



INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS

CAMPUS MACEIÓ

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

SHELDON CRISTIANO SOUZA DA SILVA

DANIEL VINICIUS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE DO COMPLEXO
DA CHÃ DA JAQUEIRA, MACEIÓ-AL**

MACEIÓ, AL

2025

SHELDON CRISTIANO SOUZA DA SILVA
DANIEL VINICIUS DA SILVA

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE DO COMPLEXO DA
CHÃ DA JAQUEIRA, MACEIÓ-AL

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Instituto Federal de Alagoas Maceió como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof.^a Dra. Taise Monique De Oliveira Carvalho.

Coorientador: Prof. MSc. André Pinto Rocha.

MACEIÓ, AL

2025



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal de Alagoas
Campus Maceió
Biblioteca Benevides Monte

631.4
S586a

Silva, Sheldon Cristiano Souza da.
Avaliação da estabilidade de um talude do complexo da Chã da Jaqueira, Maceió - AL [recurso eletrônico] / Sheldon Cristiano Souza da Silva, Daniel Vinicius da Silva. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 6,92 MB). – 2025.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: Internet.

Orientação: Profa. Dra. Taise Monique De Oliveira Carvalho.

Coorientação: Prof. Dr. André Pinto Rocha.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Alagoas, *Campus Maceió*, Maceió, 2025.

1. Engenharia Civil. 2. Encostas urbanas – Estudo. 3. Encostas – Análise. 4. Barreiras – Formação. 4. Risco geotécnico. 5. Talude – Chã da Jaqueira. I. Silva, Daniel Vinicius da. II. Título.

Franciane Monick Gomes de França
Bibliotecária – CRB 4/1831

SHELDON CRISTIANO SOUZA DA SILVA
DANIEL VINICIUS DA SILVA

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDE DO COMPLEXO DA
CHÃ DA JAQUEIRA, MACEIÓ-AL

Trabalho de conclusão de curso (TCC) apresentado à
Banca do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do
Instituto Federal de Alagoas – Campus Maceió.

Aprovado em: 30/06/2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dra. Taíse Monique de Oliveira Carvalho (Orientadora)
Instituto Federal de Alagoas – IFAL

Prof. MSc. André Pinto Rocha
Instituto Federal de Alagoas – IFAL (Coorientador)

Prof^a. MSc. Celene Alves da Silva
Instituto Federal de Alagoas – IFAL

Prof. MSc. Ilames Jordan Gama de Moraes
Instituto Federal de Alagoas – IFAL

AGRADECIMENTO

A Deus, minha gratidão é imensa pela Sua presença constante em minha vida. Aos meus pais, Maria Lúcia e Edmundo Francisco da Silva Jr., e à minha futura esposa, que sempre me incentivaram e apoiaram ao longo da trajetória do curso.

Aos meus amigos, em especial Sheldon Cristiano, Élio Cardozo e Isabelle Cristine. Ao Instituto Federal de Alagoas, por ter contribuído com toda a jornada do curso. À professora Dr^a. Taise Monique de Oliveira Carvalho e ao Me. André Pinto Rocha, pelos ensinamentos no desenvolvimento deste trabalho.

À Polícia Militar do Estado de Alagoas, especialmente ao Regimento de Policiamento Montado (RPMon), que concedeu o local para os estudos.

Ao engenheiro Eric Juliano, por todo o apoio no desenvolvimento do trabalho. À empresa que me deu grande apoio durante a jornada do curso.

A todos aqueles que de alguma forma participaram desta trajetória.

Muito Obrigado!

Daniel Vinicius da Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria para enfrentar cada desafio ao longo dessa caminhada acadêmica. Sem Sua presença constante em minha vida, nada disso seria possível.

À minha esposa, Nayara Rodrigues, meu amor e minha base, agradeço por todo o apoio incondicional, paciência e encorajamento nos momentos mais difíceis. Sua presença foi essencial para que eu nunca desistisse.

Aos meus pais e irmãos, agradeço pelo amor, pela educação e pelos valores que me foram transmitidos desde sempre. Cada conquista minha é também de vocês.

Ao meu parceiro de jornada, Daniel Vinícius, agradeço pela dedicação, companheirismo e pelo trabalho em equipe ao longo da construção deste trabalho. Foi uma honra dividir essa etapa com você.

À minha orientadora, professora Taise Monique, agradeço pela orientação precisa, pela paciência e por todo o conhecimento compartilhado. Sua contribuição foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Ao professor André Pinto, meu coorientador, sou grato pela colaboração, pelas sugestões e pelo apoio técnico que enriqueceram ainda mais esta pesquisa.

Por fim, estendo meus agradecimentos a toda a comunidade do Instituto Federal de Alagoas – IFAL, em especial ao Campus Maceió, pelo ambiente de aprendizado, apoio institucional e pelas oportunidades que contribuíram de forma significativa para minha formação acadêmica e pessoal. Professores, técnicos, colegas e colaboradores: cada um teve um papel importante nesta jornada, e sou grato por fazer parte dessa instituição.

A todos vocês, meu sincero muito obrigado.

Sheldon Cristiano Souza da Silva

*"Entrega o teu caminho ao Senhor;
confia nele, e ele o fará." - Salmos
37:5*

RESUMO

O crescimento desordenado das áreas urbanas tem intensificado a ocupação de encostas suscetíveis à instabilidade, especialmente em regiões inseridas na Formação Barreiras, onde as intervenções antrópicas alteram significativamente o equilíbrio natural do terreno. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a estabilidade de um talude localizado na Rua Prefeito Joatas Malta de Alencar, no Complexo Chã da Jaqueira, em Maceió-AL, área com histórico de deslizamentos. A metodologia adotada envolveu a caracterização fisiográfica da área, levantamentos topográficos e geotécnicos, ensaios laboratoriais de caracterização dos solos e modelagem computacional no software SLOPE/W, utilizando os métodos de Bishop e Morgenstern-Price. Os solos da encosta foram classificados, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), como areia argilo-siltosa (AM-01) e areia argilosa (AM-02), ambos pertencentes à Formação Barreiras. A AM-01 apresentou baixa plasticidade, granulometria mal graduada e densidade real de 2,65 g/cm³. Já a AM-02 apresentou plasticidade média e densidade real de 2,67 g/cm³. A densidade real obtida é compatível com a mineralogia típica da Formação Barreiras. A geomorfologia local insere-se no compartimento dos Tabuleiros Costeiros, com superfícies dissecadas, vales encaixados, drenagem mal estruturada e intensa atuação de processos erosivos. A partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), foram definidos três perfis topográficos considerados mais críticos para a análise de estabilidade: Seção 1, Seção 2 e Seção 3. Durante a modelagem computacional, foram simulados dois cenários principais: um considerando o peso específico natural dos solos e outro utilizando o peso específico saturado, representando condições mais críticas de umidade. Em ambos os cenários a modelagem computacional indicou que a Seção 3 apresentou um Fator de Segurança (FS) inferior a 1,0, caracterizando um talude instável; e a Seção 1 e 2 apresentaram FS \approx 1,2, representando uma condição de alerta. A instabilidade observada está possivelmente associada à heterogeneidade litológica, à declividade acentuada da encosta devido à ocupação antrópica e à ausência de obras de contenção, evidenciando a necessidade de medidas mitigadoras para garantir a segurança da área analisada.

Palavras-chave: estudo de encostas urbanas; formação barreiras; risco geotécnico. análise de encostas; SLOPE/W.

ABSTRACT

The disorderly growth of urban areas has intensified the occupation of slopes susceptible to instability, especially in regions within the Barreiras Formation, where anthropogenic interventions significantly alter the natural balance of the terrain. In this context, the present study aims to evaluate the stability of a slope located on Rua Prefeito Joatas Malta de Alencar, in the Complexo Chã da Jaqueira, Maceió-AL, an area with a history of landslides. The methodology involved physiographic characterization of the area, topographic and geotechnical surveys, laboratory tests for soil characterization, and computational modeling using the SLOPE/W software, applying the Bishop and Morgenstern-Price methods. The soils on the slope were classified, according to the Unified Soil Classification System (USCS), as clayey-silty sand (AM-01) and clayey sand (AM-02), both belonging to the Barreiras Formation. AM-01 exhibited low plasticity, poorly graded granulometry, and a specific gravity of 2.65 g/cm^3 . AM-02 showed medium plasticity and a specific gravity of 2.67 g/cm^3 . The obtained specific gravity is consistent with the typical mineralogy of the Barreiras Formation. The local geomorphology belongs to the Coastal Plateaus compartment, characterized by dissected surfaces, entrenched valleys, poorly structured drainage, and intense erosive processes. From the Digital Elevation Model (DEM), three topographic profiles were defined as the most critical for stability analysis: Section 1, Section 2, and Section 3. During computational modeling, two main scenarios were simulated: one considering the natural unit weight of the soils and another using the saturated unit weight, representing more critical moisture conditions. In both scenarios, the modeling indicated that Section 3 presented a Factor of Safety (FS) below 1.0, characterizing an unstable slope; Sections 1 and 2 presented $FS \approx 1.2$, indicating a warning condition. The observed instability is possibly associated with lithological heterogeneity, the steep slope caused by anthropogenic occupation, and the absence of retaining structures, highlighting the need for mitigation measures to ensure the safety of the analyzed area.

Keywords: study of urban slopes; barreiras formation; geotechnical risk; slope analysis; SLOPE/W.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Queda de blocos	21
Figura 2: Escoamento – Rastejo	22
Figura 3: Escorregamentos	22
Figura 4: Equilíbrio das forças.....	25
Figura 5: Equilíbrio dos momentos.....	25
Figura 6: Composição vetorial de forças em uma fatia pela metodologia de Fellenius (1927)	28
Figura 7: Força no método das fatias	30
Figura 8: Exemplos de superfícies de ruptura não circular	31
Figura 9: Forças atuantes nas fatias pela metodologia de Morgenstern-Price	32
Figura 10: Tipos de superfícies de ruptura de um talude (a) superfície planar, (b) superfície em cunha e (c) superfície circular	34
Figura 11: Critério proposto por Mohr para a resistência de materiais	35
Figura 12: Ondulação geoidal, superfície geoidal e elipsoidal	37
Figura 13: Posicionamento estático relativo	38
Figura 14: Superposição lateral	40
Figura 15: Superposição Longitudinal	40
Figura 16: Alvo natural (a) e alvo artificial (b)	41
Figura 17: Janela de Voo	42
Figura 18: Ortomosaico.....	43
Figura 19: Fluxograma representativo das etapas metodológicas desenvolvidas na pesquisa	44
Figura 20: Mapa de Localização	46
Figura 21: (a) Coleta de amostras deformadas e análise estratigráfica, (b) Coleta de amostras indeformadas.....	48
Figura 22: Levantamento GNSS receptor Base, Marco geodésico IFAL001 (Ponto Base)	50
Figura 23: Levantamento geodésico dos pontos P1 e P2	50
Figura 24: Levantamento GNSS – Levantamento geodésico dos pontos P3 e P4 ...	50
Figura 25: Materialização dos pontos de apoio	51
Figura 26: DJI Phantom 4 RTK	53
Figura 27: Plano de voo	54

Figura 28: Receptor GNSS DJI D-RTK2	55
Figura 29: Alvos artificiais para identificação durante plano de voo.....	55
Figura 30: (a) Destorroamento da amostra, (b) Quarteamento da amostra	57
Figura 31: (a) Aparelho Casagrande, (b) Abertura da ranhura.	64
Figura 32: (a) Corpo de prova moldado sobre uma placa de vidro, (b) Pesagem das amostras.	65
Figura 33: Pós-processamento e ajustamento de coordenadas.....	68
Figura 34: Software Agisoft Metashape.....	70
Figura 35: (a) Fotos carregadas, (b) Alinhamento das imagens.	71
Figura 36: (a) Nuvens de pontos densa, (b) Classificação da nuvem de pontos densa.	72
Figura 37: Modelo Digital de Superfície.....	72
Figura 38: Modelo digital de terreno.....	73
Figura 39: Ortomosaico.....	74
Figura 40: Criação das seções do talude.	75
Figura 41: Software SLOPE/W.....	76
Figura 42: Mapa geológico.....	82
Figura 43: Classificação climática de Köppen para o Estado de Alagoas.....	83
Figura 44: Interseção entre os setores censitários, mancha urbana e áreas de risco.	85
Figura 45: Talude analisado.....	86
Figura 46: Curva granulométrica (com e sem defloculante) - Amostra AM – 01.	87
Figura 47: Sistemas de classificação de solos.	87
Figura 48: Gráfico limite de liquidez (AM - 01).....	89
Figura 49: Curva granulométrica (com e sem defloculante) - Amostra AM – 02.....	91
Figura 50: Gráfico limite de liquidez (AM -02).....	92
Figura 51: Seção 1: Análise do FS com o método de Bishop (Peso específico natural).	97
Figura 52: Seção 1: Análise do FS com o método de Morgenstern-Price (Peso específico natural).....	97
Figura 53: Seção 2: Análise do FS com o método de Bishop (Peso específico natural).	98

Figura 54: Seção 2: Análise do FS com o método de Morgenstern-Price (Peso específico natural).....	98
Figura 55: Seção 3: Análise do FS com o método de Bishop (Peso específico natural).	99
Figura 56: Seção 3: Análise do FS com o método de Morgenstern-Price (Peso específico natural).....	99
Figura 57: Seção 1: Análise do FS com o método de Morgenstern-Price (Peso específico saturado).....	100
Figura 58: Seção 1: Análise do FS com o método de Bishop (Peso específico saturado).....	100
Figura 59: Seção 2: Análise do FS com o método de Morgenstern-Price (Peso específico saturado).....	101
Figura 60: Seção 2: Análise do FS com o método de Bishop (Peso específico saturado).....	101
Figura 61: Seção 3: Análise do FS com o método de Morgenstern-Price (Peso específico saturado).....	102
Figura 62: Seção 3: Análise do FS com o método de Bishop (Peso específico saturado).....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Estimativa de precisão para posicionamento GNSS Relativo	39
Tabela 2: Coordenada da base IFAL001 (SIRGAS2000; Projeção UTM fuso 25S)..	49
Tabela 3: Registro da coleta de dados do GNSS	52
Tabela 4: Quantidade de material em função da dimensão dos sólidos maiores	58
Tabela 5: Tabela A1- Massa específica da água, em g/cm ³ entre 0 °C e 40 °C	60
Tabela 6: Quantidade de amostra para análise granulométrica	62
Tabela 7: Resumo do processamento.....	68
Tabela 8: Modelo para conversão de altitudes geométricas (dadas pelos GNSS) em altitudes físicas	69
Tabela 9: Comparativo entre o método de Bishop e Morgenstern-Price	77
Tabela 10: Parâmetros de resistência das amostras compactadas e dos blocos indeformados	78
Tabela 11: Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.....	79
Tabela 12: Normais climatológicas para o período de 1991-2020	83
Tabela 13: Classificação do solo AM - 01 conforme ABNT	88
Tabela 14: Parâmetros da curva granulométrica (AM - 01)	88
Tabela 15: Limite de Plasticidade (AM - 01).....	89
Tabela 16: Resulta dos cálculos para a caracterização física	89
Tabela 17: Teor de umidade natural (AM – 01).....	90
Tabela 18: Classificação do solo AM - 02 conforme ABNT	91
Tabela 19: Limite de Plasticidade (AM - 02).....	92
Tabela 20: Resultados dos ensaios de caracterização física	93
Tabela 21: Teor de umidade natural (AM – 02).....	93
Tabela 22: Parâmetros das camadas do solo de análise	96
Tabela 23: Parâmetros das camadas do solo de análise	96
Tabela 24: Fatores de segurança (Peso específico natural).....	103
Tabela 25: Fatores de segurança (Peso específico saturado).....	103
Tabela 26: Comparação entre Métodos (Bishop vs. Morgenstern-Price)	104
Tabela 27: Comparação entre Condições (Natural vs. Saturado)	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais tipos de movimento de encosta na dinâmica ambiental brasileira	20
Quadro 2: Fator de segurança e condições de estabilidade do talude	23
Quadro 3: Métodos de análise de estabilidade.....	27
Quadro 4: Especificações da câmera empregada.....	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	MOVIMENTO DE MASSA	19
3.1.1	Definições	19
3.1.2	Tipologias e Classificação dos Movimentos de Massa	20
3.1.3	Causas dos movimentos de massa	23
3.1.4	Análise de estabilidade	23
3.1.4.1	Tipos de Análise	24
3.1.4.2	Métodos de cálculo para análise	27
3.1.4.2.1	Fellenius (1927)	27
3.1.4.2.2	Bishop Simplificado (1955)	29
3.1.4.2.3	Morgenstern e Price (1965)	30
3.1.5	Superfície de ruptura	33
3.1.6	CrITÉrio de Mohr-Coulomb	34
3.2	TOPOGRAFIA	35
3.2.1	Divisão do levantamento topográfico	35
3.2.2	A relação entre topografia e geotecnia	36
3.2.3	Uso das tecnologias na topografia	36
4	METODOLOGIA	44
4.1	CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA ÁREA EM ESTUDO	45
4.1.1	Localização da Encosta	45
4.1.2	Características Gerais do Município	46
4.1.3	Geologia Geral	47
4.1.4	Clima	47
4.1.5	Ocupação em Áreas de Risco Geológico	47
4.2	LEVANTAMENTOS DE CAMPO	48
4.2.1	Amostragem	48
4.2.2	Levantamento GNSS	49
4.2.3	Aerolevanteamento fotogramétrico com drone	52
4.3	ENSAIO DE LABORATÓRIO	56

4.3.1	Preparação da amostra	56
4.3.2	Teor de umidade	57
4.3.3	Massa específica dos grãos	58
4.3.4	Peso específico total (natural).....	60
4.3.5	Análise granulométrica	61
4.3.6	Limite de liquidez	63
4.3.7	Limite de plasticidade	65
4.3.8	Cálculo do Peso Específico Seco, Índice de Vazios e Peso Específico Saturado.	66
4.4	PROCESSAMENTO DE DADOS	67
4.4.1	Pós-processamento de observáveis GNSS	67
4.4.2	Processamento dos dados com Agisoft Metashape	69
4.4.3	Construção dos perfis longitudinais no Civil 3D	74
4.4.4	Metodologia adotada para análises de estabilidade	75
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
5.1	CARACTERÍSTICA GERAL DO MUNICÍPIO	80
5.2	GEOLOGIA GERAL.....	80
5.3	CLIMA.....	82
5.4	OCUPAÇÃO EM ÁREAS DE RISCO GEOLÓGICO.....	83
5.5	ANÁLISES DE CAMPO	85
5.6	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA, ÍNDICES DE CONSISTÊNCIA E PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS	86
5.6.1	Amostra AM - 01.....	86
5.6.2	Amostra Am - 02.....	90
5.7	SÍNTESE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	94
5.8	ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....	95
5.8.1	Resultados.....	95
5.8.2	Discussão	104
6	CONCLUSÕES	106
	REFERÊNCIAS	108
7	APÊNDICE	115
	APÊNDICE A: RELATÓRIO DE AJUSTAMENTO DE COORDENADAS (IFAL001-P1-P2)	115
	APÊNDICE B: RELATÓRIO DE AJUSTAMENTO DE COORDENADAS (IFAL001-P3-P4)	116
	APÊNDICE C: SEÇÃO 1 (CIVIL 3D).....	117
	APÊNDICE D: SEÇÃO 2 (CIVIL 3D).....	118

‘

APÊNDICE E: SEÇÃO 3 (CIVIL 3D).....	119
APÊNDICE E: RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO AGISOFT METASHAPE.....	120

1 INTRODUÇÃO

O espaço urbano, segundo Gonçalves e Guerra (2004), é resultado de intensas transformações antrópicas sobre o meio físico ao longo do tempo. Essa urbanização frequentemente ocorre de forma desordenada, agravando os impactos sobre o solo e os taludes. Taludes e encostas naturais, como descrito por Filho e Virgili (1998), são superfícies inclinadas compostas por materiais terrosos, rochosos ou mistos. Essas estruturas são particularmente vulneráveis a deslizamentos, especialmente quando submetidas a intervenções como cortes, desmatamentos e sobrecargas provocadas pela expansão urbana.

Entre 1998 e 2017, eventos relacionados a chuvas intensas impactaram mais de 2,7 bilhões de pessoas em todo o mundo, com cerca de 1 milhão de vidas perdidas. Embora os impactos econômicos absolutos sejam mais significativos em países de alta renda, as perdas humanas predominam em países de média e baixa renda, evidenciando a relação entre vulnerabilidade populacional e níveis de desenvolvimento econômico (UNISDR, 2018). No Brasil, os desastres naturais mais recorrentes incluem inundações, enxurradas e movimentos de massa, responsáveis por mais de 87% das mortes relacionadas a eventos dessa natureza entre 1991 e 2012 (Universidade Federal de Santa Catarina, 2013). Além das vidas perdidas, os prejuízos econômicos são alarmantes, como ilustram os desastres em Santa Catarina (2008), Alagoas e Pernambuco (2010) e a região serrana do Rio de Janeiro (2011), cujas perdas totalizaram bilhões de reais (Banco Mundial, 2012a, 2012b, 2012c).

Diante desse cenário, o presente estudo foca na avaliação da estabilidade de um talude localizado no Complexo Chã da Jaqueira, em Maceió, Alagoas. Essa área é caracterizada por encostas íngremes e alta densidade populacional, condições que agravam a instabilidade do solo. A ocupação desordenada, somada à sobrecarga imposta à encosta e ao descarte inadequado de água servida e resíduos sólidos, especialmente antes dos períodos chuvosos, aumenta significativamente a vulnerabilidade local, tornando as encostas suscetíveis a deslizamentos.

A relevância deste estudo reside na necessidade de compreender os fatores que influenciam a estabilidade de taludes em áreas urbanas densamente povoadas, como a Chã da Jaqueira. Para tanto, foi escolhido um talude representativo da região, localizado na Rua Prefeito Joatas Malta de Alencar (Cavalarias RPMON), espera-se

que os resultados ofereçam subsídios para políticas públicas mais eficazes e intervenções que minimizem os impactos dos desastres naturais sobre a população.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a estabilidade de um talude representativo do Complexo Chã da Jaqueira, em Maceió-AL.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mapear a topografia da área: Executar levantamentos topográficos precisos para identificar as variações de inclinação e relevo, que influenciam diretamente a estabilidade dos taludes.
- Empregar softwares de modelagem computacional para simular diferentes cenários de estabilidade dos taludes, considerando variáveis como o tipo de solo e inclinação dos taludes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MOVIMENTO DE MASSA

3.1.1 Definições

Os movimentos de massa são reconhecidos como processos geomorfológicos mais significativos na modelagem da superfície terrestre. Constituem-se no deslocamento de material (solo e rocha) sob a ação da gravidade, sendo frequentemente desencadeados por fatores externos, como a saturação do solo por água, atividades humanas, erosão ou eventos sísmicos. Esses processos podem ocorrer de forma lenta e contínua, ou de maneira rápida e destrutiva, como nos deslizamentos de terra, quedas de blocos e corridas de lama (Bigarella, 2003 apud Reckziegel, 2012).

Os movimentos de massa envolvem o deslocamento coletivo de solo ou rocha, com a gravidade e a declividade desempenhando papéis fundamentais nesse processo. Embora a água possa intensificar e acelerar esses eventos, aumentando seu potencial destrutivo, ela não é necessariamente o principal agente deste processo geomorfológico (Guerra, 2003).

Pio-Fiori (1995) destaca que a gravidade gera tensões cisalhantes dentro do manto de alteração ao longo das encostas. Essas tensões, que favorecem os movimentos de massa, tornam-se mais intensas à medida que aumentam a inclinação e a altura das vertentes, o peso específico do solo e a quantidade de água infiltrada e acumulada. Nesse contexto, a água desempenha um papel crucial, pois se deposita em potenciais planos de ruptura, reduzindo a resistência mecânica do solo devido ao aumento da pressão neutra e ao efeito de lubrificação dessas superfícies.

Os indícios de movimentação do solo não são facilmente identificáveis. Esses sinais costumam se manifestar por meio de pequenas modificações em construções ou no terreno, como trincas no solo, inclinação de postes e fissuras em paredes. A percepção desses fenômenos torna-se mais evidente em períodos de chuvas intensas ou prolongadas, quando a instabilidade do solo se intensifica (Amaral e Gutjahr, 2011)

3.1.2 Tipologias e Classificação dos Movimentos de Massa

De acordo com Fernandes e Amaral (1996), os movimentos de massa são classificados com base no tipo de material envolvido (solo ou rocha), na velocidade de deslocamento e na quantidade de água presente.

Augusto Filho (1992) sintetiza as principais características dos movimentos de massa na dinâmica ambiental brasileira. O Quadro 1 resume os conceitos abordados, relacionando os processos com a dinâmica do deslocamento, as propriedades dos materiais envolvidos e a geometria do movimento.

