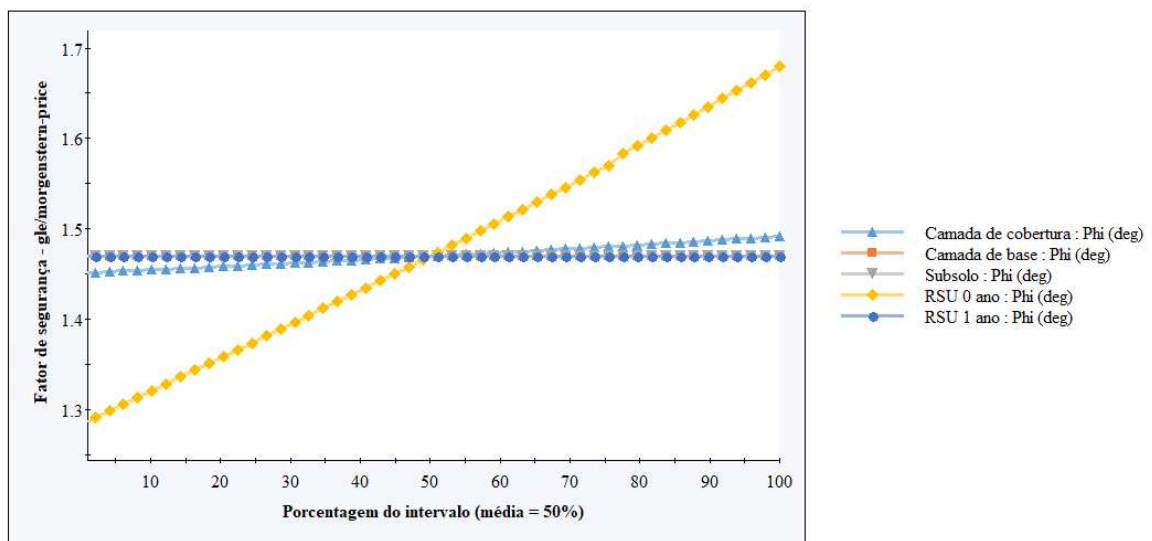


Figura 76 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção D – X (Corte CD) variando a coesão - Cenário 1 *software slope/w*

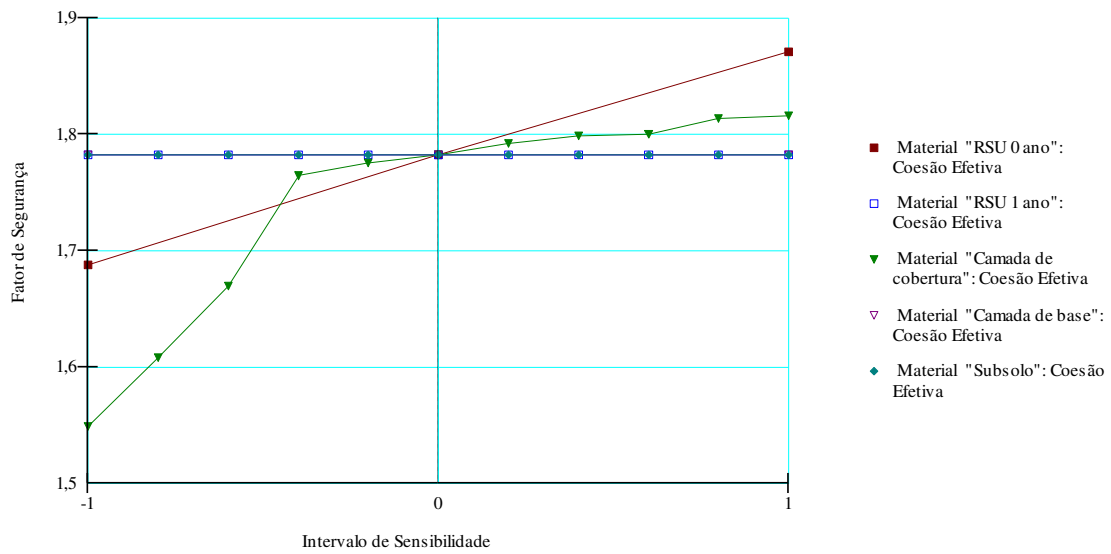


Figura 77 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção D – X (Corte CD) variando a coesão - Cenário 1 *software slide2*