Quadro 1: Principais tipos de movimento de encosta na dinâmica ambiental brasileira

TIPOS DE MOVIMENTAÇÕES	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO/MATERIAL/GEOMETRIA
Rastejos (Creep)	<ul style="list-style-type: none">- Diversos planos de deslocamento (internos)- Velocidades baixas (cm/ano) e decrescente em profundidades- Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes- Solos, depósitos, rocha alterada/fraturada- Geometria indefinida
Escorregamentos (Slides)	<ul style="list-style-type: none">- Poucos planos de deslocamentos (externos)<ul style="list-style-type: none">- Velocidades médias (m/h) e altas (m/s)- Pequenos e grandes volumes de material- Geometria e materiais variáveis- Planares: solos poucos espessos, solos e rochas com plano de fraqueza- Circulares: solos espessos homogêneos e rochas muitos fraturadas- Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas (Falls)	<ul style="list-style-type: none">- Sem plano de deslocamento- Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado- Velocidades muito altas (vários m/s)- Material rochoso- Pequenos e médios volumes- Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc.- Rolamento de matacão- Tombamento
Corridas (Flows)	<ul style="list-style-type: none">- Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação)- Movimento semelhante ao de um líquido com viscosidade alta- Desenvolvimento ao longo das drenagens- Velocidades médias e altas- Mobilização de solo, rocha, detritos e água- Grandes volumes de material- Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

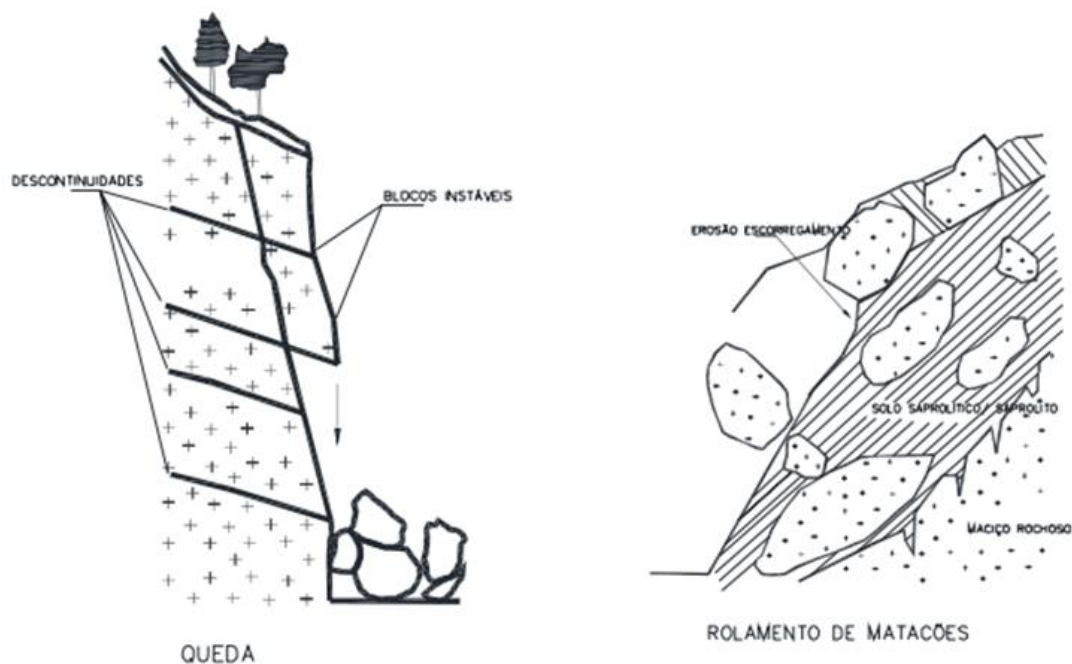
Fonte: Adaptado de Augusto Filho, 1992. *Apud* Reckziegel, Elisabete, 2012.

3.1.2.1 Tipos de movimento de massa

Caputo (1969) ressalta que as formas de instabilidade de maciços terrosos ou rochosos nem sempre se apresentam bem caracterizadas e definidas, pode-se classificar os principais tipos de movimentos em três grandes grupos (Desprendimento, rastejo e escorregamento).

Desprendimento de terra ou rocha: É uma porção de um maciço terroso ou de fragmentos de rocha que se destaca do resto do maciço, caindo livre e rapidamente, acumulando-se onde estaciona (Caputo, 1969), como exemplificado na Figura 1.

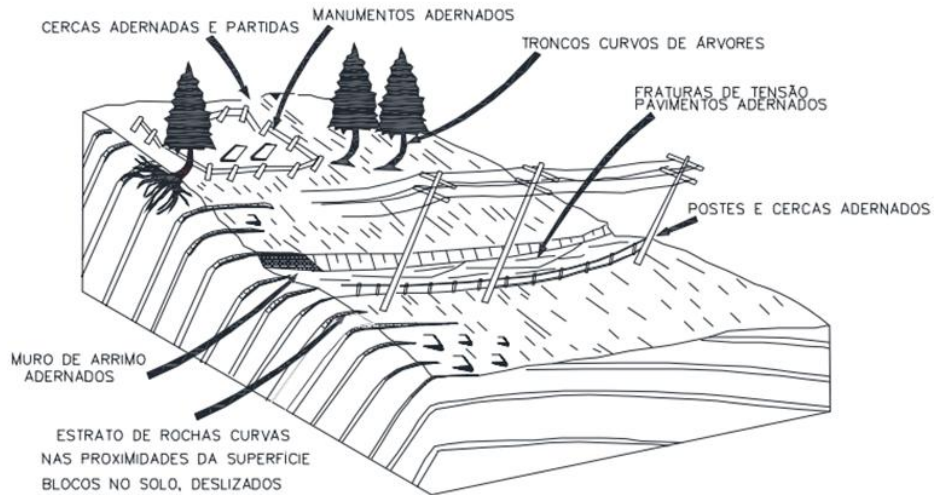
Figura 1: Queda de blocos



Fonte: Oliveira e Brito, 1998.

Rastejo: É o deslocamento lento e contínuo de camadas, como pode ser visto na Figura 2. superficiais sobre camadas profundas. A velocidade de rastejo é muito pequena. Terzaghi salienta que é da ordem de 30 cm por década, enquanto a velocidade média de adiantamento de um escorregamento é da ordem de 30 cm por hora. A curvatura dos troncos de árvores, inclinação de postes e fendas no solo são alguns dos sinais das ocorrências do rastejo (Caputo, 1969)

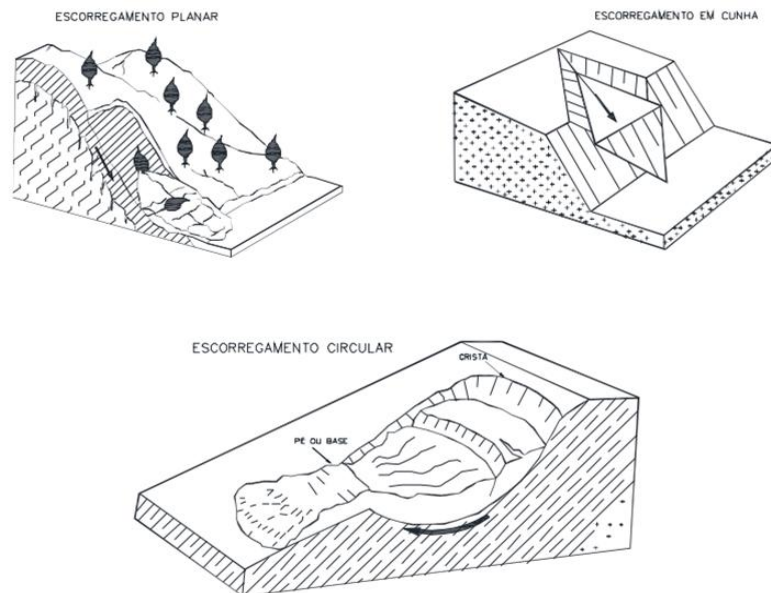
Figura 2: Escoamento – Rastejo



Fonte: Bloom, 1988.

Escorregamentos (deslizamentos): É o deslocamento rápido de uma massa de solo ou de rocha que, rompendo-se do maciço, desliza para baixo e para o lado, ao longo de uma superfície de deslizamento (Caputo, 1969). Esse fenômeno pode ocorrer segundo diferentes mecanismos de falha, sendo os principais os escorregamentos planares, circulares e em cunha, os quais são exemplificados na Figura 3, que apresenta representações esquemáticas desses modos de instabilidade.

Figura 3: Escorregamentos



Fonte: Oliveira e Brito, 1998.

3.1.3 Causas dos movimentos de massa

Segundo Caputo (1969), as causas dos escorregamentos geralmente estão associadas ao aumento do peso do talude, que inclui as cargas aplicadas, e à redução da resistência ao cisalhamento do material. A interação desses fatores é especialmente crítica durante as estações chuvosas ou logo após, quando a saturação do solo aumenta o peso específico do material, enquanto o excesso de umidade diminui sua resistência ao cisalhamento devido ao aumento da pressão neutra. Esse fenômeno explica a ocorrência mais frequente de escorregamentos nesses períodos de grande precipitação pluviométrica.

3.1.4 Análise de estabilidade

A análise de estabilidade de taludes visa determinar o risco de ruptura, avaliando o fator de segurança, que relaciona as forças resistentes e as forças atuantes. A ruptura ocorre quando as forças de cisalhamento atuantes se igualam às forças resistentes, considerando fatores como sobrecarga, geometria, características geomecânicas e poro-pressão (Magalhães, 2013).

O fator de segurança, apresentado no Quadro 2 é utilizado para avaliar essa estabilidade e interpretar as diferentes condições de equilíbrio. Assume-se uma superfície de deslizamento crítica quando as forças de cisalhamento superam as resistências do solo. O fator de segurança possui um valor unitário que representa uma condição de equilíbrio limite, podendo ser inferior, igual ou superior a 1, o que determina a condição de estabilidade do talude (Carvalho, 1991).

Quadro 2: Fator de segurança e condições de estabilidade do talude

FATOR DE SEGURANÇA E CONDIÇÕES DE INSTABILIDADE DO TALUDE	
FATOR DE SEGURANÇA - FS	CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE
FS<1	Talude instável – caso o talude venha a sofrer modificações em sua geometria com cortes e ou aterro, nessas condições deverá padecer modificações.
FS=1	Talude com iminência de ruptura - condição adotada geralmente nos cálculos de retroanálise.
FS>1	Condição estável - quanto mais distante de 1 o FS, menores serão as possibilidades de o talude vir a sofrer ruptura quando submetido a condições críticas.

Fonte: Adaptado de Carvalho, 1991.

3.1.4.1 Tipos de Análise

Existem 2 tipos de abordagem para determinação do FS do ponto de vista determinístico: teoria de equilíbrio limite e análise de tensões.

Análise de Tensões e Deformações

Os estudos de estabilidade baseados na análise tensão-deformação são realizados com o auxílio de programas computacionais que utilizam o Método dos Elementos Finitos (MEF) ou o Método das Diferenças Finitas (MDF). Segundo Dyminski (1996), essa abordagem exige a definição do perfil geotécnico, considerando a geometria do problema, a estratigrafia, o processo de formação do solo e a modelagem das características de tensão e deformação. No entanto, essa modelagem pode ser complexa, o que pode comprometer a representatividade dos solos naturais.

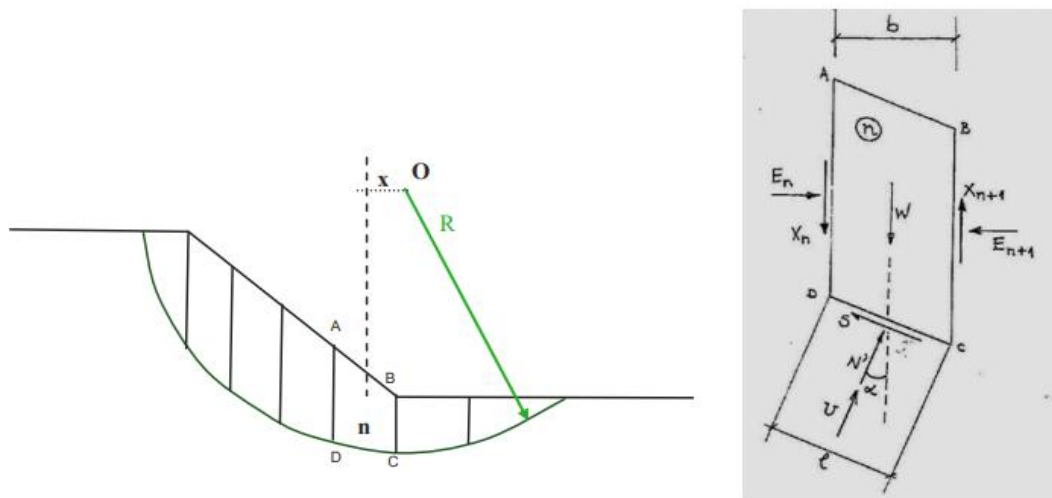
De acordo com Gerscovich (2016), os programas computacionais são desenvolvidos para permitir a incorporação de fatores como a não linearidade da curva tensão-deformação ($\sigma \times \varepsilon$), a anisotropia, a não homogeneidade, a influência do estado inicial de tensões e as etapas construtivas. As tensões cisalhantes são determinadas numericamente e comparadas com a resistência ao cisalhamento, sendo possível identificar pontos onde a ruptura ocorre quando $\tau \geq \tau_{\text{resistência}}$. Esses resultados permitem, ainda, a identificação de áreas plastificadas, mesmo sem a definição explícita de uma superfície de ruptura, a definição de níveis de tensão para ensaios laboratoriais e a análise da magnitude das deformações.

Métodos de Equilíbrio Limite

Os Métodos de Equilíbrio Limite (MEL) são amplamente empregados na análise da estabilidade de taludes, encostas naturais, escavações e aterros, sendo reconhecidos por sua simplicidade, rapidez e precisão satisfatória sob condições de carregamentos estáticos. Esses métodos baseiam-se na hipótese de que a ruptura ocorre ao longo de uma superfície potencial previamente definida, que pode ser circular, poligonal ou de outra geometria. A massa de solo acima dessa superfície é considerada como corpo livre, cuja estabilidade é avaliada a partir das condições de equilíbrio estático (Duncan e Wright, 2005).

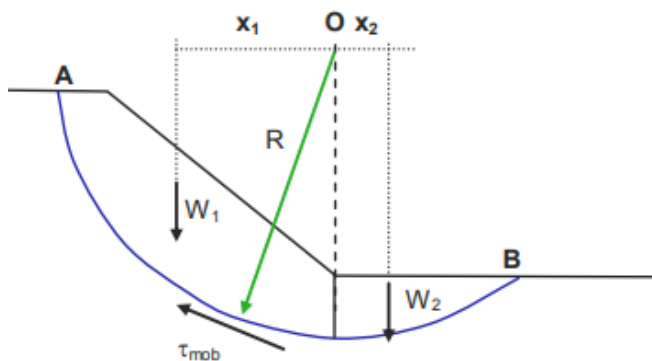
O procedimento fundamental consiste em subdividir o maciço em fatias verticais e aplicar as equações da estática equilíbrio de forças horizontais e verticais (Figura 4), e de momentos (Figura 5), para estimar o fator de segurança global. No entanto, como o número de incógnitas normalmente supera o número de equações disponíveis, o problema é estaticamente indeterminado. Para torná-lo determinável, os métodos impõem hipóteses simplificadoras, como a suposição de que o esforço normal na base da fatia atua em seu ponto médio, reduzindo o número de incógnitas. A partir disso, diferentes métodos, como Bishop Simplificado, Janbu, Fellenius e Morgenstern-Price que adotam estratégias distintas para alcançar o fechamento do sistema de equações (Lambe e Whitman, 1969).

Figura 4: Equilíbrio das forças



Fonte: Gerscovich, 2016.

Figura 5: Equilíbrio dos momentos



$$M_{\text{Instabilizante}} = W_1 x_1$$

$$M_{\text{Estabilizante}} = W_2 x_2 + (\tau_{\text{mob}} \overrightarrow{AB}) \text{Raio}$$

Equilíbrio de Momentos:

$$W_2 x_2 + (\tau_{\text{mob}} \overrightarrow{AB}) \times \text{Raio} = W_1 x_1$$

$$(\tau_{\text{mob}} \overrightarrow{AB}) \times \text{Raio} = W_1 x_1 - W_2 x_2$$

Como definir τ_{mob} ?

Fonte: Gerscovich, 2016.

Todos os MEL compartilham uma mesma definição de fator de segurança local, essa definição pode ser representada pela seguinte equação:

$$FS\ local = \frac{t_{resistencia}}{t_{atuante}} \quad (1)$$

onde $t_{resistencia}$ representa a resistência ao cisalhamento do solo, estimada por critérios como o de Mohr-Coulomb, e $t_{atuante}$ é a tensão cisalhante mobilizada na superfície de ruptura. Uma limitação inerente a esses métodos é que consideram o fator de segurança constante ao longo de toda a superfície de ruptura, o que só é rigorosamente verdadeiro na condição crítica de ruptura (Duncan e Wright, 2005).

Outra premissa comum é que o solo se comporta como um material rígido perfeitamente plástico, o que implica desconsiderar os campos de tensão e deformação no interior do maciço. Essa simplificação inviabiliza a avaliação das deformações e deslocamentos, o que pode ser relevante em projetos onde os deslocamentos admissíveis são críticos. A resistência ao cisalhamento é assumida como constante ao longo da ruptura, desconsiderando variações entre resistência no pico e resistência residual o que pode ser significativo em materiais como argilas rijas fissuradas (Duncan e Wright, 2005). Skempton (1977) propõe, nesse contexto, o uso de valores de resistência reduzidos, especialmente em taludes sujeitos a longos períodos de carregamento.

Além disso, os MEL utilizam valores médios das tensões normal (σ) e cisalhante (τ) ao longo da superfície de ruptura para aplicar o critério de Mohr-Coulomb expresso pela Equação (02):

$$t = c' + \sigma' * \tan \varphi' \quad (2)$$

Em que c' e φ' são, respectivamente, a coesão e o ângulo de atrito efetivos. Como o número de equações de equilíbrio geralmente é insuficiente para resolver todas as forças atuantes, cada método adota hipóteses específicas adicionais para complementar o sistema. Apesar dessas simplificações, os métodos de equilíbrio limite continua sendo amplamente utilizados devido à sua eficiência e à boa correlação com resultados observados em campo para muitas situações práticas (Dias, 2021).

3.1.4.2 Métodos de cálculo para análise

No Quadro 3 serão apresentados os principais métodos de cálculo para análise de estabilidade de talude.

Quadro 3: Métodos de análise de estabilidade

MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE		
LINEARES		Método do momento $p/ \varphi=0$
		Taludes infinitos
		Método de Culman
		Método de Rendulic
		Método do círculo de atrito
NÃO LINEARES	Superfície circular	Método de Fellenius
		Método de Bishop
		Método de Bishop Modificado
	Superfície qualquer	Método de Specer
		Método de Morgenstern e Price
		Método de Janbu
		Método de Sarma
		Método dos Blocos

Fonte: Adaptado de Silva, 2007.

3.1.4.2.1 Fellenius (1927)

Devido à sua abordagem simples, os cálculos feitos pelo método de Fellenius podem ser realizados manualmente, sem a necessidade de ferramentas computacionais. Esse método parte do princípio de que as forças de interação entre as fatias do solo são desprezadas, ou seja, não são consideradas nos cálculos (Figura 6). Além disso, assume-se que o peso de cada fatia é decomposto em duas direções: uma perpendicular à base da fatia e outra paralela a essa base (Dias, 2021).

Para determinar o fator de segurança de um talude, considera-se o equilíbrio dos momentos em torno do centro da superfície circular de ruptura, bem como o equilíbrio das forças atuantes na direção normal à base dessa superfície (Dias, 2021).

A Equação (03) abaixo apresenta o cálculo do fator de segurança (FS) para taludes com ausência de poropressões por Fellenius (1927).

$$FS = \frac{\sum[c\beta + N \tan\phi]}{\sum W \sin \alpha} \quad (3)$$

Onde:

- C = coesão,
- β = Tamanho da base da fatia,
- N = Força normal da base ($N = W \cos \alpha$),
- ϕ = Ângulo de atrito,
- W = Peso da fatia.

Por sua vez, a Equação (04) seguinte proporciona o cálculo do fator de segurança considerando a poropressão como parcela contra segurança.

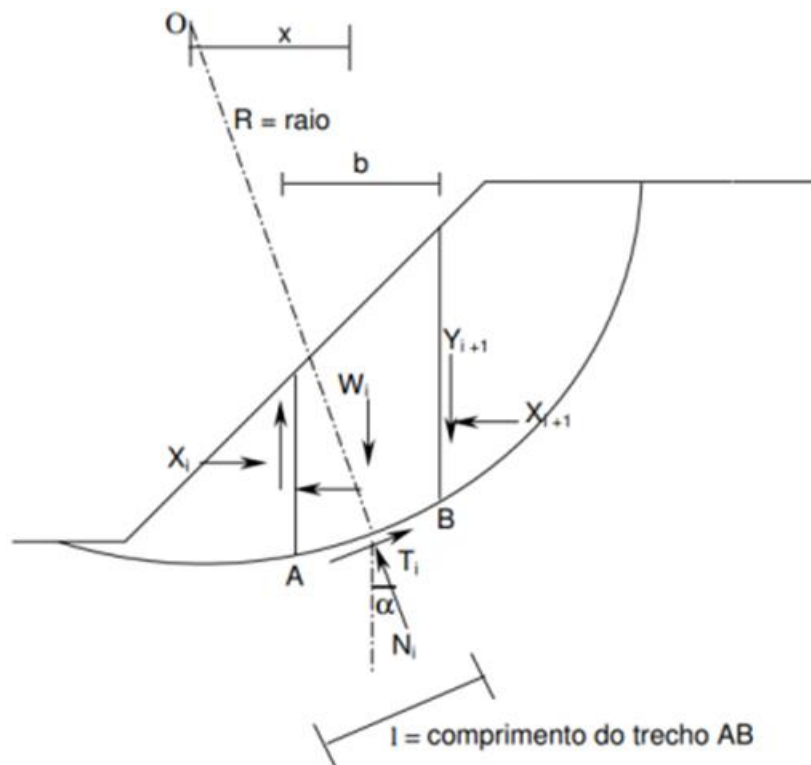
$$FS = \frac{\sum [c'(b \cos \alpha) + (W \cos \alpha - u(b \cos \alpha)) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha} \quad (4)$$

Onde:

- u = Poropressão média aplicada à base da fatia,
- c' = Coesão efetiva do solo,
- ϕ' = Ângulo de atrito efetivo do solo.

É admissível descobrir erros de até 50%, quando o método é utilizado em taludes de baixa inclinação e poropressões elevadas (Dias, 2021).

Figura 6: Composição vetorial de forças em uma fatia pela metodologia de Fellenius (1927)



Fonte: Dias, 2021.

3.1.4.2.2 Bishop Simplificado (1955)

Durante a década de 1950, o professor Alan W. Bishop, do Imperial College de Londres, propôs um novo método para análise de estabilidade de taludes que levava em consideração as forças normais entre as fatias do solo, mas desconsiderava as forças de cisalhamento entre elas (Dias, 2021).

Bishop formulou uma equação baseada no equilíbrio das forças verticais atuando na base de cada fatia. Como resultado, a força normal na base passa a depender do fator de segurança. Isso faz com que o fator de segurança apareça em ambos diretamente os lados da equação, tornando-a não linear. Por esse motivo, é necessário utilizar um processo iterativo para determinar o valor correto do fator de segurança. A Equação (05) abaixo apresenta a formulação simplificada para ausência de poropressões proposta por Bishop (1955), (Dias, 2021).

$$FS = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \left[\frac{c\beta + W \tan \phi - \frac{c\beta}{FS} \sin \alpha \tan \phi}{m_\alpha} \right] \quad (5)$$

A Equação (06) utilizada para determinar o fator de segurança no método de Bishop é semelhante àquela proposta por Fellenius em 1927. A principal diferença entre elas está na presença do termo m_α e, que é definido por uma equação:

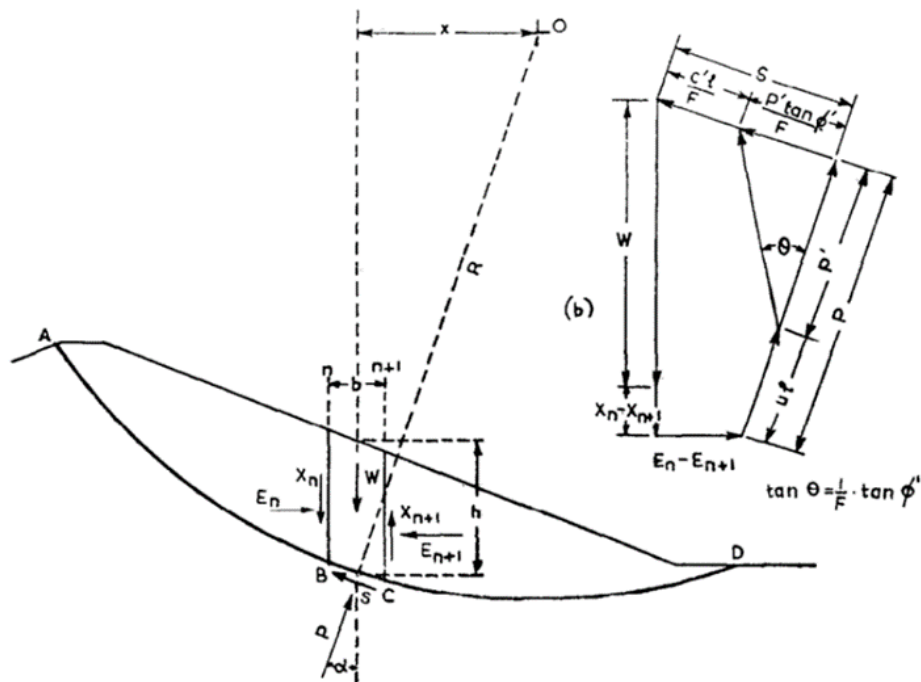
$$m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi}{FS} \quad (6)$$

O cálculo do fator de segurança com esse método exige um processo iterativo. Inicialmente, é feito um valor estimado para obter o termo m_α , o que permite calcular um valor provisório do fator de segurança (FS). Esse procedimento é repetido várias vezes até que o valor obtido para FS se estabilize dentro de uma margem de tolerância específica. Na prática, esse processo costuma ser rápido, exigindo poucas repetições para alcançar um resultado confiável (Dias, 2021).

O método de Bishop simplificado (1955), leva em consideração as forças normais entre as fatias normais (Figura 7), mas desconsidera as forças de cisalhamento que atuam entre elas. A técnica garante o equilíbrio dos momentos no conjunto do sistema, assumindo que a superfície de ruptura tem forma circular. Apesar de não cumprir as condições de equilíbrio horizontal nem analisar separadamente o momento de cada fatia, esse método apresenta resultados bastante próximos aos de

métodos mais completos e sofisticados, mesmo sem atender a todos os critérios de equilíbrio (Dias, 2021).

Figura 7: Força no método das fatias

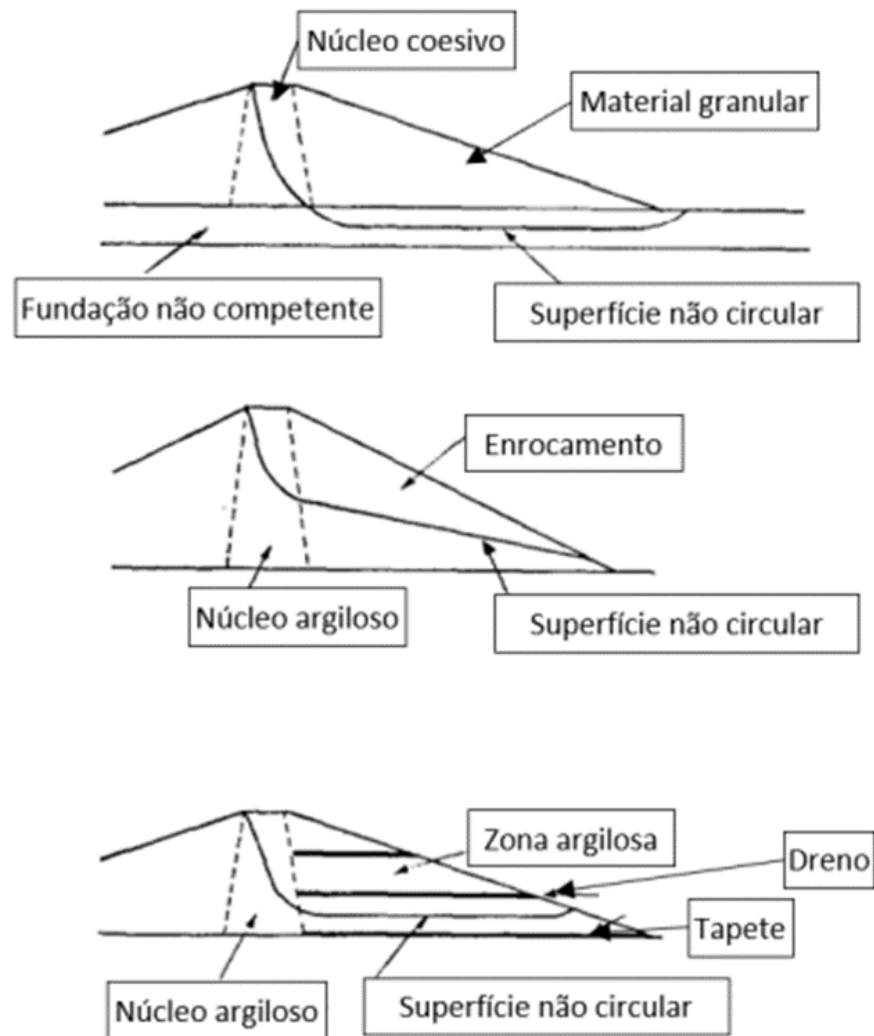


Fonte: Bishop, 1954.

3.1.4.2.3 Morgenstern e Price (1965)

Os renomados professores Dr. Morgenstern e Dr. Price propuseram um método para o cálculo do fator de segurança baseado no conceito de equilíbrio limite. A principal contribuição dessa metodologia é a flexibilidade em considerar superfícies de ruptura com geometria não circular, o que a torna mais adequada para representar certos mecanismos de falha. A Figura 8 a seguir mostra exemplos em que superfícies não circulares oferecem uma representação mais realista da ruptura (Dias, 2021).

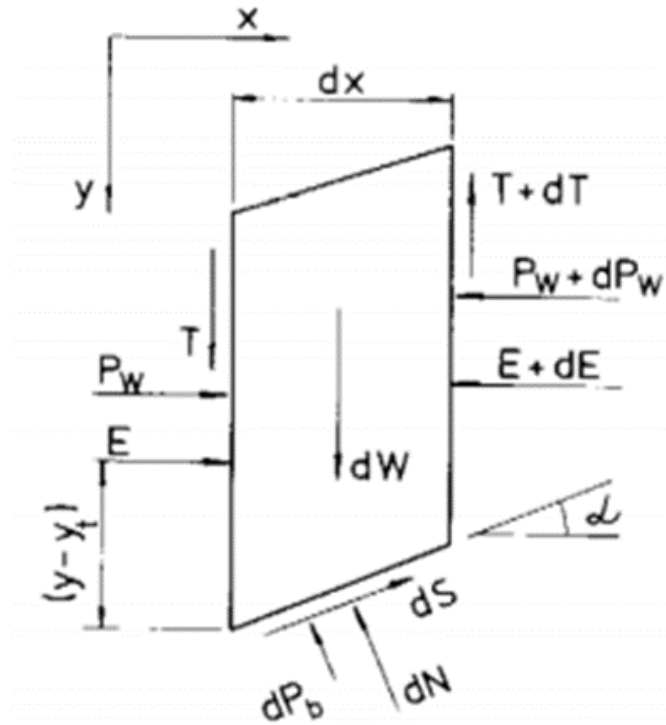
Figura 8: Exemplos de superfícies de ruptura não circular



Fonte: Dias, 2021.

A abordagem mais precisa, que considera todas as condições de equilíbrio estático, permite a aplicação de diferentes modelos para representar as forças entre as fatias. Nessa técnica, a massa instável é segmentada em fatias extremamente pequenas, quase infinitesimais. Devido à complexidade dos cálculos envolvidos nesse processo, o uso de softwares ou ferramentas computacionais se torna essencial para a realização da análise. As forças entre fatias consideradas nesta metodologia são apresentadas a baixo na Figura 9 (Dias, 2021).

Figura 9: Forças atuantes nas fatias pela metodologia de Morgenstern-Price



Fonte: Dias, 2021.

- P_w = Pressões neutras laterais da fatia
- dP_b = Resultante das pressões neutras na base da fatia
- dW = Força peso da fatia
- T = Força tangencial entre as fatias
- E = Força normal entre as fatias
- dN = Força normal na base da fatia
- dS = Força cisalhante mobilizada na base da fatia

Para resolver os cálculos do método, assume-se a relação entre as forças E e T , através da Equação (07):

$$T = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (7)$$

Sendo:

- λ = constante a ser determinada pelo processo iterativo
- $f(x)$ = função que precisa ser especificada

De maneira geral, a função $f(x)$ é comumente escolhida como uma função arco seno, uma vez que, segundo Morgenstern e Price (1965), é a função que apresenta menor influência sobre o fator de segurança (Dias, 2021).

3.1.5 Superfície de ruptura

A definição da superfície de ruptura é um passo essencial na análise da estabilidade de taludes, pois influencia diretamente no cálculo do fator de segurança. A geometria dessa superfície está intrinsecamente relacionada às características do perfil geológico e geotécnico do talude, como a estratificação do solo, a presença de descontinuidades e a composição litológica (Pimenta, 2005).

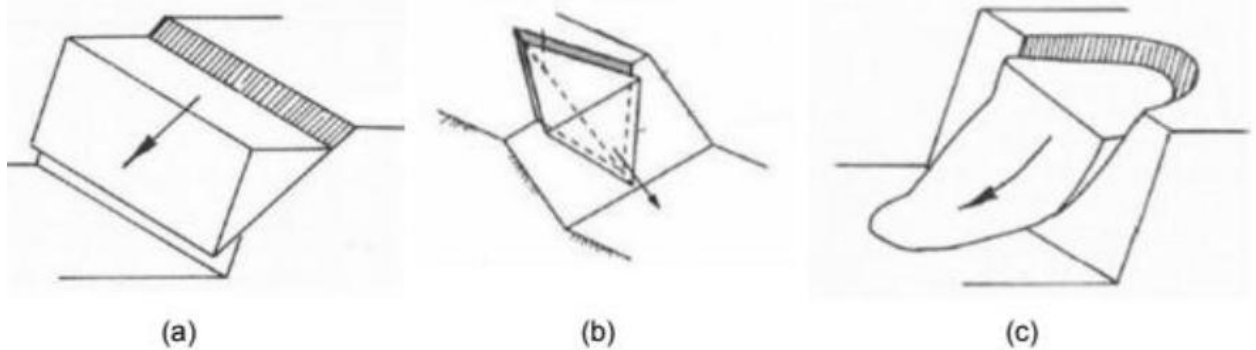
As superfícies de ruptura podem assumir diferentes formas, tais como: planar, circular, em cunha ou mistas, esta última sendo a combinação de rupturas planares e circulares. A ruptura planar é frequentemente observada em taludes formados por colúvios rasos sobre base rochosa ou em materiais com estruturas pré-existentes, como foliações, fraturas ou contatos litológicos inclinados, que atuam como zonas de fraqueza. Esse tipo de falha tende a ocorrer ao longo dessas descontinuidades estruturais (Hoek e Bray, 1981).

A ruptura em cunha, por sua vez, é característica de maciços com duas ou mais superfícies de descontinuidade que se interceptam, formando um prisma instável que desliza ao longo da linha de interseção dessas superfícies. Esse mecanismo é comum em rochas com sistemas de juntas ou foliações cruzadas (Hoek e Bray, 1981).

Já a ruptura circular é tipicamente associada a solos homogêneos, não estratificados, e com comportamento isotrópico, como argilas consistentes ou materiais residuais uniformes. Essa superfície tende a apresentar um contorno suavemente curvado, sendo amplamente utilizada em análises simplificadas de estabilidade devido à sua representação mais conservadora e compatível com o comportamento de muitos tipos de solo (Gerscovich, 2016).

A Figura 10 ilustra exemplos desses tipos de movimento de massa, auxiliando na visualização das diferentes geometrias de ruptura.

Figura 10: Tipos de superfícies de ruptura de um talude (a) superfície planar, (b) superfície em cunha e (c) superfície circular



Fonte: Gerscovich, 2016.

3.1.6 Critério de Mohr-Coulomb

A ruptura de um material ocorre quando a tensão cisalhante em um plano atinge um valor crítico relacionado à resistência do material. O critério de Mohr-Coulomb lineariza a envoltória proposta por Mohr, sendo a expressão mais comum para descrever a resistência ao cisalhamento de materiais dentro da mecânica dos solos. Esse critério é definido pela Equação (08):

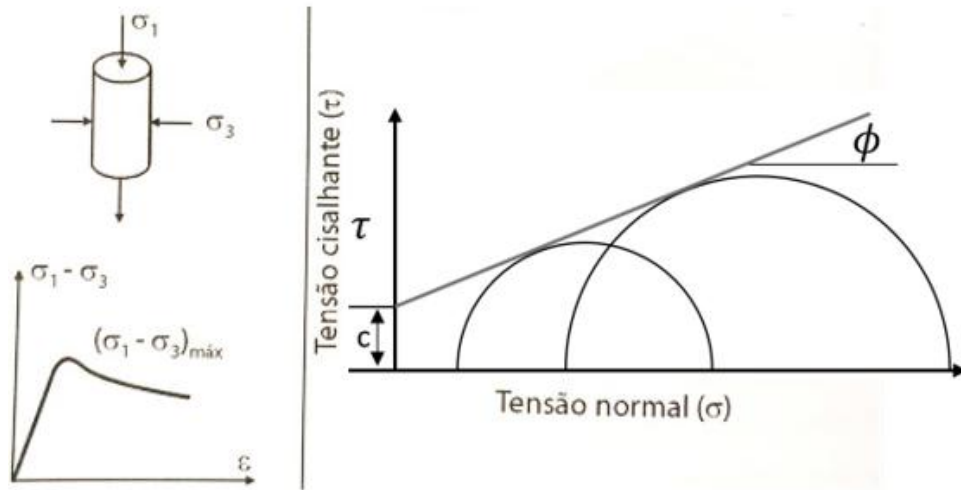
$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \Phi \quad (8)$$

Sabendo que:

- τ = Tensão de cisalhamento durante ruptura (eixo y do gráfico),
- c = Coesão (onde a reta intercepta o eixo y)
- σ = Tensão normal (eixo x do gráfico)
- $\tan(\Phi)$ = Coeficiente angular da reta – ângulo de atrito,

A equação representa uma linha reta quando plotada em um gráfico de resistência ao cisalhamento (τ) versus tensão normal (σ) conforme a Figura 11. O ponto onde essa reta intercepta o eixo y corresponde à coesão do material (intercepto coesivo), enquanto o coeficiente angular da reta é igual ao valor de $\tan(\Phi)$, sendo Φ o ângulo de atrito interno do material. Assim, a equação expressa a resistência ao cisalhamento como uma combinação da coesão e do atrito do material (Dias, 2021).

Figura 11: Critério proposto por Mohr para a resistência de materiais



Fonte: Dias, 2021.

3.2 TOPOGRAFIA

3.2.1 Divisão do levantamento topográfico

O levantamento topográfico está dividido em planimetria e altimetria e de acordo com Zimmermann (2017, p.10) é possível afirmar que:

A altimetria é a área que se ocupa de determinar cotas e variações de nível entre pontos na superfície, utilizando diferentes técnicas. Em contraste, a planimetria concentra-se na medição de pontos na superfície terrestre, projetando-os em um plano de referência horizontal.

Apresenta-se então, duas formas de se obter informações específicas durante a realização do trabalho topográfico. A primeira busca apresentar as diferenças de níveis que podem ocorrer na superfície, enquanto a outra apresenta medidas que são relacionadas à superfície, porém de forma planejada. De acordo com Santos (2016, p.15):

A planimetria é o conjunto de procedimentos empregados na obtenção da representação gráfica da projeção horizontal do terreno (planta) e das diversas particularidades dessa superfície sejam naturais ou artificiais. Trabalha essencialmente com ângulos e distancias horizontais.

A altimetria é caracterizada como “o relevo, que se refere às irregularidades das superfícies do terreno. Para isso, é necessário medir a altura de um conjunto de pontos em relação a um plano de referência, resultando principalmente no perfil

topográfico”. Dessa forma, na altimetria, para obter informações precisas, é essencial realizar a medição das alturas de uma quantidade específica de pontos que estão diretamente vinculados a um plano correspondente, gerando, assim, a representação topográfica (SANTOS, 2016, p. 16).

3.2.2 A relação entre topografia e geotecnia

Em projetos de construção é amplamente discutida por diversos autores. Segundo Silva e Souza (2018), a topografia fornece informações cruciais sobre a configuração do terreno, como elevações, depressões e características naturais, que são essenciais para o planejamento adequado de qualquer obra. Essa análise topográfica permite uma melhor compreensão da drenagem, acessibilidade e impacto ambiental do projeto. Por outro lado, conforme destaca Braja M. das (2007), a geotecnia abrange os materiais naturais presentes nas camadas superficiais da Terra. Ela envolve a aplicação dos princípios da mecânica dos solos e das rochas no projeto de fundações, estruturas de contenção e obras em terra.

Assim, a integração da topografia com a geotecnia permite que os engenheiros considerem tanto as condições físicas do terreno quanto os requisitos estruturais, resultando em projetos mais seguros, sustentáveis e eficientes.

3.2.3 Uso das tecnologias na topografia

De acordo com Coelho (2003), a contínua evolução dos equipamentos e softwares na área de topografia trouxe avanços consideráveis em produtividade e qualidade na elaboração de mapas que sustentam projetos de engenharia. Essa evolução dos instrumentos topográficos foi impulsionada pela necessidade do ser humano de aprimorar suas técnicas para obter informações precisas sobre terrenos, áreas, altitudes e perímetros.

3.2.3.1 Levantamento topográfico com os receptores GNSS

O Sistema de Navegação Global via Satélite (Global Navigation Satellite System) - GNSS, que utiliza uma tecnologia via satélite, permite determinar a sua posição sobre a Terra. Com a utilização do GNSS em diversos processos da engenharia, vários equipamentos e métodos ficaram mais eficazes para a coleta de dados em trabalhos relacionados ao posicionamento. Dentro desta tecnologia é

admissível ver dois tipos de altitudes, sendo elas a altitude ortométrica e altitude geométrica (IBGE, 2008).

Entretanto, ambas altitudes estão relacionadas a uma superfície de referência, e é isso que diferencia os resultados encontrados em cada levantamento feito. A altitude ortométrica é como a distância entre o geóide e um ponto medido ao longo da linha de prumo e tomado positivo para cima do geóide, que é uma superfície equipotencial gravitacional que coincide com o nível médio dos mares (IBGE, 2008).

Em contrapartida, a altitude geométrica está relacionada ao elipsoide, que é uma esfera ligeiramente achatada em seus polos. É a superfície utilizada para cálculo das projeções cartográficas e suas coordenadas na superfície terrestre. Este modelo é utilizado pois se trata de uma forma mais definida, sendo assim é desconsiderado as irregularidades existentes (IBGE, 2008).

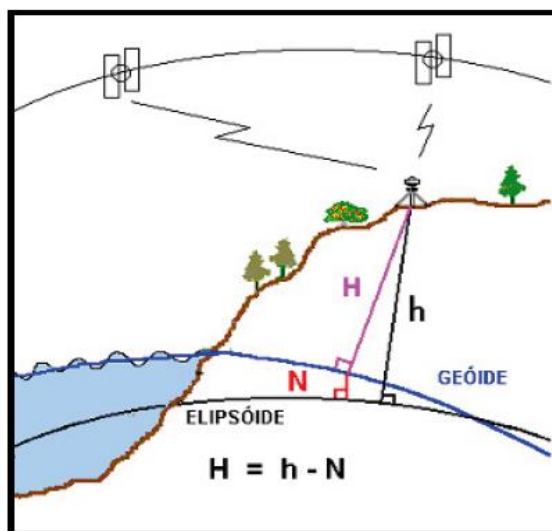
Para obtenção da altitude ortométrica, podem ser obtidas mediante a aplicação de correções extraídas de modelos de ondulação geoidal conforme Figura 12 (IBGE, 2008). Essa relação é dada pela equação (09):

$$H \cong h - N \quad (9)$$

Onde:

- N: Ondulação geoidal;
- H: Altitude ortométrica e;
- h: Altitude geométrica.

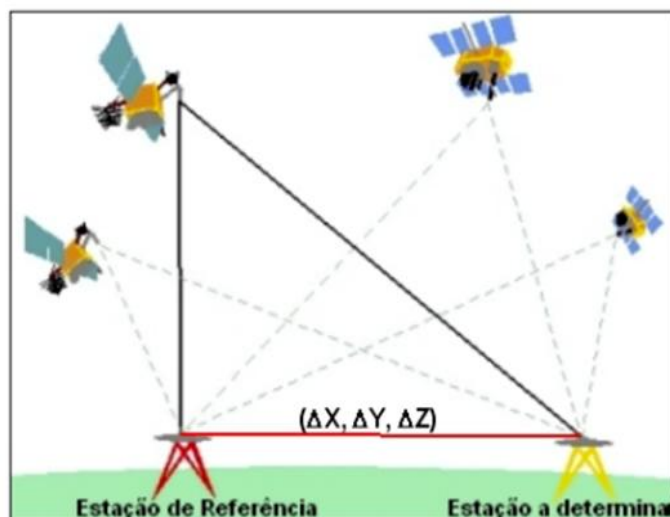
Figura 12: Ondulação geoidal, superfície geoidal e elipsoidal



Fonte: IBGE, 2008.

Para obtenção das coordenadas dos pontos de apoio foi utilizado o posicionamento estático relativo (Figura 13). Este método leva em consideração ao menos dois receptores coletando dados simultaneamente dos mesmos satélites. Um dos receptores fica posicionado sobre uma estação com coordenadas conhecidas, denominada de estação de referência ou base. Sendo as coordenadas das demais estações calculadas a partir desta. Neste cenário, é fundamental que pelo menos dois receptores colem dados de, no mínimo, dois satélites simultaneamente, onde um dos receptores deve ocupar a estação com coordenadas conhecidas, denominada de estação de referência ou estação base.

Figura 13: Posicionamento estático relativo



Fonte: IBGE, 2008.

O princípio básico desta técnica de posicionamento é minimizar as fontes de erro através da diferença entre observações recebidas simultaneamente por receptores que ocupam duas estações (IBGE, 2008).

Como nos levantamentos realizados com receptores de uma frequência não é possível eliminar o efeito ionosférico que é a camada da atmosfera formada por partículas livres carregadas, ou seja, por partículas ionizadas (Oliveira, 2003), compreendida a uma altitude entre 50 e 1000 km acima da superfície terrestre. Essas partículas ionizadas proporcionam um atraso na propagação do sinal. Ao contrário da refração troposférica, a refração ionosférica depende da frequência do sinal propagado, da localização geográfica do receptor, e da data e horário em que essas observações estão sendo realizadas (Seeber, 2003), recomenda-se que a distância

entre estação base e as demais não deve ser maior que 10 km, para que os efeitos da ionosfera possam ser considerados os mesmos entre elas. O tempo de coleta de dados in loco foi de 30 minutos a fim de obter melhor precisão, seguindo a Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Estimativa de precisão para posicionamento GNSS Relativo

Linha de Base	Tempo de observação	Equipamento utilizado	Precisão
00 - 05 Km	05 - 10 min	L1 ou L1/L2	5 -10 mm + 1ppm
05 - 10 Km	10 - 15 min	L1 ou L1/L2	5 -10 mm + 1ppm
10 - 20 Km	10 - 30 min	L1 ou L1/L2	5 -10 mm + 1ppm
20 - 50 Km	02 - 03 h	L1/L2	5 mm + 1ppm
50 - 100 Km	Mínimo: 03 h	L1/L2	5 mm + 1ppm
> 100 Km	Mínimo: 04 h	L1/L2	5 mm + 1ppm

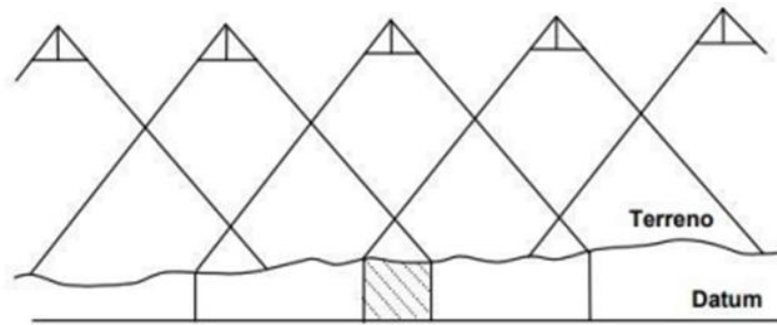
Fonte: IBGE, 2008.

3.2.3.2 Levantamento topográfico com drone - Fotogrametria e plano de voo

A fotogrametria tem origem nas palavras gregas photos (luz) e gramma (mensagem ou escrita), e pode ser definida como a ciência e tecnologia voltadas à obtenção de informações sobre o terreno e objetos a partir da análise de imagens (Tommaselli, 2009). Segundo a American Society of Photogrammetry (ASP, 1966), a fotogrametria é a técnica de adquirir dados sobre superfícies e estruturas por meio de observações, medições e análise de imagens capturadas.

Segundo Tommaseli (2009), a fotogrametria é uma técnica essencial para a elaboração de mapas, estudos geodésicos, trabalhos topográficos e na gestão populacional em áreas urbanas. Nos primeiros tempos de sua aplicação, a fotogrametria era realizada com o uso de aviões de grande porte e balões, nos quais eram montadas câmeras de alta qualidade para a época. Essas câmeras capturavam imagens das áreas de interesse. A partir dos dados obtidos, realiza-se um estudo para sobrepor as imagens geradas ao plano de voo, conforme exemplificado na Figura 14.

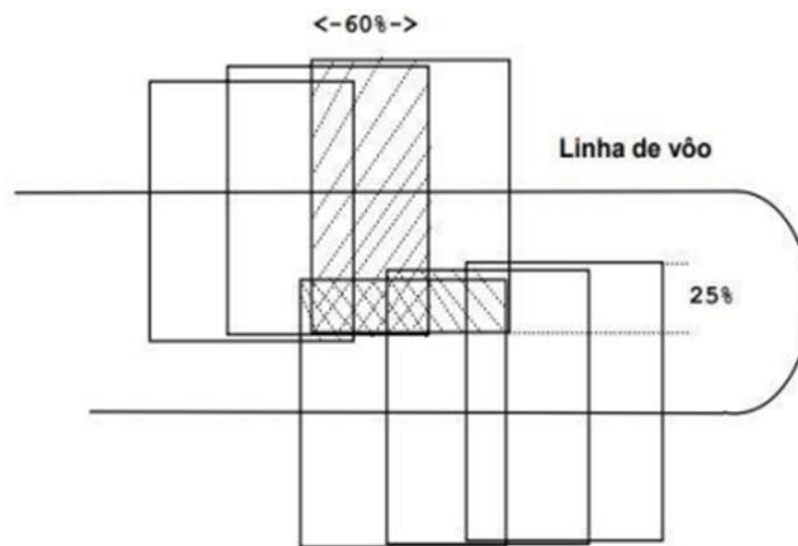
Figura 14: Superposição lateral



Fonte: Tommaseli, 2009.