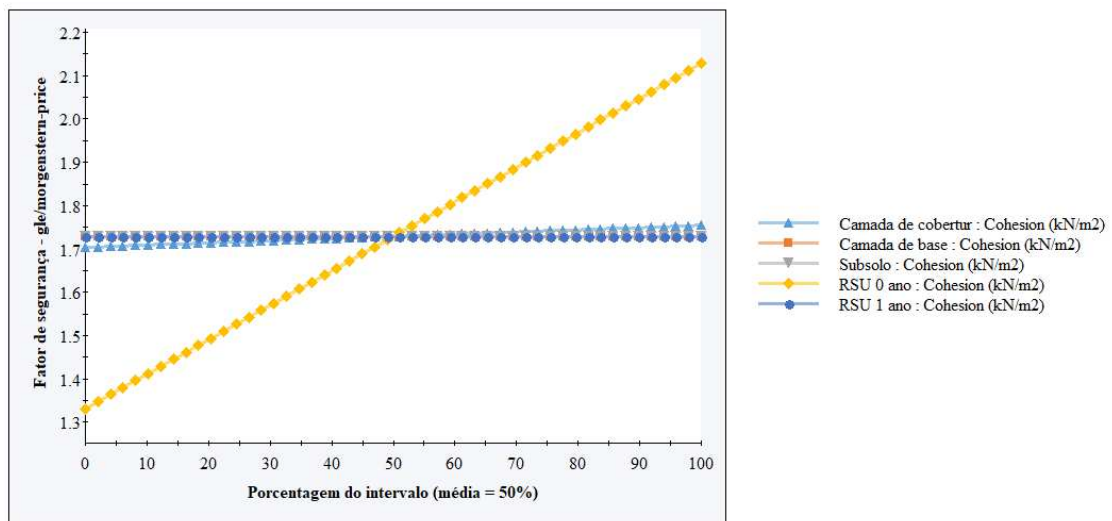


Figura 78 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção D – X (Corte CD) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 *software slope/w*

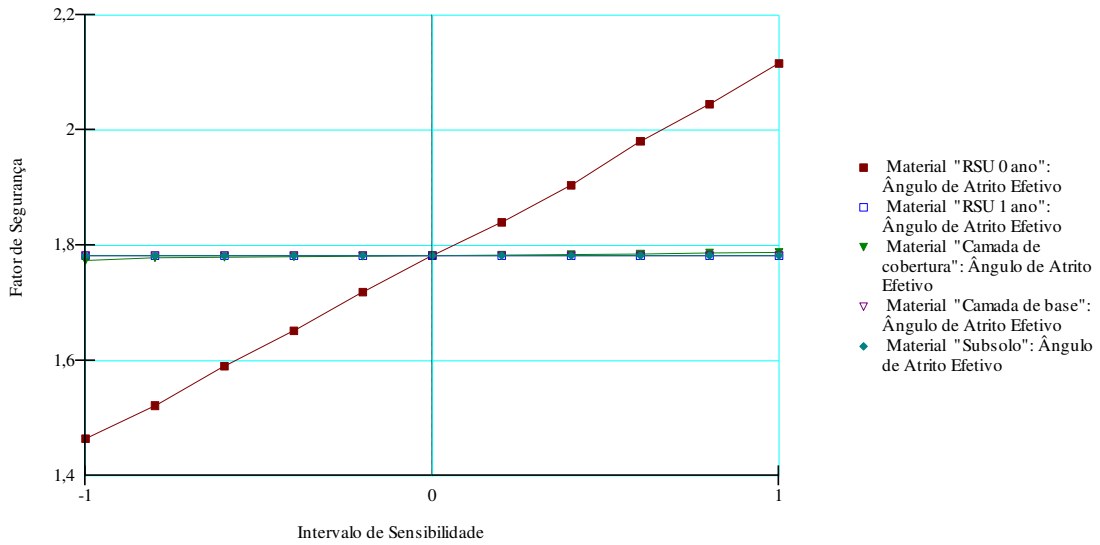


Figura 79 - Resultado da análise de sensibilidade da Seção D – X (Corte CD) variando o ângulo de atrito - Cenário 1 *software slide2*