A Figura 15 ilustra o plano de voo (ou linha de voo), que define as áreas específicas a serem capturadas nas imagens. Já a Figura 6 apresenta as imagens obtidas e sua sobreposição, utilizando o terreno como referência. Tommaseli (2009) destaca as diferentes características dos tipos de superposição, detalhando como cada uma delas contribui para a precisão e análise dos dados fotogramétricos.

Figura 15: Superposição Longitudinal



Fonte: Tommaseli, 2009.

Pontos de controle

Conforme Silva Neto (2015), os pontos de controle são alvos visíveis nas imagens aéreas, utilizados como referência para determinar as coordenadas no terreno. Esses pontos são fundamentais para aprimorar a precisão dos dados obtidos nos aerolevantamentos.

Embora os drones possuam um sistema de GPS - (Global Positioning System) integrado, sua acurácia não é suficiente para garantir a precisão necessária em aerolevantamentos, apresentando erros de até 5 a 10 metros em relação ao ponto de interesse. Para aumentar a precisão dos levantamentos realizados com drones, autor ainda destaca a importância da coleta de coordenadas geodésicas de pontos de controle, utilizando equipamentos de maior precisão Silva Neto (2015).

Os pontos de controle devem ser fixados de maneira adequada e possuir tamanho suficiente para serem visíveis a partir de altitudes de até 200 metros. Para aerolevantamentos, existem dois tipos principais de pontos de controle, conforme ilustrado na Figura 16.

- **Alvos Naturais (a):** São elementos ou pontos de referência presentes no ambiente, como pedras, madeiras, faixas pintadas, entre outros, que podem ser utilizados no trabalho de campo. Para garantir sua eficácia, é essencial que esses alvos estejam bem fixados ao terreno, assegurando sua visibilidade e estabilidade durante o levantamento, Silva Neto (2015);
- **Alvos Artificiais (b):** São materiais projetados e implantados especificamente para fins de aerolevantamento. Normalmente, consistem em placas pintadas de preto e branco, fixadas no terreno, para criar um contraste claro de pixels nos softwares de processamento. Esse contraste facilita a identificação e o mapeamento preciso dos pontos de controle, Silva Neto (2015).

Figura 16: Alvo natural (a) e alvo artificial (b)

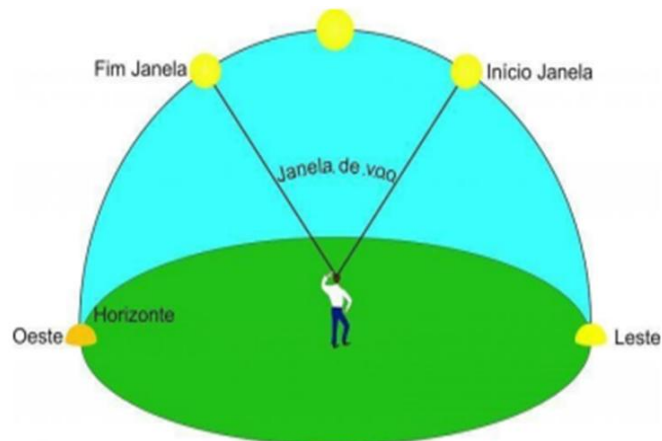


Fonte: Silva Neto, 2015.

Janela de voo

A trajetória solar desempenha um papel fundamental na qualidade do levantamento, uma vez que, em determinados horários, pode ocorrer variação na área de sombra, afetando a precisão das imagens. Segundo Arias (2017), sombras excessivas podem dificultar o processamento das imagens e introduzir erros nos resultados. A "janela de voo" (Figura 17) é uma técnica utilizada para mitigar esse problema, estabelecendo horários específicos para a realização do aerolevanteamento em diferentes regiões, com o objetivo de otimizar as condições de iluminação e melhorar a qualidade do produto final. De acordo com Arias (2017), a janela de voo refere-se ao período ideal para a execução do trabalho de campo. Esse intervalo é estrategicamente escolhido para coincidir com os horários em que as condições de iluminação são mais favoráveis, minimizando o impacto das sombras e garantindo a precisão e qualidade do levantamento próximo do pico do sol.

Figura 17: Janela de Voo



Fonte: Arias, 2017.

Ground Sample Distance – GSD

A sigla GSD, significa Ground Sample Distance, sendo sua tradução “Distância de Amostra do Solo”, onde é a representação de pixels de imagens em frações do terreno. Os pixels, para Silva Neto (2016), são a menor parcela de uma imagem digital, sendo armazenados valores capturados e absorvidos. O GSD está diretamente relacionado com a capacidade de captação da câmera e da altura de voo durante o aerolevanteamento. Conforme, Gogoni (2019) a qualidade de uma imagem é medida através da quantidade de pixels contidas nela, essa medição é ocorrida através da resolução da imagem.

Ortomosaico

As ortofotos são imagens obtidas por meio de levantamentos aerofotogramétricos, em que as fotografias são georreferenciadas e associadas a coordenadas geográficas não tão precisas. Segundo Wolf (1983) e Barreto (2016), as ortofotos podem ser consideradas equivalentes a mapas convencionais, pois representam fielmente as posições reais dos objetos no terreno, com precisão métrica. Como mostra a Figura 18.

Figura 18: Ortomosaico

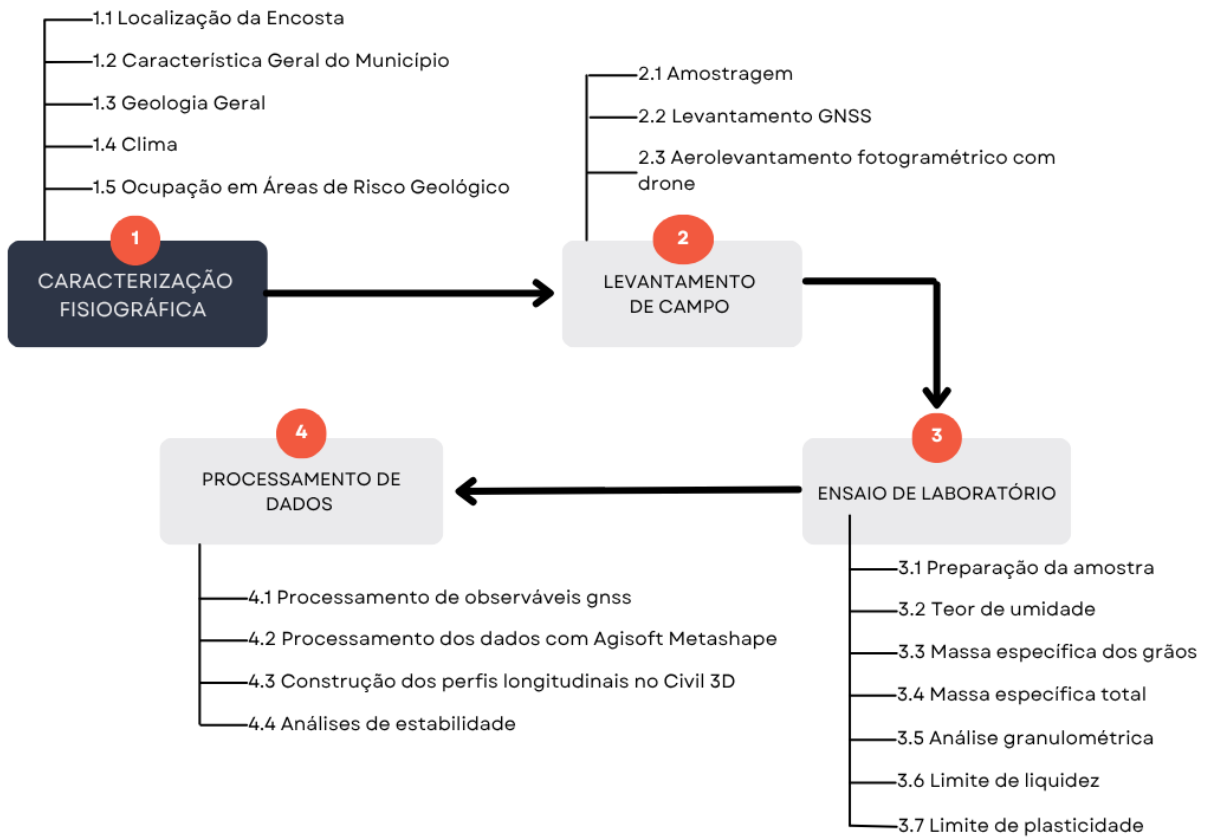


Fonte: Barreto, 2016.

4 METODOLOGIA

O estudo da estabilidade do talude do Complexo da Chã da Jaqueira foi estruturado em quatro etapas fundamentais. A Figura 19 apresenta, de forma esquemática, o fluxograma das etapas do trabalho desenvolvido.

Figura 19: Fluxograma representativo das etapas metodológicas desenvolvidas na pesquisa



Fonte: Os autores, 2024.

A primeira etapa corresponde à escolha da área de estudo, sua caracterização fisiográfica, realizada por meio de levantamento bibliográfico, análise de imagens aéreas, elaboração de mapas geológicos, coleta de dados climatológicos e observações de campo, visando a compreensão integrada do meio físico local.

A segunda etapa envolveu os ensaios de campo, incluindo a amostragem de solo para posterior análise laboratorial, o levantamento topográfico com tecnologia GNSS e o aerolevantamento fotogramétrico com drone. Esses procedimentos permitiram a coleta de dados geospaciais e geotécnicos diretamente em campo, essenciais para as etapas seguintes.

A terceira etapa correspondeu aos ensaios de laboratório, nos quais as amostras coletadas foram analisadas quanto ao teor de umidade, granulometria, limites de consistência e massa específica do solo, permitindo a determinação de parâmetros geotécnicos para as análises de estabilidade ao correlacionar tais parâmetros com dados da literatura.

Na quarta etapa, os dados obtidos nas fases anteriores foram integrados e processados em softwares especializados de modelagem geotécnica, como o SLOPE/W. A análise computacional permitiu a simulação de diferentes cenários e a determinação do fator de segurança das encostas, identificando zonas críticas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA ÁREA EM ESTUDO

Neste tópico, apresenta-se uma visão geral sobre as características da área de estudo, abordando aspectos geológicos, climáticos, geotécnicos e de ocupação em áreas de risco. O objetivo é fornecer uma base sólida para a análise de estabilidade, integrando informações naturais e antrópicas que influenciam diretamente o comportamento da encosta investigada.

A área em questão está inserida no Complexo Chã da Jaqueira, em Maceió – AL, e apresenta histórico de recorrência de processos de instabilidade. Essa condição reforça a necessidade de uma caracterização detalhada do meio físico, considerando suas interações com o uso e ocupação do solo, a fim de subsidiar análises técnicas e possíveis propostas de mitigação de riscos geológicos.

Para isso, a caracterização fisiográfica foi dividida em cinco etapas principais: Localização da Encosta, Caracterização Geral do Município, Geologia Geral, Clima e Ocupação em Áreas de Risco Geológico. Cada uma dessas etapas tem como objetivo contribuir para o entendimento integrado da área, sendo fundamentais para embasar as análises de estabilidade do talude.

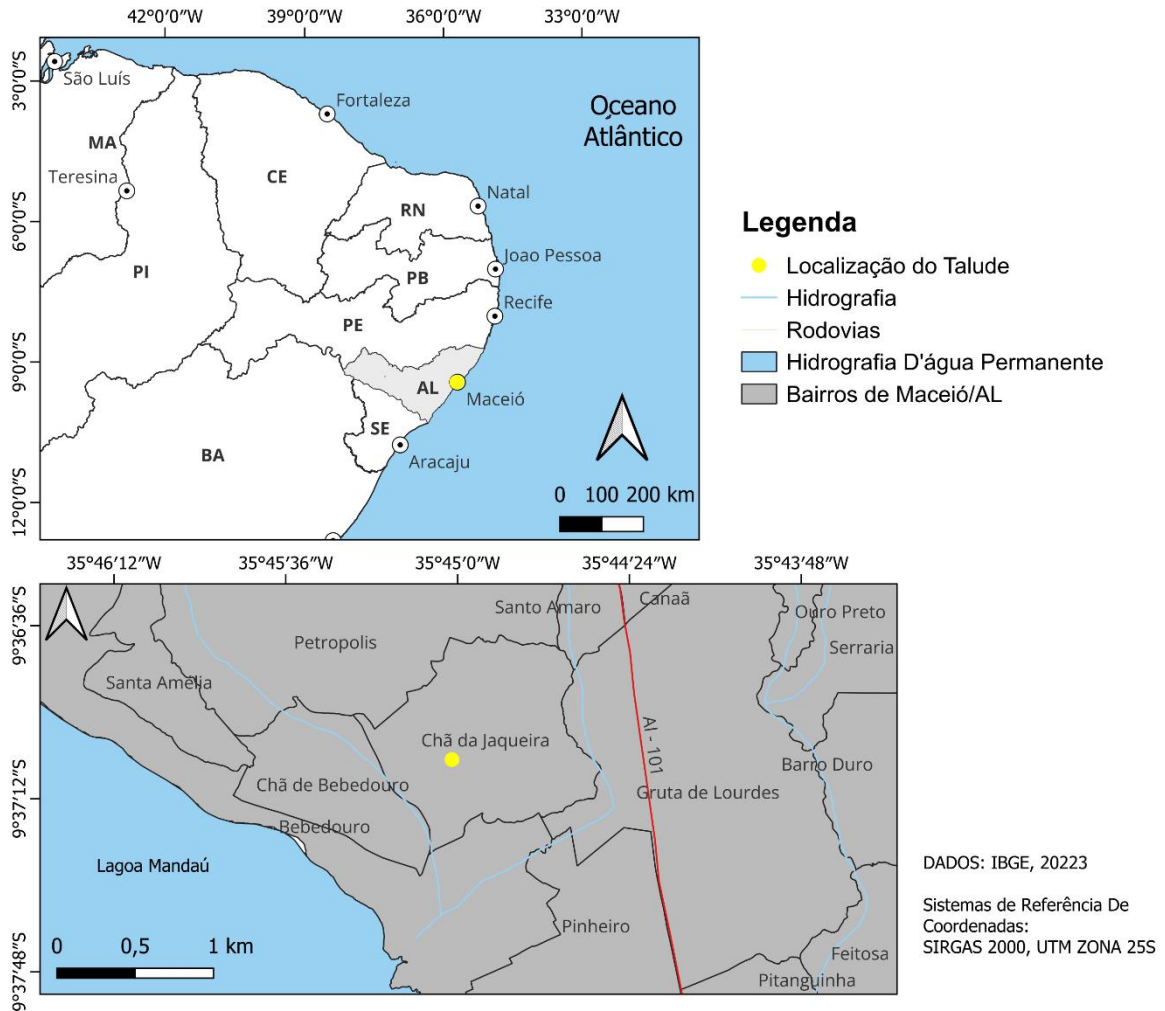
4.1.1 Localização da Encosta

A delimitação da encosta foi realizada a partir de levantamentos de campo com receptores GNSS e interpretação de imagens de satélite. Os dados foram integrados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS para a produção de mapas temáticos e análise espacial.

A área de estudo está localizada na Rua Prefeito Joatas Malta de Alencar, especificamente na área conhecida como Cavalarias RPMON, dentro do Complexo

de Chã da Jaqueira (Figura 20). O Complexo Chã da Jaqueira situa-se predominantemente no bairro de Chã da Jaqueira na Região Administrativa 4, abrangendo parcialmente os bairros de Jardim Petrópolis e Santo Amaro.

Figura 20: Mapa de Localização



Fonte: Os autores, 2024. – Dados: Shapefiles IBGE 2023

4.1.2 Características Gerais do Município

Para contextualizar a área de estudo, foram coletadas informações sobre o município de Maceió, incluindo dados populacionais, uso e ocupação do solo, infraestrutura urbana e histórico de ocupações irregulares. As informações foram obtidas em fontes oficiais como IBGE e plano diretor municipal, evidenciando o crescimento desordenado em áreas suscetíveis a processos geodinâmicos.

4.1.3 Geologia Geral

A caracterização geológica da área de estudo foi realizada com base em cartas geológicas da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), dados secundários disponíveis na literatura e observações de campo. A região está inserida na Formação Barreiras, composta predominantemente por sedimentos inconsolidados, como areias e argilas, que apresentam baixa coesão e elevada suscetibilidade à erosão e instabilidade em encostas. Como suporte à análise, foram elaborados mapas geológicos temáticos, integrados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), com o objetivo de representar a distribuição dos materiais geológicos e suas relações com a morfologia local

4.1.4 Clima

A caracterização climática da área de estudo baseou-se em dados históricos obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), abrangendo variáveis como precipitação média anual, distribuição sazonal das chuvas, temperaturas médias e umidade relativa do ar. Esses dados são fundamentais para avaliar a influência do clima nos processos de instabilidade, especialmente em encostas suscetíveis à infiltração e saturação do solo.

4.1.5 Ocupação em Áreas de Risco Geológico

Esta etapa consistiu na análise da ocupação urbana em áreas suscetíveis a movimentos de massa e processos erosivos, a partir de observações de campo, interpretação de imagens aéreas atualizadas e levantamento de informações junto a órgãos oficiais. Foram utilizados como base o Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR), elaborado em 2007 pela Prefeitura Municipal de Maceió, que identificou e mapeou áreas vulneráveis, agrupando as “grotas” urbanas da cidade em sete grandes complexos, e o levantamento realizado em 2022 pela CPRM.

A análise dessa ocupação em áreas instáveis é fundamental para mensurar o risco socioambiental e subsidiar políticas públicas de prevenção, mitigação e realocação. A identificação de edificações em zonas críticas contribui diretamente para o planejamento urbano sustentável, visando à segurança da população e à redução de perdas humanas e materiais associadas a desastres naturais.

4.2 LEVANTAMENTOS DE CAMPO

4.2.1 Amostragem

Com o intuito de caracterizar os solos da encosta e fornecer material representativo para os ensaios propostos nesta pesquisa, foram coletadas amostras em duas condições distintas: deformadas (Figura 21a), utilizadas para análises de propriedades físicas como granulometria, limites de liquidez e de plasticidade, e indeformadas (Figura 21b), extraídas com rigor técnico a fim de manter a estrutura natural do solo, sendo destinadas exclusivamente à determinação do peso específico natural (γ_n).

Figura 21: (a) Coleta de amostras deformadas e análise estratigráfica, (b) Coleta de amostras indeformadas



Fonte: Os autores, 2024.

A coleta foi realizada em pontos previamente selecionados da encosta, de forma a representar a diversidade litológica e pedológica da área de estudo. Foram empregados instrumentos adequados à atividade, como trados manuais e anéis metálicos de cravação, assegurando a qualidade e a integridade das amostras.

Durante o processo investigativo, os solos predominantes foram identificados e classificados como AM-01 e AM-02, com base em suas características geotécnicas. Essa nomenclatura diz respeito à natureza dos materiais amostrados e não está associada ao tipo de amostragem realizada (deformada ou indeformada). Ambas as amostras passaram pelos ensaios pertinentes conforme sua condição, garantindo a representatividade e confiabilidade dos resultados obtidos.

Todos os procedimentos seguiram as diretrizes normativas da ABNT, assegurando padronização, rastreabilidade e qualidade técnica nas etapas de amostragem, preservação e ensaio dos materiais.

4.2.2 Levantamento GNSS

A NBR 13133/2021 estabelece que a definição de pontos de controle é indispensável para a realização de aerolevantamentos, sendo esses pontos essenciais para a correção geométrica das imagens. A norma determina que os pontos de controle sejam distribuídos uniformemente na área de interesse, garantindo uma cobertura representativa e adequada.

Neste trabalho, o marco geodésico IFAL001, localizado no Instituto Federal de Alagoas (IFAL/Maceió), foi utilizado como referência para a obtenção das coordenadas dos pontos de apoio. Esse marco possui suas coordenadas definidas de acordo com a Tabela 2, servindo como base confiável para as medições realizadas. Para isso, empregaram-se receptores GNSS Ruide R90i de dupla frequência (L1/L2), que apresentam elevada precisão: $\pm 2,5 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm}$ na horizontal e $\pm 5 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm}$ na vertical em levantamentos pós-processados estáticos relativos. Em levantamentos RTK, as precisões são de $\pm 8 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ na horizontal e $\pm 15 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ na vertical, assegurando a confiabilidade dos dados gerados.

Tabela 2: Coordenada da base IFAL001 (SIRGAS2000; Projeção UTM fuso 25S)

Ponto	ELIPSÓIDAL		UTM		Altitude geométrica
	Latitude (ϕ)	Longitude (λ)	N (m)	E (m)	
IFAL001	9°39'52,88890"S $\sigma = 0,0006\text{m}$	35°43'47,84265"W $\sigma = 0,0005\text{m}$	8.930.461,11	200.399,71	-4,0065 $\sigma = 0,019\text{m}$

Fonte: Os autores, 2024.

O receptor base foi instalado no marco geodésico IFAL001 (Figura 21), enquanto os receptores rovers (Figura 22 e 23) foram posicionados em quatro pontos de controle estrategicamente distribuídos nas proximidades do talude no bairro Chã da Jaqueira, em Maceió. A escolha desses pontos levou em consideração áreas livres de interferências, como árvores ou edificações altas, priorizando locais seguros, visíveis e estáveis, garantindo que as condições das estruturas permanecessem inalteradas durante todo o processo de levantamento topográfico

Figura 22: Levantamento GNSS receptor Base, Marco geodésico IFAL001 (Ponto Base)



Fonte: Os autores, 2024.

Figura 23: Levantamento geodésico dos pontos P1 e P2



Fonte: Os autores, 2024.

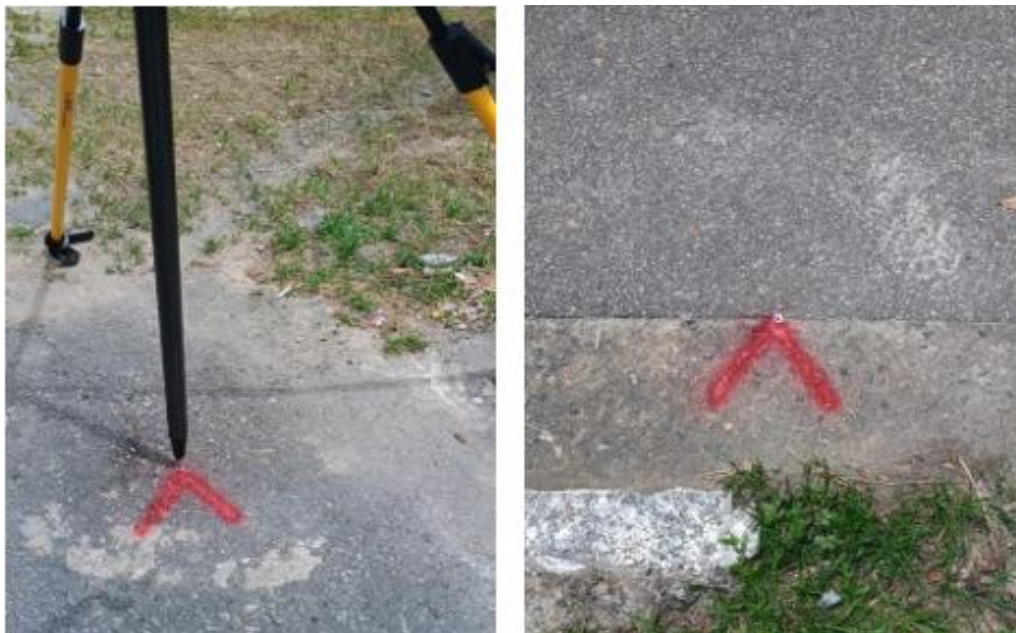
Figura 24: Levantamento GNSS – Levantamento geodésico dos pontos P3 e P4



Fonte: Os autores, 2024.

Em campo, foi necessária a materialização dos pontos de apoio com pinos de aço e a sinalização por meio de marcações com tinta (Figura 24). Após essa etapa, procedeu-se à instalações dos receptores GNSS nos pontos demarcados, estabelecendo a comunicação com a base para, então, iniciar a coleta de dados.

Figura 25: Materialização dos pontos de apoio



Fonte: Os autores, 2024.

Durante o levantamento, todas as informações foram registradas em caderneta de campo. Para isso, foi fundamental identificar os pontos (receptores) in loco, realizar a medição da altura da antena do equipamento (vertical ou inclinada) instalado no ponto escolhido, registrar a hora de início e término da coleta de dados, anotar o número do receptor e o tempo total de rastreamento, conforme apresentado na Tabela 3. Esses registros detalhados foram indispensáveis para o pós-processamento dos dados.

Tabela 3: Registro da coleta de dados do GNSS

CARDENETA DE CAMPO						
DATA	PONTO	RECEPTOR	ALTURA(m)	INICIO	FIM	TEMPO
03/04/24	IFAL001	9914	0,514	09:31	12:34	03:03
03/04/24	P01	9916	1,944	11:12	11:49	00:37
03/04/24	P02	5599	2,058	11:16	11:49	00:33
11/04/24	IFAL001	5499	0,514	10:00	12:44	02:44
11/04/24	P03	9916	2,263	11:30	12:00	00:30
11/04/24	P04	9914	1,895	11:29	12:00	00:31

Fonte: Os autores, 2024.

Após o término das etapas de coleta, os dados passaram pelo processo de ajustamento, garantindo a correção e a precisão necessária. Com isso, foi possível obter as coordenadas georreferenciadas dos pontos de apoio, essenciais para a realização do aerolevanteamento. Além disso, neste estudo, adotou-se a altitude normal devido à sua relação direta com a superfície física e sua ampla aplicação em projetos de engenharia, reforçando a confiabilidade dos resultados obtidos.

4.2.3 Aerolevanteamento fotogramétrico com drone

O voo fotogramétrico foi realizado no dia 11 de junho de 2024, às 12h30, utilizando um drone multirrotor, modelo DJI Phantom 4 RTK (Figura 26), cujas especificações da câmera estão detalhadas no Quadro 4. Este equipamento foi selecionado por sua capacidade de capturar imagens de alta resolução e pela precisão de seu sistema GNSS, características indispensáveis para a obtenção de dados confiáveis no levantamento.

Figura 26: DJI Phantom 4 RTK



Fonte: Os autores, 2024.

Quadro 4: Especificações da câmera empregada

ARP	SENSOR	LENTE	RESOLUÇÃO DA IMAGEM	PRECISÃO
Phantom 4 RTK	CMOS 1" (20MP) RGB	FOV = 84° 8,8mm/24mm	5472x3648	horizontal no modo RTK $\pm 1\text{mm} + 1\text{ppm}$ vertical no modo RTK $\pm 1,5\text{mm} + 1\text{ppm}$ horizontal no modo absoluto $\pm 5\text{cm}$

Fonte: Os autores, 2024.

4.2.3.1 Planejamento do Voo

A etapa inicial do levantamento consistiu no planejamento do voo, envolvendo a definição da área a ser mapeada e a verificação das condições necessárias para sua realização. A previsão meteorológica foi consultada para garantir a segurança do voo, e o horário de execução foi definido dentro de uma "janela de voo", priorizando condições de iluminação adequadas e minimizando a presença de sombras nas imagens capturadas.

Após a validação das condições de voo, foi elaborado o plano de voo (Figura 27) a ser executado pelo piloto automático do drone. Os parâmetros definidos para a missão foram:

- Sobreposição lateral: 80%;
- Sobreposição longitudinal: 80%;
- Grade de voo cruzado;

- Posição da câmera fotográfica: capturas em ângulo nadir (-90°);
- Altura de voo: 100 metros em relação ao ponto de decolagem;
- GSD médio estimado: 3,5 cm/pixel;
- Duração do voo: aproximadamente 15 minutos;
- Área mapeada: 15 hectares.

Figura 27: Plano de voo



Fonte: Os autores, 2024.

4.2.3.2 Execução do Voo

A execução do voo fotogramétrico seguiu o plano previamente elaborado, iniciando com a checagem dos equipamentos, incluindo baterias, cartão de memória e comunicação entre a estação de controle e a aeronave. Qualquer problema detectado que comprometesse a segurança do levantamento resultava no cancelamento da operação.

Com a verificação concluída, foi iniciado o aplicativo de controle do drone, realizando a checagem de voo e acionando a decolagem automática. O drone operou de forma automática para executar o plano de voo, mas com supervisão contínua do operador, que poderia intervir se necessário. Durante o voo, a estação de controle (RC – Rádio Controle) em solo monitorou, em tempo real, o vídeo da câmera, os dados de telemetria (altitude, velocidade, localização e nível de bateria) e o progresso do levantamento.

Foram capturadas 248 imagens aéreas com correção em tempo real (RTK), utilizando solução fixa com precisão centimétrica. O ponto P1 exemplificado na Figura

28 foi usado como base para o envio de correções via receptor GNSS DJI D-RTK2. Ao término do plano de voo, a aeronave retornou à base e realizou o pouso.

Figura 28: Receptor GNSS DJI D-RTK2



Fonte: Os autores, 2024.

4.2.3.3 Pós-Voo

Após cada voo, foi avaliada a trilha de voo para verificar a ausência de interrupções e possíveis desvios significativos que poderiam comprometer a sobreposição das imagens. Com os dados adquiridos, foi realizado o gerenciamento criterioso das imagens e informações capturadas, assegurando sua integridade para o processamento posterior.

Os alvos fixados no terreno (Figura 29), previamente posicionados, garantiram contraste visual nos softwares de processamento, facilitando a identificação e o ajuste preciso do ponto de controle (P1) no modelo final. Esses pontos foram essenciais para a calibração geométrica, garantindo a exatidão do resultado.

Figura 29: Alvos artificiais para identificação durante plano de voo.



Fonte: Os autores, 2024.

4.3 ENSAIO DE LABORATÓRIO

4.3.1 Preparação da amostra

A preparação das amostras de solo para os ensaios de limite de liquidez, plasticidade, granulometria e massa específica dos grãos foi conduzida de acordo com a NBR 6457/2024. O procedimento incluiu as seguintes etapas:

- Secagem prévia;
- Destorroamento;
- Pesagem;
- Peneiramento.

Secagem prévia das amostras:

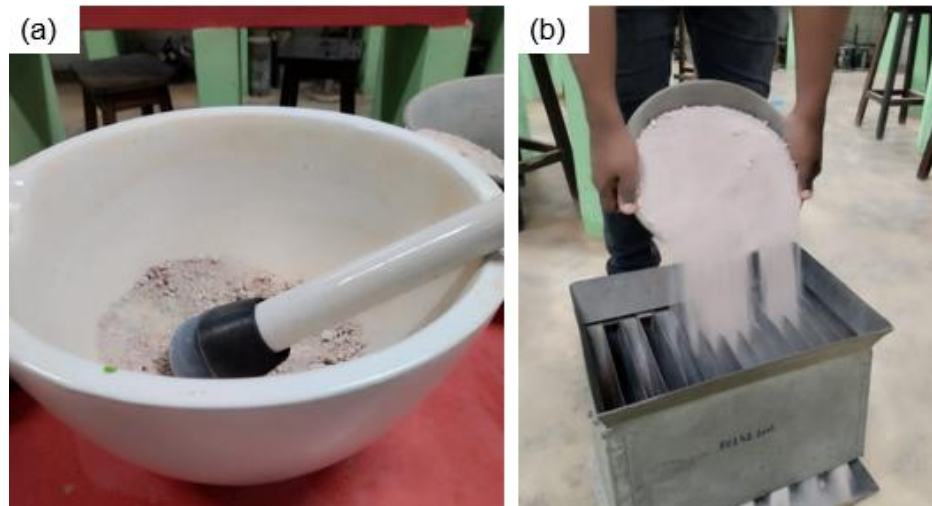
As amostras foram submetidas à secagem prévia utilizando o método de exposição ao ar. As amostras foram espalhadas em uma área aberta e coberta, permitindo a secagem natural. Esse método foi escolhido para evitar qualquer alteração nas características do material devido ao calor excessivo.

Destorroamento da amostra:

Após a secagem, as amostras foram desagregadas manualmente. Utilizando um almofariz de porcelana, as partículas foram desagregadas por pressão com movimentos circulares, garantindo que o tamanho natural das partículas fosse preservado. A mão de gral utilizada estava recoberta de borracha em perfeito estado para evitar a quebra das partículas (Figura 30a).

A amostra representativa, obtida por quarteamento do solo destorroado (Figura 30b), teve massa aproximada de 2000 g para solos argilosos ou siltosos e 2500 g para os de natureza arenosa ou pedregulhosa. Em seguida, essa porção foi pesada em balança com resolução de 1 g.

Figura 30: (a) Destorroamento da amostra, (b) Quarteamento da amostra



Fonte: Os autores, 2024.

Peneiramento da amostra

Na etapa final do procedimento, executou-se o peneiramento da amostra para separar o material conforme os diferentes ensaios a serem realizados. Antes do peneiramento, foi efetuado um novo destorroamento para garantir que todos os torrões estivessem completamente desagregados.

Primeiramente, uma fração da amostra foi passada pela peneira de 4,8 mm, resultando em aproximadamente 500 g de material, que constituíram a amostra para o ensaio de determinação da massa específica dos grãos. Em seguida, outra parte da amostra foi passada pela peneira de 2,0 mm (nº 10). O material retido nessa peneira foi destinado ao ensaio de granulometria grossa, enquanto o material que passou foi separado para a determinação da umidade higroscópica, granulometria fina e avaliação dos limites de consistência.

O material que passou na peneira nº 40 foi utilizado para os ensaios de limite de liquidez (aproximadamente 100 g), limite de plasticidade (aproximadamente 50 g).

Essa metodologia assegurou que as amostras fossem preparadas de maneira uniforme e precisa para os ensaios subsequentes, conforme os padrões estabelecidos pela NBR 6457/2024.

4.3.2 Teor de umidade

Caputo (1977) define o teor de umidade como sendo a relação entre o peso da água existente no solo e o peso seco das partículas sólidas do solo, expressa em

porcentagem. Esse índice físico, definido por Caputo se tornou fundamental para prever o comportamento dos solos que serão utilizados em diversas áreas da construção civil.

No Brasil, a determinação da umidade do solo é padronizada pela norma NBR 6457/2024 - Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Segundo essa normativa, o procedimento para realizar o ensaio consiste, resumidamente, em tomar uma quantidade de material, ajustada conforme a Tabela 4, destorroar sem perda de umidade, e colocar em cápsulas metálicas.

Tabela 4: Quantidade de material em função da dimensão dos sólidos maiores

Dimensão dos sólidos (grãos) maiores contidos na amostra, determinada visualmente Mm	Quantidade de material (em massa seca) a ser utilizada g	Balança a ser utilizada	
		Capacidade nominal g	Resolução g
< 2	30	200	0,01
2 a 20	30 a 300	1 500	0,1
20 a 76	300 a 3 000	5 000	0,5

Fonte: NBR 6457, 2024.

Em seguida, pesar o conjunto. A cápsula é então colocada na estufa a uma temperatura de 105°C a 110°C por um período geralmente entre 16 e 24 horas, necessário para secar o material. Dependendo do tipo e quantidade de solo, ou se estiver muito úmido, podem ser necessários intervalos maiores. Após a secagem, é realizada uma nova pesagem. Pelo menos três determinações do teor de umidade devem ser feitas por amostra. O teor de umidade é calculado dividindo a massa de água contida na amostra de solo pela massa seca das partículas sólidas do solo, expressando o resultado em porcentagem, conforme a fórmula abaixo.

$$h(\%) = \frac{M_a}{M_s} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

- $h(\%)$ = Teor de umidade
- M_a = Massa de água
- M_s = Massa de solo seco.

4.3.3 Massa específica dos grãos

A massa específica dos grãos (P_s) é definida como a relação entre a massa e o volume de uma partícula de solo, desconsiderando-se completamente os vazios

presentes no material. Em outras palavras, essa medida reflete apenas as características intrínsecas do sólido. A expressão matemática para o cálculo da massa específica dos grãos considera essa relação direta através da Equação (11).

$$P_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (11)$$

onde

- P_s = Massa específica dos grãos;
- M_s = Massa de sólidos;
- V_s = Volume dos grãos.

Para determinar a massa específica dos grãos é necessário conhecer o volume real ocupado pelas partículas sólidas do solo. No ambiente de laboratório, essa medição é realizada com base no princípio do deslocamento de líquido, segundo o qual um corpo imerso em água desloca um volume igual ao seu próprio.

Esse deslocamento é medido indiretamente por meio da quantidade de água deslocada. Para isso, utiliza-se um picnômetro, recipiente de volume conhecido e adequado para essa finalidade.

De acordo com a NBR 6457, uma fração da amostra de solo é previamente peneirada na malha de 4,8 mm, de onde são obtidos aproximadamente 500 g de material representativo. O procedimento específico para partículas com diâmetro inferior a 4,8 mm está descrito na NBR 6458, que trata da determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos grãos de pedregulho.

A massa específica dos grãos é então calculada pela seguinte equação:

$$\rho_s = \frac{(M_1) \left(\frac{100}{100 + W} \right)}{\left(M_1 * \frac{100}{100 + W} \right) + M_3 - M_2} * \rho_w(t) \quad (12)$$

Onde:

- ρ_s = Massa específica dos grãos de solo (g/cm^3)
- M_1 = Massa de solo úmido (g)
- M_2 = Massa do picnômetro ou balão volumétrico + solo + água.
- M_3 = Massa do picnômetro ou balão volumétrico cheio de água.
- w = Umidade inicial da amostra.
- ρ_w = Massa específica da água, à temperatura T do ensaio (Tabela 5).

Tabela 5: Tabela A1- Massa específica da água, em g/cm³ entre 0 °C e 40 °C

°C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
1	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9
2	99	99	99	99	99	99	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0
3	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0
4	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0
5	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0
6	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 0	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9
7	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9	0,999 9
8	99	99	99	99	99	98	98	98	98	98
9	98	98	98	98	98	98	98	98	97	97
10	0,999 7	0,999 7	0,999 7	0,999 7	0,999 7	0,999 7	0,999 7	0,999 7	0,999 7	0,999 6
11	96	96	96	96	96	96	96	96	95	95
12	95	95	95	95	95	95	95	94	94	94
13	94	94	94	94	94	93	93	93	93	93
14	93	93	92	92	92	92	92	92	92	91
15	0,999 1	0,999 1	0,999 1	0,999 1	0,999 1	0,999 0	0,999 0	0,999 0	0,999 0	0,999 0
16	90	90	89	89	89	89	89	89	88	88
17	88	88	88	87	87	87	87	87	87	86
18	86	86	86	86	85	85	85	85	85	85
19	84	84	84	84	84	83	83	83	83	83
20	0,998 2	0,998 2	0,998 2	0,998 2	0,998 1	0,998 1	0,998 1	0,998 1	0,998 1	0,998 0
21	80	80	80	80	79	79	79	79	78	78
22	78	78	78	77	77	77	77	76	76	76
23	76	75	75	75	75	74	74	74	74	74
24	73	73	73	73	73	72	72	72	71	71
25	0,997 1	0,997 0	0,997 0	0,997 0	0,997 0	0,996 9	0,996 9	0,996 9	0,996 9	0,996 8
26	68	68	68	67	67	67	67	66	66	66
27	65	65	65	65	64	64	64	63	63	63
28	63	62	62	62	61	61	61	61	60	60
29	60	59	59	59	59	58	58	58	57	57
30	0,995 7	0,995 6	0,995 6	0,995 6	0,995 6	0,995 5	0,995 5	0,995 5	0,995 4	0,995 4
31	54	53	53	53	52	52	52	51	51	51
32	51	50	50	50	49	49	49	48	48	48
33	47	47	47	46	46	46	45	45	45	44
34	44	44	43	43	43	42	42	42	41	41
35	0,994 1	0,994 0	0,994 0	0,994 0	0,993 9	0,993 9	0,993 9	0,993 8	0,993 8	0,993 7
36	37	37	36	36	36	35	35	35	34	34
37	34	33	33	32	32	32	31	31	31	30
38	30	30	29	29	28	28	28	27	27	27
39	26	26	25	25	25	24	24	24	23	23
40	22									

Fonte: NBR 6458, 2016.

4.3.4 Peso específico total (natural)

A coleta da amostra foi realizada utilizando-se um cilindro metálico de cravação, adotado como corpo de prova para determinação do peso específico natural do solo (γ_n). O procedimento foi conduzido com cautela, a fim de preservar a estrutura do solo e evitar a compactação durante a inserção do cilindro. Para isso, o solo ao

redor do cilindro foi cuidadosamente escavado à medida que o mesmo era cravado, garantindo a representatividade e a integridade da amostra indeformada.

Após a extração, foram realizadas medições em triplicata das dimensões internas do cilindro (diâmetro e altura), utilizando um paquímetro de precisão, resultando em um volume de 52,051 cm³. A massa do cilindro vazio foi previamente determinada em 120,19 g com o auxílio de uma balança de precisão. Esses dados foram utilizados no cálculo do peso específico natural, com base na massa da amostra úmida coletada no interior do cilindro, subtraindo-se a massa do cilindro vazio.

A massa úmida da amostra (M_u) foi obtida pela diferença entre a massa do conjunto (cilindro + solo) e a massa do cilindro vazio, através da Equação (13):

$$M_u = M_{total} - M_c \quad (13)$$

Com a massa úmida e o volume do cilindro, foi possível calcular o peso específico natural do solo (γ_n), utilizando a seguinte equação:

$$\gamma_n = \frac{M_u * g}{V} \quad (14)$$

Onde:

- $\gamma_n =$ *Peso específico natural* ($\frac{KN}{m^3}$)
- $M_u =$ *Massa úmida da amostra* (g)
- $g =$ *Aceleração da gravidade* (9,81 m/s²)
- $V =$ *volume do cilindro* (cm³), convertido para m³

4.3.5 Análise granulométrica

O ensaio de granulometria é o processo utilizado para determinar a percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. A partir dos resultados obtidos nesse ensaio, é possível construir a curva de distribuição granulométrica e classificar os solos.

Considerando a análise granulométrica por sedimentação, foram realizados dois procedimentos: um com a adição de defloculante (hexametáfosfato de sódio) e outro sem sua adição, seguidos do peneiramento e da geração da curva granulométrica. A sedimentação com defloculante tem como objetivo a desagregação das partículas de argila e silte, permitindo uma análise mais precisa das frações finas do solo. Por outro lado, a análise sem defloculante possibilita avaliar o comportamento natural do solo, reproduzindo uma condição mais próxima da realidade em campo.

O ensaio foi realizado em condições de temperatura controlada para evitar a perda de umidade do material por evaporação. Todas as etapas seguiram as diretrizes das normas técnicas: NBR 6457 – ABNT – “Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização” e NBR 7181 – “Solo - Análise Granulométrica”.

De acordo com a NBR 6457, deve-se secar a amostra, até próximo da umidade higroscópica. Desmanchar os torrões, evitando a quebra de grãos, e homogeneizar a amostra. Com o auxílio do repartidor de amostras, ou pelo quarteamento, reduzir a quantidade de material até se obter uma amostra representativa em quantidade suficiente para a realização do ensaio. Tomar uma fração da amostra obtida e passar na peneira de 76 mm, desprezando o material eventualmente retido. Do material passado na peneira de 76 mm, tomar uma quantidade, função da dimensão estimada dos grãos maiores, conforme a tabela abaixo:

Tabela 6: Quantidade de amostra para análise granulométrica

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra determinada por observação visual (mm)	Quantidade mínima a tomar (Kg)
<5	1
5 a 25	4
>25	8

Fonte: NBR 6457, 2024.

O ensaio consistiu em três etapas: Peneiramento grosso, sedimentação e peneiramento fino:

Peneiramento Grosso: Nesta etapa, utilizou-se uma amostra representativa de aproximadamente 1 kg, conforme indicado na Tabela 6. Esse material foi peneirado na peneira nº 10 (2,0 mm). As partículas retidas foram lavadas diretamente na peneira para garantir a remoção do material fino aderente aos grãos.

Após a lavagem, a amostra retida foi transferida para uma cápsula numerada e levada à estufa para secagem por um período mínimo de 12 horas. Após a secagem, o solo seco foi submetido ao peneiramento nas peneiras com aberturas de 38,1 mm, 25,4 mm, 19,1 mm, 9,5 mm, 4,8 mm e 2,0 mm. Para concluir esta etapa, calculou-se a porcentagem do material retido em cada peneira, em relação ao peso total da amostra seca, permitindo a análise granulométrica do material retido.

Sedimentação: Para o ensaio de sedimentação com defloculante, foram retiradas aproximadamente 70 gramas do material que passou pela peneira nº 10 (2,00 mm). Esse material foi colocado em um Becker, onde foram adicionados 125 cm³ de solução de hexametáfosfato de sódio, atuando como agente defloculante. A mistura permaneceu em repouso por, no mínimo, 12 horas.

Após o período de repouso, a mistura foi transferida para o copo do dispersor, e o volume foi completado com água destilada. Em seguida, a amostra foi submetida à ação do dispersor mecânico por aproximadamente 15 minutos, garantindo a completa desagregação das partículas.

Após a dispersão, o material foi transferido para uma proveta graduada de 1 litro e agitado manualmente por 1 minuto. Imediatamente após a agitação, foram realizadas leituras com o densímetro nos seguintes intervalos: 0,5 min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 24 h.

Para a análise sem defloculante, utilizou-se uma solução com água destilada, na qual foram adicionados 125 ml de água destilada a 70 g de solo. O material foi submetido aos mesmos tempos de imersão utilizados nos ensaios com defloculante, e todos os procedimentos descritos anteriormente foram repetidos.

Peneiramento fino: Para a análise granulométrica da fração fina, o conteúdo de ambas as provetas, com e sem defloculante, foi vertido e lavado sobre a peneira nº 200 (0,075 mm). O material retido nessa peneira foi cuidadosamente transferido para uma cápsula numerada e levado à estufa para secagem completa.

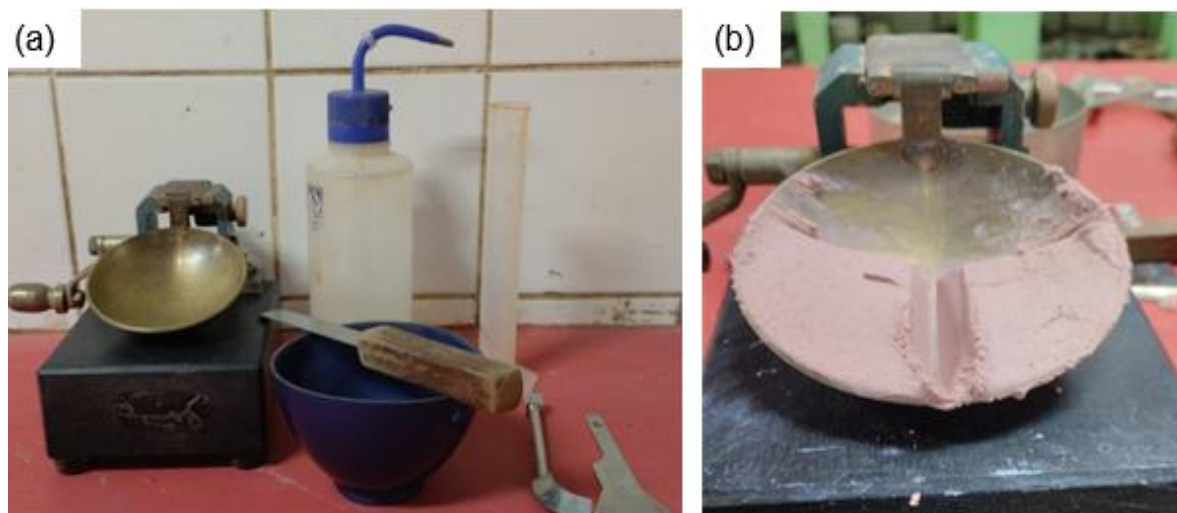
Após a secagem, o material foi peneirado em uma série de peneiras com aberturas de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,30 mm, 0,15 mm e 0,075 mm. Para finalizar a análise, foram calculadas as porcentagens de material retido em cada peneira, em relação a massa total da amostra seca.

4.3.6 Limite de liquidez

A metodologia para o ensaio de limite de liquidez foi realizada conforme a norma NBR 6459/2017 e envolve várias etapas essenciais. Primeiramente, a amostra de solo é preparada conforme a NBR 6457/2024. O solo é seco ao ar, destorroado cuidadosamente e peneirado com uma peneira de 0,425 mm (peneira nº 40) até obter uma amostra de 100g para a realização do ensaio.

Com os 100g de solo, foi preparada uma pasta, adicionando água destilada até que atingisse uma consistência fluida. O aparelho de Casagrande (Figura 31a) foi montado, verificando-se que a concha estava a 10 mm do fundo da base quando levantada e que a ranhura da ferramenta de corte (cinzel) era uniforme.

Figura 31: (a) Aparelho Casagrande, (b) Abertura da ranhura.



Fonte: Os autores, 2024.

Uma porção da pasta foi cuidadosamente depositada na concha do aparelho, preenchendo aproximadamente dois terços de sua capacidade e nivelando a superfície com uma espátula. Em seguida, a pasta foi dividida ao meio com o cinzel, criando uma ranhura reta e uniforme (Figura 31b). A manivela do aparelho foi girada a uma velocidade constante de duas revoluções por segundo, contando-se o número de golpes necessários para que as bordas inferiores da ranhura se fechassem ao longo de 13 mm. Imediatamente após, uma pequena quantidade do material junto às bordas que se uniram foi transferida para um recipiente adequado para a determinação do teor de umidade. O restante do solo que ficou na concha foi transferido para uma cápsula de porcelana. Em seguida, a concha e o cinzel foram lavados e secos para reutilização.

O processo anteriormente descrito é repetido para diferentes teores de umidade, ajustando a quantidade de água para que o número de golpes varie entre 15 e 35. Os resultados são plotados em um gráfico com o número de golpes em escala logarítmica no eixo x e o teor de umidade no eixo y. A linha de melhor ajuste é traçada, e o limite de liquidez é o teor de umidade correspondente a 25 golpes na linha de melhor ajuste.

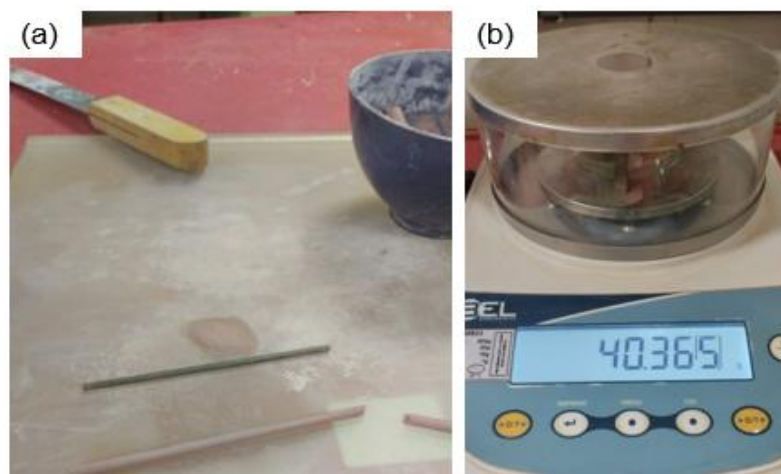
4.3.7 Limite de plasticidade

O limite de plasticidade é um parâmetro essencial para calcular o índice de plasticidade dos solos, definido como o menor teor de umidade (expresso em porcentagem) com o qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, rolando o solo com a palma da mão sobre uma placa de vidro esmerilhada.

As etapas do ensaio foram conduzidas conforme as normas NBR 6457 – ABNT – “Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização” e NBR 7180 – ABNT – “Solo – Determinação do Limite de Plasticidade”. O procedimento começou utilizando 50 g de material passado na peneira nº 40 (0,425 mm). A amostra foi colocada em uma cápsula de borracha e pequenas quantidades de água destilada foram adicionadas até se obter uma massa plástica e uniforme.

Com a massa obtida, formou-se uma pequena bola de 10 g, que foi rolada sobre a placa de vidro esmerilhada, aplicando pressão suficiente com a mão para que a massa tomasse a forma de um cilindro de 3 mm de diâmetro por 10 cm de comprimento (gabarito). A operação foi repetida até que, devido à perda de umidade, o cilindro apresentasse fissuras ao atingir as medidas desejadas (Figura 32a). Ao alcançar esse ponto, os pedaços foram transferidos para um recipiente para a determinação da umidade em estufa conforme Figura 32b.

Figura 32: (a) Corpo de prova moldado sobre uma placa de vidro, (b) Pesagem das amostras.



Fonte: Os autores, 2024.

Essas operações foram repetidas até se obter um mínimo de três valores de umidade, assegurando que cada valor não diferisse mais ou menos de 5% da média.

4.3.8 Cálculo do Peso Específico Seco, Índice de Vazios e Peso Específico Saturado.

Para complementar a caracterização física dos solos amostrados, foram calculados os seguintes índices: peso específico seco (γ_d), índice de vazios (e) e peso específico saturado (γ_{sat}). Esses parâmetros são fundamentais para entender o comportamento do solo em diferentes condições de umidade e compactação, e foram obtidos a partir de correlações com dados experimentais de teor de umidade, peso específico natural e peso específico dos grãos.

Peso Específico Seco (γ_d)

O peso específico seco representa a massa de sólidos por unidade de volume total da amostra de solo, desconsiderando a umidade presente nos vazios. Esse índice é fundamental para avaliar o grau de compactação do solo e seu comportamento estrutural sob carregamento, sendo calculado pela Equação (15).

$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1 + w} \quad (15)$$

Onde:

- γ_d = Peso específico seco (kN/m^3);
- γ_n = Peso específico total (natural) (kN/m^3);
- w = Teor de umidade (adimensional).

Índice de Vazios (e)

O índice de vazios é definido como a razão entre o volume de vazios e o volume de sólidos da amostra de solo, conforme apresentado na Equação (16):

$$e = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_d} \right) - 1 \quad (16)$$

Onde:

- e = Índice de vazios (adimensional);
- γ_s = Peso específico dos grãos do solo (kN/m^3);
- γ_d = Peso específico seco (kN/m^3).

Ele é um indicador direto do grau de porosidade e influencia fortemente a compressibilidade, permeabilidade e suscetibilidade a colapsos do solo.

Peso Específico Saturado (γ_{sat})

O peso específico saturado é o valor assumido quando todos os vazios do solo estão completamente preenchidos por água, representando a condição mais crítica

em termos de carga e estabilidade. É um parâmetro essencial em análises de estabilidade de taludes e fundações, pois influencia diretamente as tensões efetivas no solo. Esse valor pode ser obtido por meio da Equação (17):

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{(G_s + e) * \gamma_w}{1 + e} \quad (17)$$

Onde:

- γ_{sat} = peso específico saturado (kN/m^3);
- e = Índice de vazios (adimensional);
- γ_w = Peso específico da água ($\approx 9,81 \text{ kN/m}^3$);
- γ_s = Peso específico dos grãos do solo (kN/m^3);
- G_s = Densidade específica dos grãos do solo (adimensional), calculada pela Equação (18):

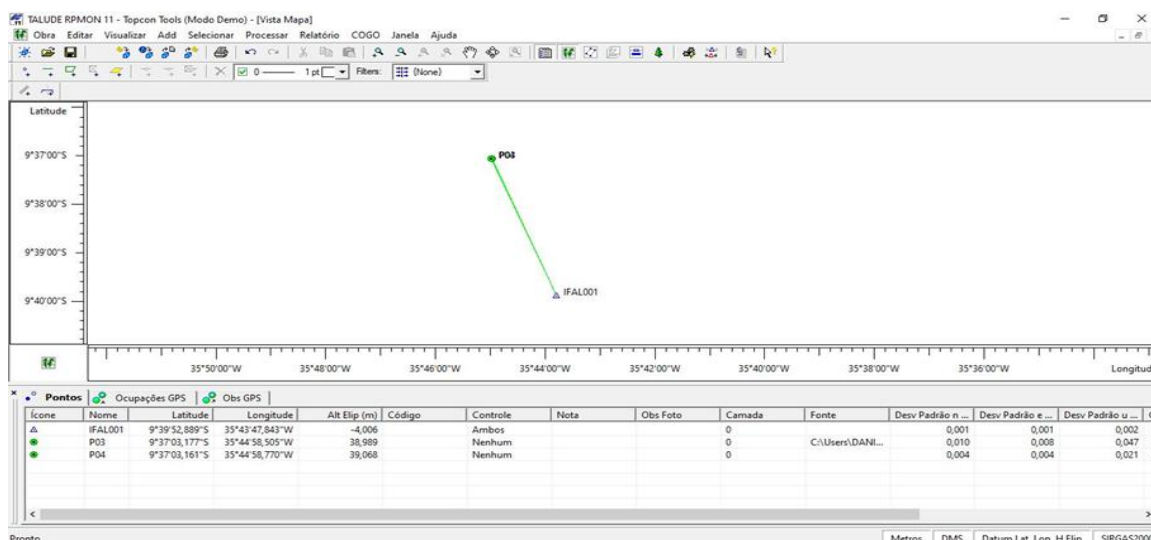
$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (18)$$

4.4 PROCESSAMENTO DE DADOS

4.4.1 Pós-processamento de observáveis GNSS

Para o ajustamento das coordenadas dos pontos de apoio implantados em campo, utilizou-se o Software Topcon Tools, versão 7.5.1, conforme ilustrado na Figura 33. Esse software foi empregado para o processamento e ajustamento das coordenadas, considerando as variações observadas nos dados coletados em campo, de modo a garantir a precisão e acurácia necessária para os experimentos subsequentes.

Figura 33: Pós-processamento e ajustamento de coordenadas.



Fonte: Os autores, 2024.

Os resultados do ajustamento das coordenadas, incluindo a componente altimétrica dos pontos implantados nas proximidades do talude serão apresentados no Apêndice, item 8.1 e 8.2, que contém os relatórios de ajustamento detalhado. A tabela abaixo mostra as coordenadas corrigidas dos pontos de apoio com suas respectivas altitudes geométricas.

Tabela 7: Resumo do processamento

PONTO	UTM		ALTURA GEOMÉTRICA
	N(m)	L(m)	
P 01	8.935.617,78	198.100,40	-0,06
P 02	8.935.606,17	198.108,26	0,20
P 03	8.935.661,58	198.202,04	38,99
P 04	8.935.662,02	198.193,96	39,07

Fonte: Os autores, 2024.

Conversão de Altitude Geométrica para Normal:

Para a conversão da altitude geométrica para altitude normal, foram utilizadas as coordenadas dos pontos geradas pelo software Topcon Tools. O processamento envolveu a interpolação dessas coordenadas geodésicas (latitude e longitude) no modelo hgeoHNOR2020 (IBGE 2020). O cálculo da altitude normal (H) foi realizado com a Equação (19):

$$H = h - N \quad (19)$$

Onde:

- H é a Altitude Ortométrica
- h é a Altitude Geométrica
- N é a Ondulação Geométrica

Os valores calculados para a altitude normal dos pontos ajustados estão apresentados na Tabela 8 abaixo.

Tabela 8: Modelo para conversão de altitudes geométricas (dadas pelos GNSS) em altitudes físicas

PONTO	COORDENADA UTM		ALTITUDE ELIPSÓIDAL (h)	ONDULAÇÃO GEOMÉTRICA (N)	ALTITUDE NORMAL (H)
	NORTE (m)	ESTE (m)			
P 01	8935617,781	198100,402	-0,062	-9,07	9,008
P 02	8935606,169	198108,255	0,204	-9,07	9,274
P 03	8935661,582	198202,038	38,989	-9,07	48,059
P 04	8935662,023	198193,957	39,068	-9,07	48,138

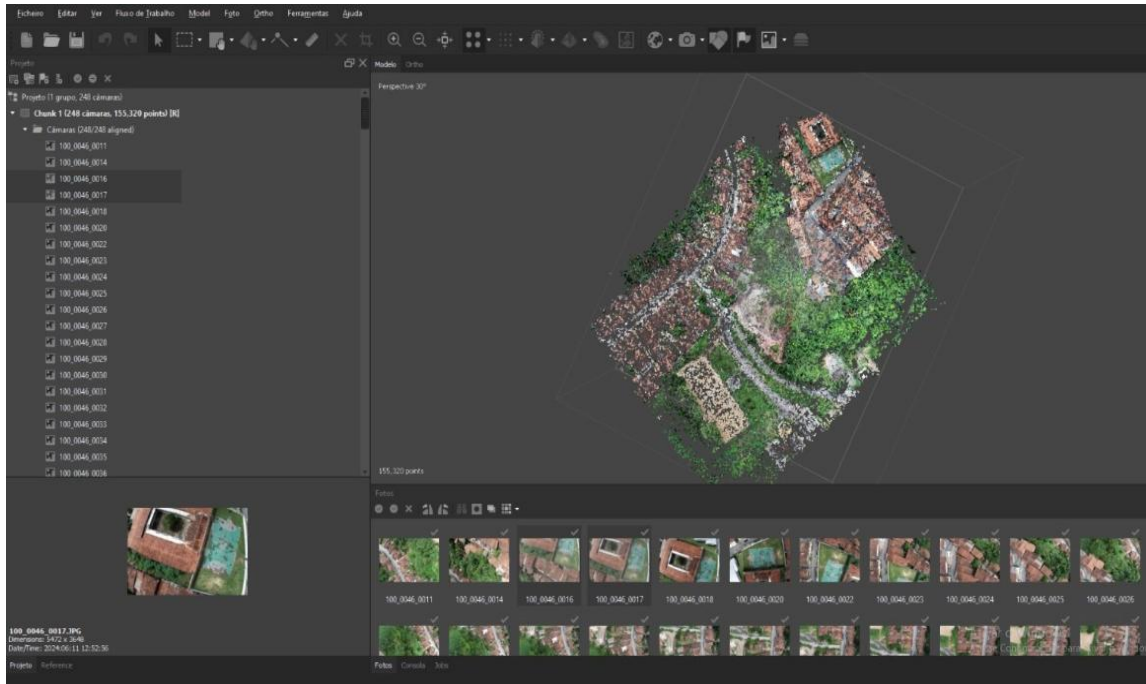
Fonte: Os autores, 2024.

Esses cálculos são essenciais para a obtenção de dados precisos de elevação, fundamentais para a execução e interpretação dos experimentos no projeto. A precisão dos resultados depende da correta utilização das ferramentas de software e da exatidão dos dados de campo.

4.4.2 Processamento dos dados com Agisoft Metashape

Os dados coletados por meio do levantamento com drone foram processados utilizando o software Agisoft Metashape exemplificado na Figura 34. Este programa é amplamente utilizado para o pós-processamento de imagens aéreas georreferenciadas, possibilitando o tratamento detalhado da superfície mapeada. Durante a geração da nuvem de pontos densa, foi aplicada uma resolução de qualidade alta, resultando em um total de 1.033.466 pontos.

Figura 34: Software Agisoft Metashape

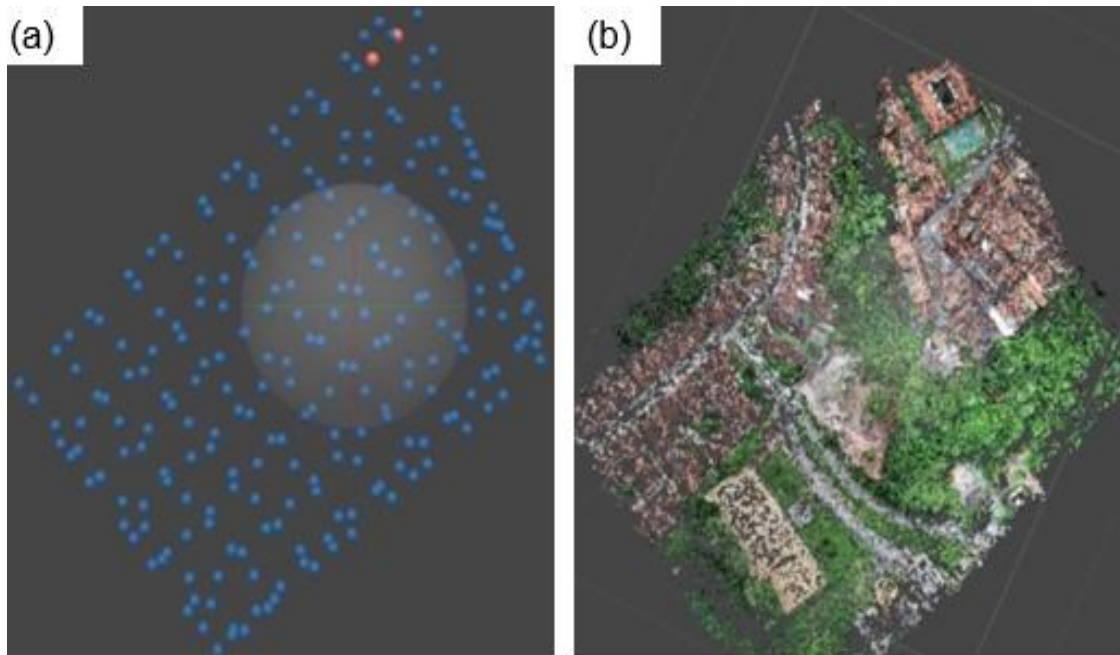


Fonte: Os autores, 2024.

➤ Alinhamento das imagens

Antes de iniciar o alinhamento das fotos, as imagens capturadas pelo drone são carregadas no software (Figura 35a). Nessa etapa, é importante garantir que todas as imagens estejam devidamente georreferenciadas e organizadas para o processamento. O alinhamento das imagens (Figura 35b) é então realizado, configurando a orientação interna das fotos e efetuando a triangulação dos pontos. Esse processo utiliza uma base de dados composta por coordenadas geográficas conhecidas e medidas angulares entre os pontos, corrigindo possíveis erros e definindo as coordenadas de cada pixel, considerando a variação do relevo e a altura da superfície. Como resultado, é gerada uma nuvem de pontos esparsa, também chamada de pontos fotogramétricos (*tie points*), que serve para estruturar o sistema de coordenadas do terreno. No final do processamento das imagens, foi gerado um relatório de processamento de dados (Apêndice 8.6)

Figura 35: (a) Fotos carregadas, (b) Alinhamento das imagens.



Fonte: Os autores, 2024.

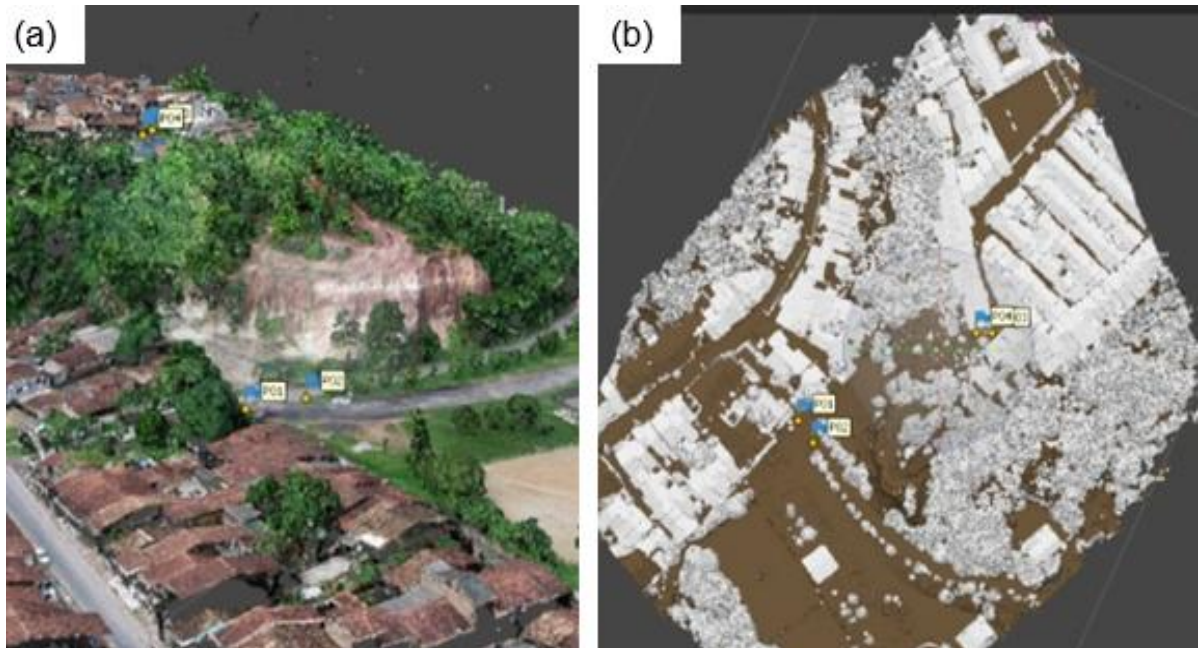
➤ Inserção de pontos de controle (P1)

Após o alinhamento das imagens, é necessário incluir os pontos de controle no projeto (P1). Para isso, importa-se um arquivo contendo as coordenadas altimétricas e planimétricas coletadas em campo com o auxílio de um receptor GNSS e processadas em um software específico. Essa etapa é essencial para aumentar a precisão e a confiabilidade do modelo gerado.

➤ Geração da nuvem densa de pontos

Na sequência, ocorre a densificação da nuvem de pontos (Figura 36a), processo que amplia significativamente o número de pontos por meio da interpolação de dados, utilizando tanto a nuvem esparsa previamente gerada quanto os pontos de controle. Após a densificação, é possível realizar a classificação da nuvem de pontos densa (Figura 36b), onde o software separa os dados em diferentes classes, como terreno, vegetação, edificações e outros objetos com obtenção de pontos densificados. Essa classificação é essencial para criar modelos mais precisos e segmentados, permitindo uma análise detalhada de elementos específicos da área mapeada.

Figura 36: (a) Nuvens de pontos densa, (b) Classificação da nuvem de pontos densa.

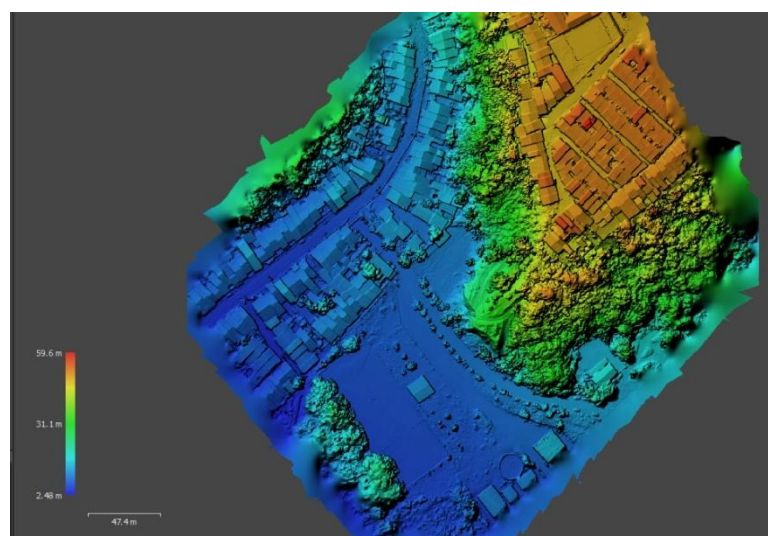


Fonte: Os autores, 2024.

➤ Criação do modelo digital de superfície (MDS)

Com a nuvem densa de pontos finalizada com qualidade alta para processamento foi possível gerar o Modelo Digital de Superfície (Figura 37). Esse modelo representa as elevações da superfície topográfica, incluindo elementos geográficos presentes na área de estudo, como vegetação e edificações. Assim, todos os objetos acima do nível do terreno são incorporados à representação digital.

Figura 37: Modelo Digital de Superfície.

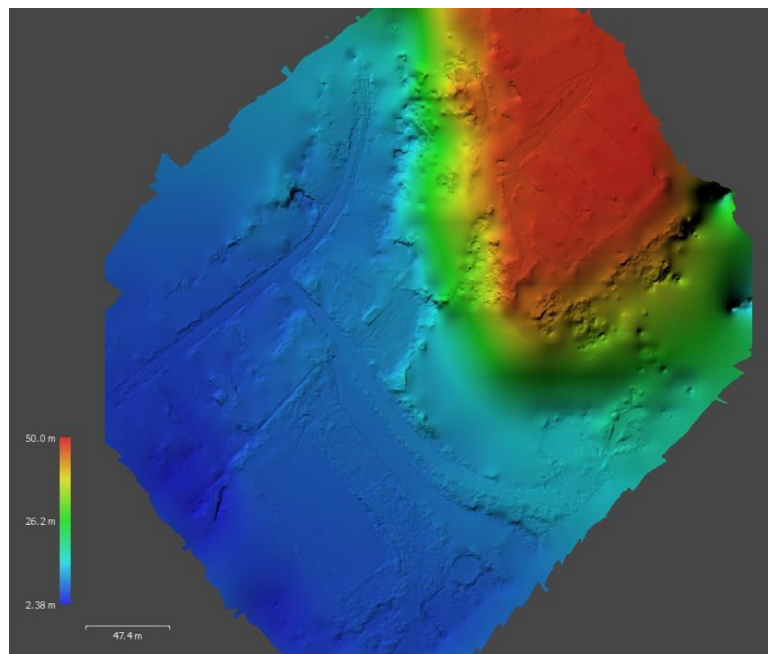


Fonte: Os autores, 2024.

➤ Criação do modelo digital de terreno (MDT)

Com a nuvem densa de pontos classificada e ajustada, foi possível gerar o Modelo Digital de Terreno (MDT) (Figura 38), no qual os dados referentes aos elementos acima do nível do solo, como edificações e vegetação, são removidos. O MDT representa apenas as elevações do terreno em sua forma natural, tornando-o ideal para análises geomorfológicas e estudos topográficos mais precisos.

Figura 38: Modelo digital de terreno.



Fonte: Os autores, 2024.

➤ Ortomosaico

Na última etapa, é elaborado o ortomosaico (Figura 39), onde as feições da superfície são projetadas ortogonalmente em uma escala uniforme. Esse processo corrige distorções causadas pelo relevo, pela posição e inclinação da câmera, transformando a perspectiva cônica em uma perspectiva ortogonal (Brito; Coelho Filho, 2009). Após a correção, as imagens sobrepostas são unidas, resultando em um único produto georreferenciado e de alta qualidade.

Figura 39: Ortomosaico.



Fonte: Os autores, 2024.

4.4.3 Construção dos perfis longitudinais no Civil 3D

Após o processamento do ortomosaico, o arquivo é exportado o MDT para o software Autodesk Civil 3D, uma ferramenta computacional amplamente utilizada para planejamento, modelagem e análise de projetos de infraestrutura. No Civil 3D, é possível gerar modelos tridimensionais do terreno, permitindo a extração de seções transversais e longitudinais, fundamentais para a análise de estabilidade de taludes.

Para a criação das seções do talude (Figura 40), o primeiro passo é definir um alinhamento horizontal no local escolhido, o qual deve ser traçado paralelo ao talude, acompanhando sua extensão ao longo do pé do talude. Esse alinhamento serve como base para a construção do modelo geométrico do terreno e auxilia na definição do comprimento analisado.

Com o alinhamento horizontal estabelecido, o próximo passo foi a geração das seções transversais, criadas perpendicularmente ao alinhamento, em intervalos regulares de 2,5 metros. Essas seções permitiram uma análise detalhada da geometria do talude, possibilitando a avaliação de sua inclinação, altura e variações

ao longo de sua extensão. A adoção desse espaçamento garantiu uma amostragem adequada da superfície, permitindo maior precisão nas análises de estabilidade realizadas posteriormente.

Figura 40: Criação das seções do talude.



Fonte: Os autores, 2024.

4.4.4 Metodologia adotada para análises de estabilidade

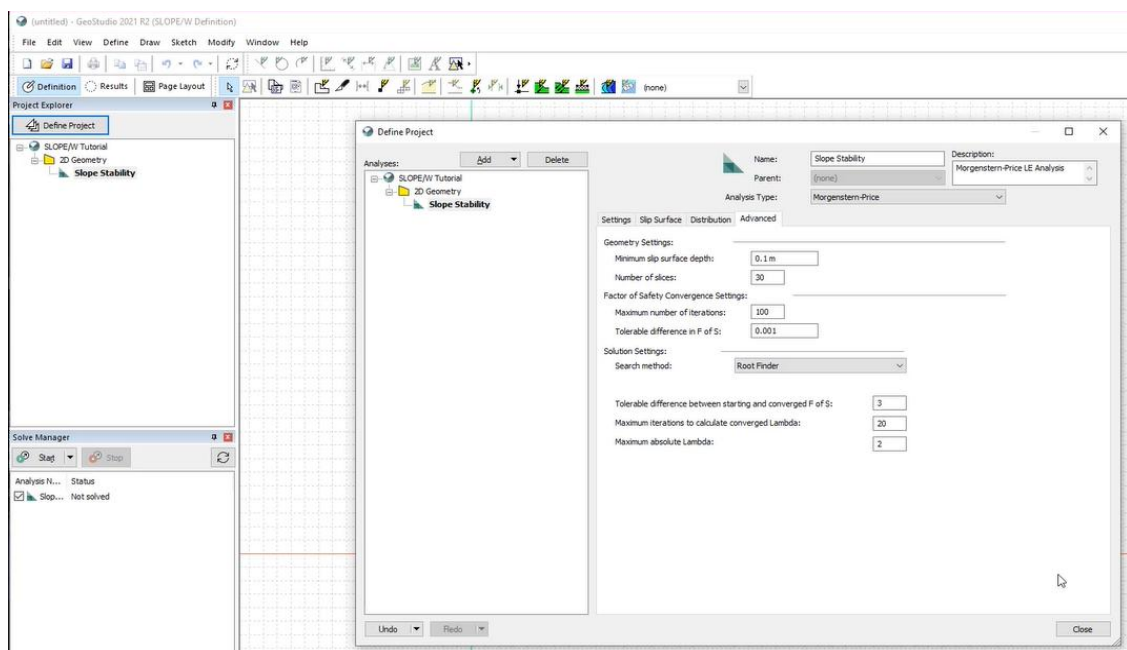
Para a análise da estabilidade dos taludes, utilizou-se o software SLOPE/W (Figura 41), da GeoSlope, que emprega a teoria do equilíbrio-limite para calcular o fator de segurança (FS). De acordo com essa teoria, a ruptura do talude ocorre quando as tensões atuantes se igualam às tensões resistentes (Dutra, 2013). A modelagem foi realizada com base na seção transversal do talude, considerando a ausência de sondagens para a determinação do nível d'água. O SLOPE/W permite a modelagem de estratigrafias heterogêneas, diferentes tipos de solos, mecanismos de ruptura e variações nas condições de saturação.

Para a realização das análises de estabilidade, foi essencial o levantamento planialtimétrico detalhado da encosta e a consequente definição das seções representativas de estudo, conforme descrito no item 4.4.3. Esses dados permitiram a modelagem tridimensional da superfície do terreno no software SLOPE/W,

viabilizando a identificação das zonas críticas ao deslizamento por meio da determinação da seção com o menor fator de segurança.

Com o modelo geométrico da encosta devidamente estabelecido, procedeu-se à aplicação de uma sobrecarga uniformemente distribuída de 20 kPa ao longo da crista do talude, a fim de avaliar o impacto dessa carga adicional na estabilidade global da estrutura. Tal valor de sobrecarga está em conformidade com a ABNT NBR 11682:2019, que recomenda a consideração de sobrecarga acidental mínima para estruturas de contenção. No entanto, como a norma não define explicitamente uma distância mínima entre essa carga e a crista do talude, adotou-se nas simulações a aplicação direta a partir da borda superior, como forma de representar uma condição crítica e conservadora para fins de análise.

Figura 41: Software SLOPE/W.



Fonte: Os autores, 2024.

Com base na teoria do equilíbrio-limite, foi adotado o método das lamelas com superfície circular para identificar a superfície de ruptura do talude. Esse método se fundamenta na relação entre o somatório dos momentos resistentes e dos momentos atuantes (Vilar, 2004). No processo de definição dos critérios para a análise de estabilidade, optou-se por utilizar dois métodos amplamente reconhecidos na engenharia geotécnica:

O método de Bishop (1955), classificado como uma abordagem menos rigorosa por desconsiderar a ação das forças tangenciais nas faces laterais das lamelas, ainda que leve em conta a interação entre elas.

O método de Morgenstern-Price (1965), considerado mais preciso por satisfazer todas as condições de equilíbrio (força e momento) por meio de equações diferenciais, contemplando todas as forças atuantes no maciço (Freitas, 2011).

A Tabela 9 apresenta um comparativo entre os métodos de Bishop e Morgenstern-Price, evidenciando suas principais características, vantagens e limitações.

Tabela 9: Comparativo entre o método de Bishop e Morgenstern-Price

Método	Bishop	Morgenstern- Price
Grau de rigor	Não rigoroso	Rigoroso
Superfície de deslizamento	Circular	Não circular
Fatias	Verticais	Verticais
Forças X	Não	Sim
Forças E	Sim	Sim
Inclinação resultante X/E	Horizontal	Vertical
$\sum FH = 0$	Não	Sim
$\sum FV = 0$	Sim	Sim
$\sum M = 0$	Sim	Sim

Fonte: Adaptado Oliveira, 2014.

Devido às incertezas associadas aos parâmetros geotécnicos, decorrentes da variabilidade natural dos solos e da obtenção dos dados por meio de ensaios laboratoriais, o software emprega a análise probabilística de Monte Carlo. Esse método possibilita a consideração dessas incertezas, proporcionando uma avaliação mais robusta da estabilidade dos taludes.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento utilizados na modelagem computacional, coesão efetiva (c') e ângulo de atrito interno efetivo (φ'), foram definidos com base na literatura, mais especificamente na obra de Severo, R.N.F. (2011), conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Parâmetros de resistência das amostras compactadas e dos blocos indeformados

PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA				
AMOSTRAS COMPACTADAS E INDEFORMADAS	PICO		GRANDES DEFORMAÇÕES	
	Φ' (°)	c' (kPa)	Φ' (°)	c' (kPa)
Compactadas A1	28,4	8,3	28,6	2,9
Indeformadas B1	29,4	6,5	29,4	5,8
Indeformadas B2	30,5	62,7	32,0	34,8
Indeformadas B3	28,3	110,5	33,3	52,2

Fonte: Severo, 2011.

Inicialmente, estava prevista a realização de ensaios laboratoriais específicos de resistência mecânica, como cisalhamento direto e triaxial, mas, devido às limitações operacionais e de infraestrutura, não foi possível executá-los. Diante disso, adotou-se uma abordagem conservadora, fundamentada na utilização de dados disponíveis na literatura técnica para solos com características semelhantes às amostras estudadas.

Foram selecionadas, então, as amostras B1 e B2 do estudo de Severo (2011), por apresentarem uma composição granulométrica semelhante à dos solos analisados, além de valores próximos de limites de consistência, peso específico dos grãos, peso específico natural e índice de vazios. Essa semelhança reforça a compatibilidade na adoção dos parâmetros de resistência propostos na bibliografia.

No caso da AM- 01, correlata à amostra B2, a coesão adotada foi relativamente elevada. Ainda assim, decidiu-se por manter esse valor, considerando que os pequenos deslizamentos identificados em campo estavam concentrados nas camadas superficiais mais frágeis do talude, representadas pela AM-02, compostas por material mais solto, menos coeso. Por outro lado, as camadas mais profundas, representadas pela AM-01, mostraram-se mais compactas, coesas e condizentes com os parâmetros de resistência atribuídos à B2.

Segundo Severo (2011), a elevada coesão observada no bloco B2 são indicativos de um certo grau de cimentação dos solos, o que pode justificar os altos valores assumidos para esse parâmetro. Essa interpretação encontra respaldo nas

observações de Clough et al. (1981), que afirmam que a introdução de um agente cimentante em solos arenosos tende a aumentar a coesão, mantendo, no entanto, o ângulo de atrito interno efetivo semelhante ao do solo não cimentado. Essa característica explica a manutenção de valores conservadores na simulação, sem comprometer a representatividade geotécnica do modelo numérico adotado.

O peso específico natural (γ) dos solos foi obtido a partir de ensaios laboratoriais de caracterização física. Já o peso específico saturado (γ_{sat}) foi determinado por meio de cálculos matemáticos, com base nos resultados de teor de umidade, peso específico dos grãos e peso específico natural. Com o objetivo de analisar o comportamento do talude sob diferentes condições de umidade, foram realizadas análises comparativas utilizando tanto o peso específico natural quanto o saturado.

O critério de equilíbrio-limite estabelece que o fator de segurança (FS) é a relação entre as forças resistentes do solo e as forças atuantes que podem provocar o deslizamento. Para a estabilidade global, os valores do FS variam conforme o nível de segurança contra danos ambientais, materiais e contra a perda de vidas humanas. A NBR 11682/2009 apresenta os fatores mínimos para deslizamentos de acordo com a Tabela 11. Com base nessa norma, foi adotado o valor de 1,5 como limite mínimo de estabilidade, visto que a localização do talude apresenta risco potencial à vida humana, ao patrimônio e ao meio ambiente.

Tabela 11: Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais \ Nível de segurança contra danos a vidas humanas	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

NOTA 1 No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10 %. Alternativamente, pode ser usado o enfoque semiprobabilístico indicado no Anexo D.

NOTA 2 No caso de estabilidade de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros γ , ϕ , c , em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico.

NOTA 3 Esta tabela não se aplica aos casos de rastejo, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

Fonte: NBR 11682, 2009.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos a partir da caracterização fisiográfica da área de estudo e dos ensaios geotécnicos, proporcionando uma compreensão detalhada das propriedades físicas do solo. Além disso, são discutidos os resultados das simulações realizadas no software SLOPE/W, as quais contribuíram significativamente para a avaliação da estabilidade dos taludes e a identificação de zonas com maior suscetibilidade a deslizamentos.

5.1 CARACTERÍSTICA GERAL DO MUNICÍPIO

Maceió, capital do estado de Alagoas, apresenta uma área territorial de aproximadamente 509,32 km², posicionando-se como a 10^a maior entre os 102 municípios alagoanos. De acordo com dados do IBGE (2022), a cidade conta com uma população estimada em 957.916 habitantes.

Geograficamente, Maceió está situada na costa nordeste do Brasil, sendo banhada pelo Oceano Atlântico a leste e pela lagoa Mundaú a oeste, uma das principais lagunas que compõem a identidade do estado. Essa localização costeira propicia um ambiente natural privilegiado, caracterizado por praias de águas cristalinas, como Pajuçara, Ponta Verde e Jatiúca, que são reconhecidas por sua beleza e atração turística. As piscinas naturais formadas durante a maré baixa são um dos principais atrativos, contribuindo para o desenvolvimento do turismo na região.

A divisão administrativa de Maceió é composta por 50 bairros, cada um apresentando características distintas que refletem a diversidade socioeconômica da cidade. A área costeira é marcada por uma urbanização intensa, enquanto a região lagunar abriga parte do patrimônio histórico, incluindo edificações coloniais e igrejas de relevância cultural. A região dos Tabuleiros, por sua vez, é caracterizada por uma geografia de vales e morros, que abriga tanto áreas residenciais quanto espaços verdes.

5.2 GEOLOGIA GERAL

A região metropolitana de Maceió está inserida em um contexto geológico complexo, que abrange duas províncias tectono-estruturais distintas. A primeira, conhecida como Província Borborema, aflora em uma pequena porção ao norte da

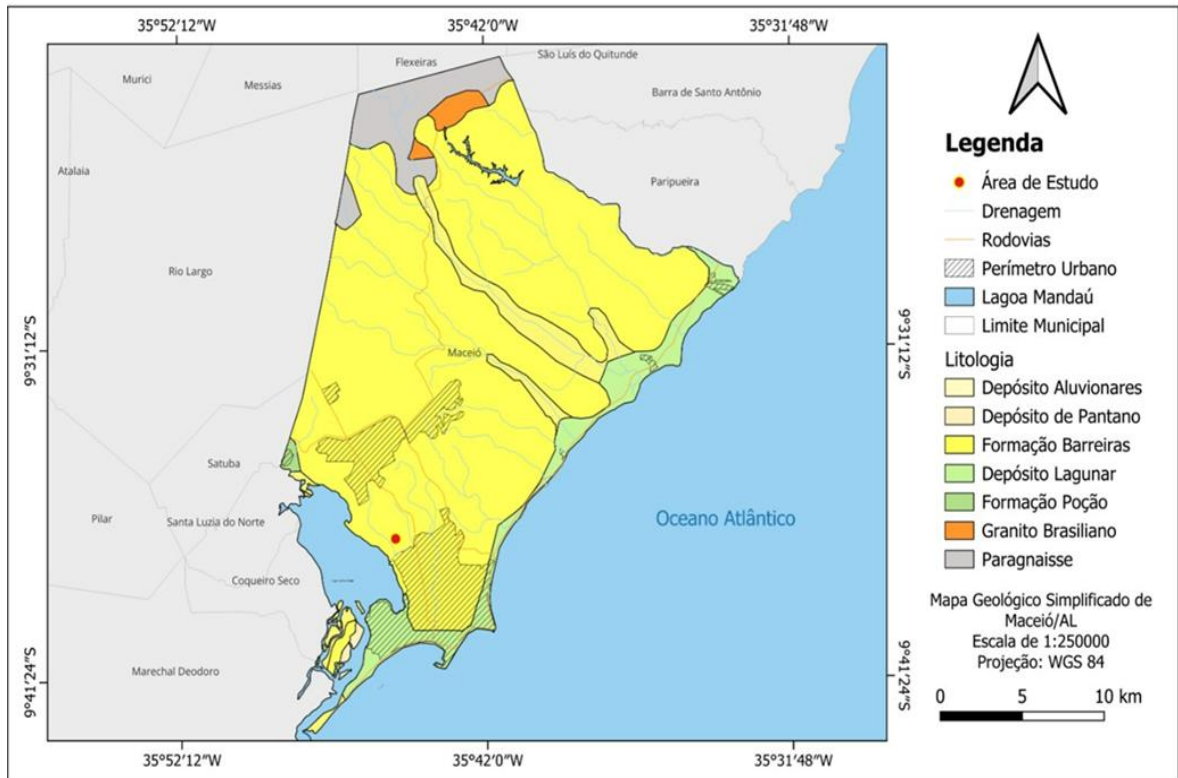
cidade de Maceió e inclui rochas do embasamento cristalino. A segunda é a Província Costeira, composta pelos sedimentos da Sub-Bacia de Alagoas.

A Sub-Bacia de Alagoas está situada ao longo da costa e da plataforma continental, cobrindo quase toda a margem atlântica oriental de Alagoas. Esta sub-bacia se estende por uma faixa costeira com aproximadamente 220 km de comprimento e uma largura média de 40 km, sendo delimitada no continente por falhas normais e, mar adentro, pelo talude continental. Ao sul, ela faz fronteira com a Bacia de Sergipe, enquanto ao norte se limita com a Bacia Pernambuco-Alagoas.

No Plioceno ocorreu um evento regressivo que propiciou a deposição dos sedimentos costeiros da Formação Barreiras na porção terrestre da Sub-Bacia (Campos Neto et al., 2007). Esta formação é composta essencialmente por sedimentos clásticos continentais, como arenitos grossos a conglomerático com baixo grau de compactação, intercalados com argilas variegadas (Feijó 1994).

A área de estudo localizada no bairro de Chã da Jaqueira, situado nos tabuleiros costeiros da formação Barreiras na cidade de Maceió – AL (Figura 42). A Formação Barreiras é constituída por sedimentos terrígenos muito lateritizados com coloração variegada, formado por arenitos inconsolidados com intercalações de siltito, argilito e níveis de caulinita. Apresenta granulometria grossa a conglomerática com matriz argilosa. Os níveis conglomeráticos são compostos essencialmente por grãos de quartzo (Santos, Lima e Ferreira neto, 2004).

Figura 42: Mapa geológico.



Fonte: Os autores, 2024. – Dados: Folha SC.25-V-C-IV (2023) da CPRM .

5.3 CLIMA

O clima de Maceió é tropical, classificado como quente e úmido do tipo As', segundo Köppen (1936) (Figura 43). Este clima é caracterizado por chuvas abundantes ao longo do ano e uma estação seca definida. A cidade possui duas estações: verão e inverno. O verão tem altas temperaturas e baixa pluviosidade, com chuvas passageiras. O inverno apresenta alto índice pluviométrico e temperaturas um pouco mais baixas. A principal diferença entre as estações é a incidência de chuvas.

Maceió também apresenta um alto índice de umidade relativa do ar. Dados das Normais Climatológicas (1991-2020) mostram que a umidade relativa média anual é de 78,17%. Em julho, conforme descrito na Tabela 12 a umidade atinge seu pico, com uma média mensal de 81,8%, enquanto dezembro apresenta a menor média, 74,9%.

Figura 43: Classificação climática de Köppen para o Estado de Alagoas.



Fonte: Embrapa Solos, 2012.

Tabela 12: Normais climatológicas para o período de 1991-2020

	Temperatura média (°C)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Chuva (mm)	Umidade(%)	Dias chuvosos (d)	Horas de sol (h)
Janeiro	26.1	24.1	28.6	76	76%	14	8.9
Fevereiro	26.3	24.3	28.8	76	77%	14	8.8
Março	26.4	24.4	28.8	90	78%	16	8.6
Abril	26	24.1	28.3	137	80%	17	8.2
Mai	25.2	23.6	27.2	182	82%	18	7.7
Junho	24.3	22.8	26.1	195	82%	19	7.6
Julho	23.6	22.1	25.4	186	81%	19	7.5
Agosto	23.5	21.9	25.4	119	78%	18	7.7
Setembro	24	22.4	26	80	77%	15	7.8
Outubro	24.9	23.1	27.1	68	77%	14	8.2
Novembro	25.6	23.6	28.1	50	75%	11	8.8
Dezembro	26.1	24.1	28.6	45	75%	12	9.0

Fonte: INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2021.

5.4 OCUPAÇÃO EM ÁREAS DE RISCO GEOLÓGICO

A geomorfologia de Maceió caracteriza-se pela presença de vales com encostas íngremes, onde, devido à ocupação irregular, surgem áreas popularmente conhecidas como “Grotas”. Esses vales encaixados cortam os tabuleiros e, nos altos e médios cursos, exibem perfis transversais em “V”, alargando-se no baixo curso, próximo às planícies marinhas e lagunares, onde assumem perfis em “U” (Anjos, 1992). No geral, as grotas são áreas desfavoráveis para a ocupação, devido às elevadas declividades (de 20° a 35°) e à exposição de sedimentos inconsolidados da Formação Barreiras, que resultam em amplitudes de relevo entre 30 e 70 metros (Ferrassoli; Alves; Mendes, 2019).

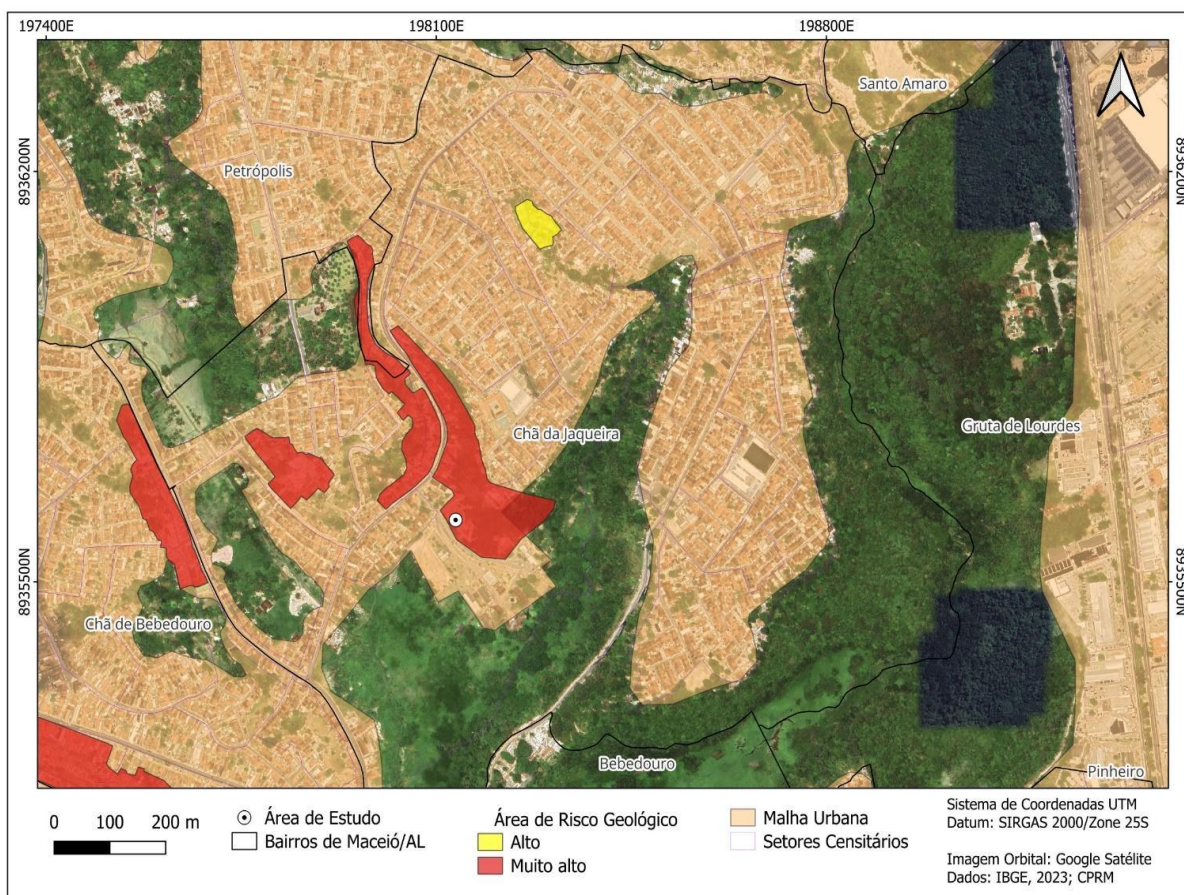
Com o objetivo de gerenciar as áreas de risco, foi instituído o Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR), que, em 2007, mapeou e classificou as áreas vulneráveis de Maceió, especialmente nas grotas, agrupando-as em sete complexos. O PMRR (PREFEITURA MUNICIPAL DE MACEIÓ, 2007) identificou a erosão, com predominância de sulcos e ravinas, como o principal processo destrutivo do solo nessas regiões, seguido de escorregamentos e solapamentos de margem, embora em menor escala.

Em 2022, a CPRM apresentou um levantamento sobre a população residente em áreas de risco geológico em Maceió, com o intuito de contribuir para políticas públicas de prevenção e resposta a desastres. Utilizando a interseção entre os dados de 1.058 setores censitários do Censo Demográfico de 2010, a área urbana e as 26 áreas de risco geológico mapeadas pela CPRM em 2017, o estudo delineou 76 polígonos de risco.

Com base nesses dados, estima-se que aproximadamente 1.835 domicílios estão situados em áreas de alto ou muito alto risco geológico, abrigando cerca de 6.474 pessoas, das quais 52% são mulheres e 48% homens, com idosos representando cerca de 13% desse total.

Esses dados ressaltam a urgência em fortalecer a gestão e o monitoramento das áreas de risco geológico em Maceió, especialmente nas grotas, onde a ocupação continua a crescer, intensificando a vulnerabilidade da população. A expansão urbana desordenada nessas regiões agrava problemas de erosão e deslizamentos, colocando em risco milhares de domicílios e dificultando o planejamento urbano sustentável. Apesar das iniciativas como o Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR), a demanda por habitação e a falta de fiscalização contribuem para a ocupação de encostas íngremes e áreas suscetíveis a desastres naturais.

Figura 44: Interseção entre os setores censitários, malha urbana e áreas de risco.



Fonte: Os autores, 2024. Dados: CPRM 2022.

5.5 ANÁLISES DE CAMPO

A área de estudo (Figura 45) está inserida na unidade geológica Formação Barreiras, composta por rochas sedimentares. A classificação geológica definiu a região como pertencente à fácies Canal Fluvial, caracterizada por sedimentos fluviais areno-argilosos, com coloração variando de creme a vermelha. Essa variação cromática resulta das oscilações na energia das águas durante a deposição do pacote sedimentar e do teor de óxido de ferro presente. Apesar dessas diferenças de coloração, todo o perfil pertence à mesma unidade geológica.

Durante os trabalhos de campo, observou-se que o talude estudado apresenta uma constituição litológica predominantemente formada por arenitos, siltitos, argilitos e laterita, podendo ou não conter concreções ferruginosas. Essa composição se assemelha à descrita por Moraes (2007) em seu estudo sobre a Formação Barreiras no estado do Espírito Santo. A descrição tátil-visual ao longo da profundidade indicou

um material relativamente homogêneo, com variação granulométrica entre areia argilosa e argila arenosa, e alteração de coloração entre tons de amarelo e vermelho.

Figura 45: Talude analisado.



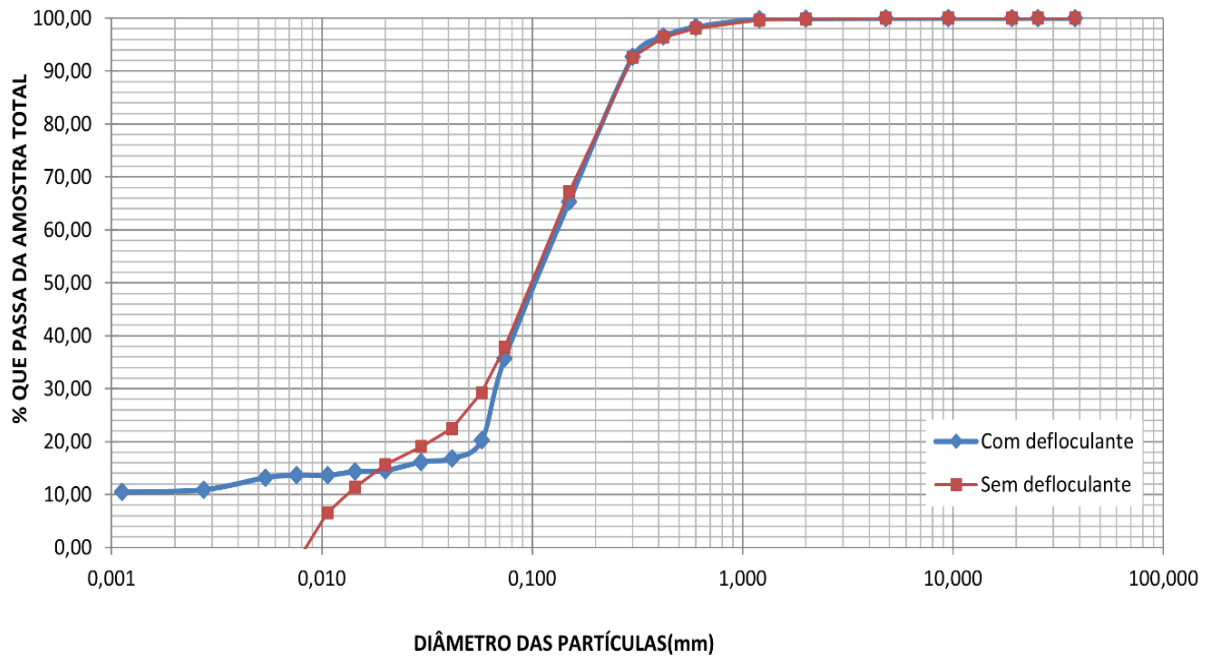
Fonte: Os autores, 2024.

5.6 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA, ÍNDICES DE CONSISTÊNCIA E PESO ESPECÍFICO DOS GRÃOS

5.6.1 Amostra AM - 01

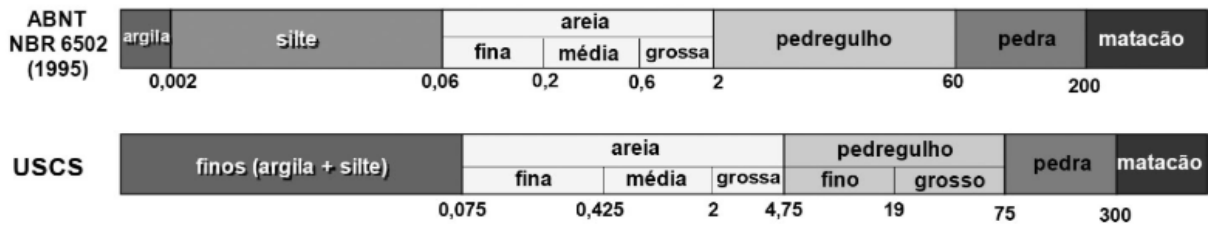
Nos ensaios com e sem defloculante para a amostra AM - 01, observa-se que as curvas granulométricas (Figura 46) se mantêm próximas até o diâmetro de 0,075 mm. No entanto, nas frações mais finas que 0,075 mm, os resultados das análises indicam variações significativas, conforme a classificação estabelecida pela ABNT NBR 6502 na Figura 47. De acordo com este sistema, que define a separação entre silte e argila no diâmetro de 0,002 mm, a amostra com adição de defloculante apresentou 10% de fração argila, enquanto na amostra sem defloculante essa fração não foi detectada.

Figura 46: Curva granulométrica (com e sem defloculante) - Amostra AM – 01.



Fonte: Os autores, 2024.1

Figura 47: Sistemas de classificação de solos.



Fonte: Disponível em <https://www.suportesolos.com.br>. Acesso em 8 setembro 2024.

Considerando o ensaio com defloculante para classificação da granulometria da amostra AM – 01 pode ser observada uma composição granulométrica conforme a Tabela 13.

Tabela 13: Classificação do solo AM - 01 conforme ABNT

Granulometria	Porcentagem (%)
Pedregulho	0%
Areia Total	80%
Areia Fina	58%
Areia Média	20%
Areia Grossa	2%
Silte	10%
Argila	10%
Total	100%

Fonte: Os autores, 2024.

Os parâmetros obtidos a partir da curva granulométrica estão apresentados na Tabela 14. Com base nesses valores, o solo pode ser classificado como não uniforme, uma vez que o Coeficiente de Uniformidade (Cu) é superior a 15, e como mal graduado, devido ao Coeficiente de Curvatura (Cc) ser maior que 3.

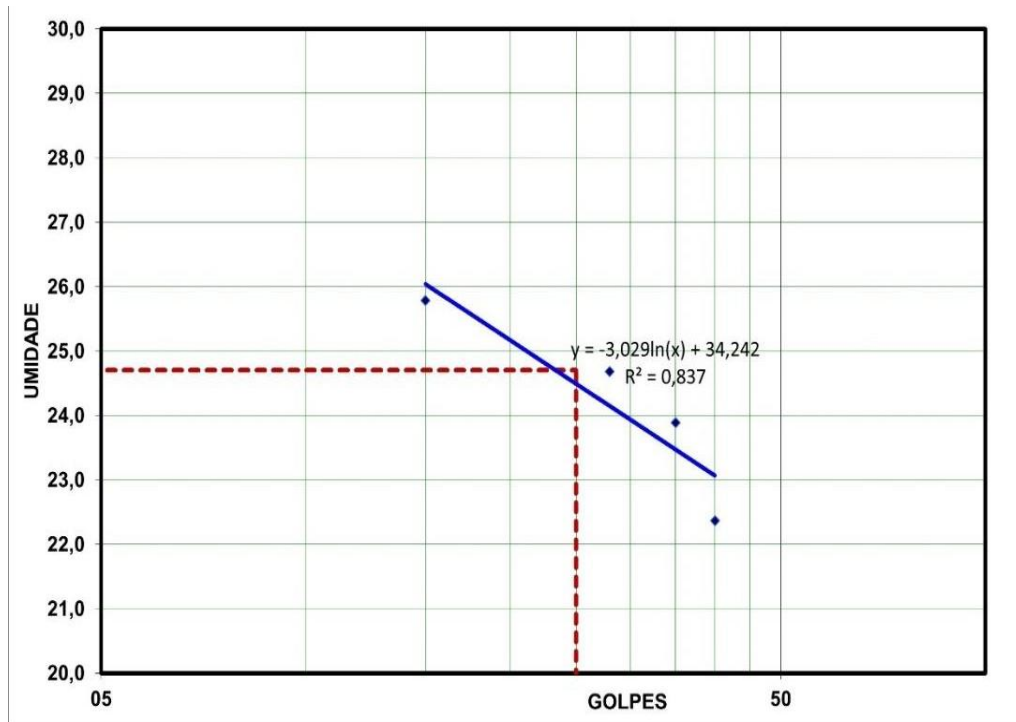
Tabela 14: Parâmetros da curva granulométrica (AM - 01)

Parâmetro	Valores
D10	0,002
D30	0,068
D60	0,14
Cu	70
CC	16,51

Fonte: Os autores, 2024.

Complementando a caracterização granulométrica, os resultados dos ensaios de limites de Atterberg são apresentados abaixo. O material analisado apresentou um limite de liquidez de 24,7% conforme Figura 48 e um limite de plasticidade de 18,4% apresentado na Tabela 15, resultando em um índice de plasticidade de 6,3%. Com base nesses valores, o solo foi classificado como de baixa plasticidade ($1 < IP < 7$), conforme a classificação de Jenkins (Caputo, 2015).

Figura 48: Gráfico limite de liquidez (AM - 01)



Fonte: Os autores, 2024.

Tabela 15: Limite de Plasticidade (AM - 01)

LIMITE DE PLASTICIDADE							
Cápsula	N.º	184	183	234	334	244	LP = 18,4%
Peso Bruto Úmido	g	42,81	41,32	41,75	42,06	42,39	
Peso Bruto Seco	g	42,48	40,94	41,44	41,77	42,13	I.P= 6,3%
Peso da Cápsula	g	40,70	38,91	39,74	40,22	40,70	
Peso da Água	g	0,30	0,40	0,30	0,30	0,30	
Peso do Solo Seco	g	1,80	2,00	1,70	1,60	1,40	
Umidade	%	18,50	18,70	18,30	18,33	18,02	

Fonte: Os autores, 2024.

Com base nos resultados da análise granulométrica e dos ensaios de limites de Atterberg, o solo foi classificado, segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), como uma areia argilo-siltosa (SC-SM).

Com relação aos ensaios que caracterizam o estado do solo, obtiveram-se os seguintes resultados, conforme Tabela 16.

Tabela 16: Resulta dos cálculos para a caracterização física

γ_S (kN/m ³)	γ_n (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	e
26,73	18,7	17,75	21,04	0,5059

Fonte: Os autores, 2024.

Em que:

- γ_s : Peso específico dos grãos;
- γ_n : Peso específico natural do solo;
- γ_d : Peso específico seco;
- γ_{sat} : Peso específico saturado;
- e : Índice de vazios.

Referente a umidade natural média, o solo apresentou um valor de aproximadamente 5,33%, conforme registrado na Tabela 17.

Tabela 17: Teor de umidade natural (AM – 01)

TEOR DE UMIDADE			
Nº da Cápsula	79736	79733	79361
Solo+Tara+Água (g)	17,73	23,98	26,97
Solo+Tara (g)	17,57	23,73	26,79
Tara (g)	13,84	19,84	23,15
Água (g)	0,16	0,25	0,19
Solo (g)	3,72	3,89	3,64
Umidade (g)	4,33	6,53	5,14
Umidade média (g)	5,33		

Fonte: Os autores, 2024.

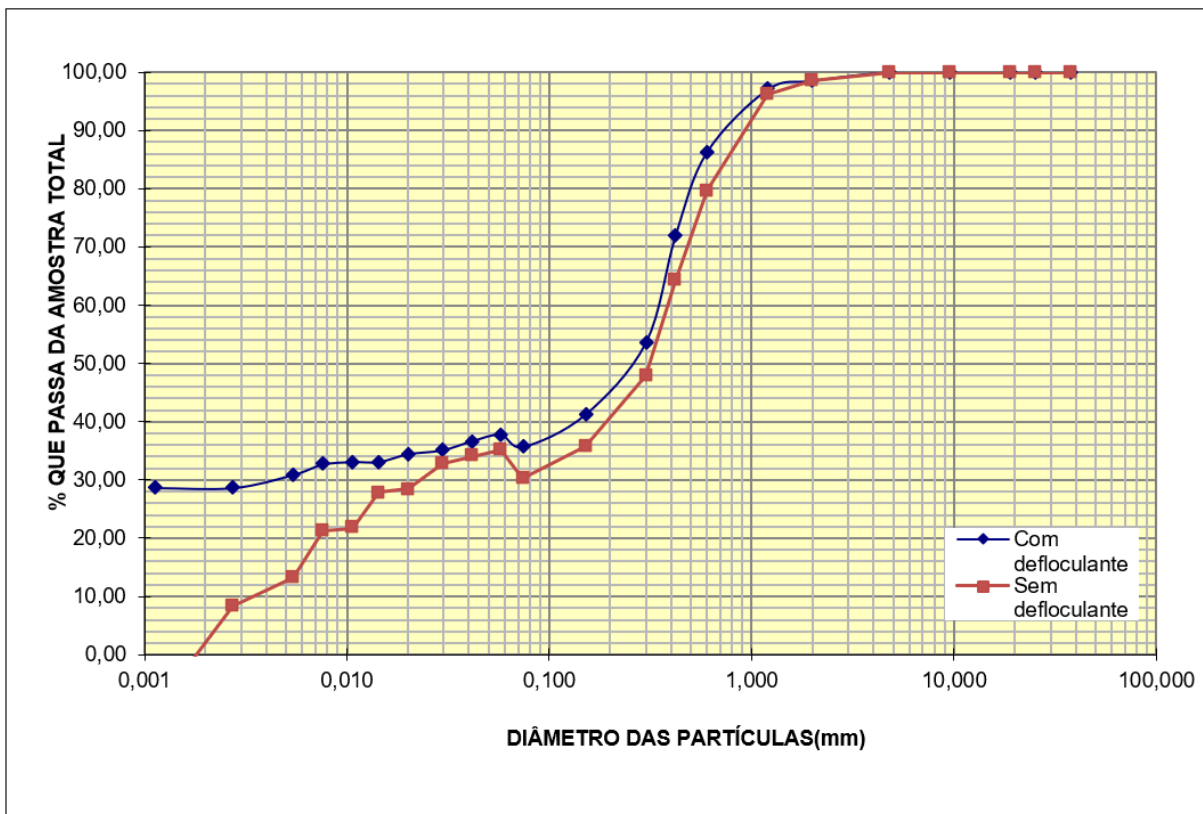
5.6.2 Amostra Am - 02

Nos ensaios realizados com e sem defloculante para a amostra AM-02, observa-se que as curvas granulométricas (Figura 49) também apresentam comportamentos semelhantes até a fração de 0,075 mm. Entretanto, para partículas menores que esse diâmetro, os resultados evidenciam diferenças significativas.

Na fração silte, a amostra analisada sem o uso de defloculante indicou uma composição de 33%, enquanto a mesma amostra, quando submetida ao agente dispersante, apresentou apenas 10%. Já na fração argila, ocorreu o inverso: a amostra com defloculante registrou 28%, enquanto a análise sem o aditivo revelou

apenas 2%, demonstrando o impacto do agente dispersante na desagregação das partículas mais finas.

Figura 49: Curva granulométrica (com e sem defloculante) - Amostra AM – 02



Fonte: Os autores, 2024.

Considerando o ensaio com defloculante para classificação da granulometria da amostra AM – 02 pode ser observada uma composição granulométrica conforme a Tabela 18.

Tabela 18: Classificação do solo AM - 02 conforme ABNT

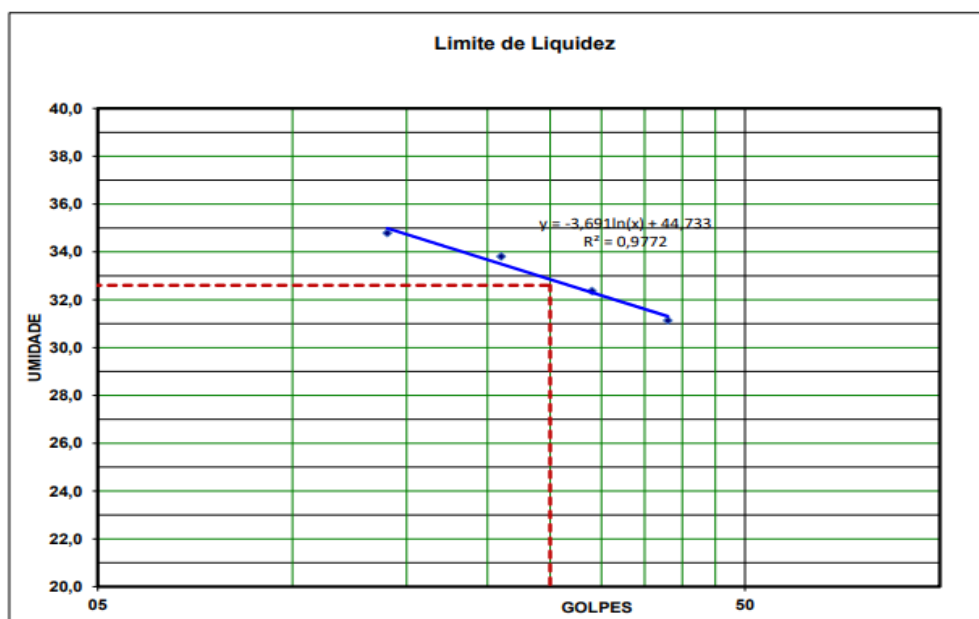
Granulometria	Porcentagem (%)
Pedregulho	2%
Areia Total	60%
Areia Fina	3%
Areia Média	45%
Areia Grossa	12%
Silte	10%
Argila	28%
Total	100%

Fonte: Os autores, 2024.

Para a amostra AM 02, não foi possível calcular os coeficientes granulométricos, como o Coeficiente de Uniformidade (Cu) e o Coeficiente de Curvatura (Cc), devido à ausência do parâmetro D_{10} (diâmetro efetivo). Esse valor não pôde ser determinado a partir da curva granulométrica obtida, o que inviabilizou a realização dos cálculos necessários para esses coeficientes.

Para complementar a caracterização granulométrica, os resultados dos ensaios de limites de Atterberg são apresentados a seguir. O material estudado apresentou um limite de liquidez de 32,6% (Figura 50) e um limite de plasticidade de 19,5% (Tabela 19), resultando em um índice de plasticidade de 13,1%. Com esses valores, o solo foi classificado como de plasticidade média ($7 < IP < 15$), de acordo com a classificação de Jenkins (Caputo, 2015).

Figura 50: Gráfico limite de liquidez (AM -02)



Fonte: Os autores, 2024.

Tabela 19: Limite de Plasticidade (AM - 02)

LIMITE DE PLASTICIDADE							
Cápsula	N.º	377	272	119	208	20	LP = 19,5%
Peso Bruto Úmido	g	42,34	44,53	41,33	41,40	40,82	
Peso Bruto Seco	g	41,93	44,10	41,03	41,06	40,61	I.P.= 13,1%
Peso da Cápsula	g	39,84	42,07	39,45	39,34	39,49	
Peso da Água	g	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	Obs.:
Peso do Solo Seco	g	2,1	2,0	1,6	1,7	1,1	
Umidade	%	19,5	21,03	18,83	19,80	18,42	

Fonte: Os autores, 2024.

Com base nos resultados da análise granulométrica e dos ensaios de limites de Atterberg, o solo foi classificado como areia argilosa, pertencente ao grupo SC segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Com relação aos ensaios que caracterizam o estado do solo, obtiveram-se os seguintes resultados, conforme Tabela 20.

Tabela 20: Resultados dos ensaios de caracterização física

γ_S (kN/m ³)	γ_n (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	e
26,42	16,8	15,2	19,36	0,7381

Fonte: Os autores, 2024.

Em que:

- γ_S : Peso específico dos grãos;
- γ_n : Peso específico natural do solo;
- γ_d : Peso específico seco;
- γ_{sat} : Peso específico saturado;
- e : Índice de vazios.

Referente a umidade natural média, o solo apresentou um valor de aproximadamente 10,07%, conforme registrado na Tabela 21.

Tabela 21: Teor de umidade natural (AM – 02)

TEOR DE UMIDADE			
Nº. Cápsula	79412	151	79379
Solo+Tara+Água (g)	30,41	38,37	31,94
Solo+Tara (g)	29,41	36,86	30,80
Tara (g)	18,56	23,29	19,14
Água (g)	1,01	1,51	1,14
Solo (g)	10,85	13,57	11,66
Umidade (g)	9,27	11,13	9,80
Umidade média (g)	10,07		

Fonte: Os autores, 2024.

5.7 SÍNTESE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os resultados obtidos nos ensaios demonstram que, embora as amostras tenham sido coletadas em pontos distintos da encosta, ambas apresentam características geotécnicas semelhantes. Essa similaridade era esperada, considerando que pertencem à mesma unidade geológica, a Formação Barreiras, caracterizada por sedimentos areno-argilosos de origem continental e deposição fluvial.

A análise granulométrica identificou que os solos variam entre areia argilo-siltosa (AM-01) e areia argilosa (AM-02). Nos ensaios com e sem defloculante, observou-se o impacto direto do uso do aditivo na separação das partículas mais finas. Para a AM-01, a fração argila foi de 10% com defloculante, e não detectada sem o aditivo. Já na AM-02, a fração silte passou de 33% (sem defloculante) para 10% (com), e a fração argila aumentou de 2% para 28% com a aplicação do dispersante. Essas variações evidenciam a importância do uso do defloculante para garantir maior precisão na classificação granulométrica.

Em relação à plasticidade, a AM-01 apresentou um índice de plasticidade (IP) de 6,3%, sendo classificada como solo de baixa plasticidade. A AM-02 apresentou IP de 13,1%, caracterizando-se como plasticidade média, o que indica diferentes teores de argila ativa, influenciando o comportamento mecânico do solo.

Quanto aos parâmetros físicos, os valores de peso específico dos grãos (γ_s) foram próximos: 26,73 kN/m³ para a AM-01 e 26,42 kN/m³ para a AM-02, sugerindo semelhança na mineralogia dominante (como quartzo e caulinita). Já o peso específico natural (γ_n) foi superior na AM-01 (18,7 kN/m³) em comparação com a AM-02 (16,8 kN/m³), refletindo maior compactação e menor conteúdo de vazios na primeira.

O peso específico seco (γ_d), calculado a partir da umidade natural, também foi maior na AM-01 (17,75 kN/m³) frente à AM-02 (15,2 kN/m³), corroborando sua estrutura mais densa. Em condição saturada, os valores de peso específico saturado (γ_{sat}) foram 21,04 kN/m³ para a AM-01 e 19,36 kN/m³ para a AM-02. Esses resultados mostram que, mesmo totalmente saturado, o solo da AM-01 permanece mais denso.

O índice de vazios (e), razão entre o volume de vazios e o volume de sólidos, foi 0,5059 para a AM-01 e 0,7381 para a AM-02. Esse parâmetro é fundamental na análise da compactação e permeabilidade dos solos, e valores mais elevados, como

no caso da AM-02, indicam uma estrutura mais porosa e potencialmente menos resistente.

A umidade natural (w) das amostras também variou significativamente: 5,33% para a AM-01 e 10,7% para a AM-02. Esses dados são coerentes com o índice de vazios e demonstram maior capacidade de retenção de água da AM-02, condição que pode afetar sua estabilidade em campo.

Os parâmetros de coeficiente de uniformidade (C_u) e coeficiente de curvatura (C_c), importantes para avaliação da distribuição granulométrica, puderam ser determinados apenas para a AM-01. Os valores indicaram que se trata de um solo mal graduado, o que impacta negativamente sua permeabilidade e compacidade, fatores críticos para aplicações geotécnicas como fundações e obras de contenção. No caso da AM-02, não foi possível calcular tais coeficientes, pois não se obteve o diâmetro efetivo (D_{10}), necessário para o cálculo, conforme discutido anteriormente.

Assim, mesmo com limitações metodológicas, os resultados obtidos são compatíveis com os padrões observados para os solos da Formação Barreiras, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada do comportamento geotécnico da encosta analisada e subsidiando estudos de estabilidade de taludes e projetos de engenharia civil.

5.8 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

5.8.1 Resultados



A análise de estabilidade dos taludes foi realizada com base nas seções transversais definidas a partir do levantamento planialtimétrico da área de estudo. Para cada uma das três seções selecionadas, foram aplicados os métodos de Bishop (1995) e Morgenstern-Price (1965), por meio da modelagem computacional no software SLOPE/W, considerando a ausência de nível freático, condição representativa da área estudada.

Foram adotados parâmetros geotécnicos obtidos a partir das características físicas do solo determinadas em ensaios laboratoriais, complementados por um levantamento bibliográfico com abordagem conservadora, tendo como principal referência Severo (2011), conforme apresentado nas Tabelas 22 e 23.

As análises de estabilidade foram realizadas considerando uma superfície de ruptura circular, com base no critério de resistência ao cisalhamento de Mohr-

Coulomb. Foram conduzidas duas simulações distintas para cada seção: a primeira utilizando como dado de entrada o peso específico natural do solo, e a segunda utilizando o peso específico saturado, a fim de avaliar a influência da condição de umidade no fator de segurança das encostas.

Tabela 22: Parâmetros das camadas do solo de análise

COR	NOME	MODELO DE MATERIAL DE ESTABILIDADE DE DECLINE	PESO ESPECÍFICO NATURAL (KN/m ³)	PESO ESPECÍFICO SATURADO (KN/m ³)	COESÃO EFETIVA (kPa)	ÂNGULO DE ATRITO EFETIVO
	Areia argilo-siltosa (AM – 01)	Mohr-Coulomb	18,7	21,04	62,7	30,5
	Areia argilosa (AM – 02)	Mohr-Coulomb	16,8	19,36	6,5	29,4

Fonte: Os autores, 2024.

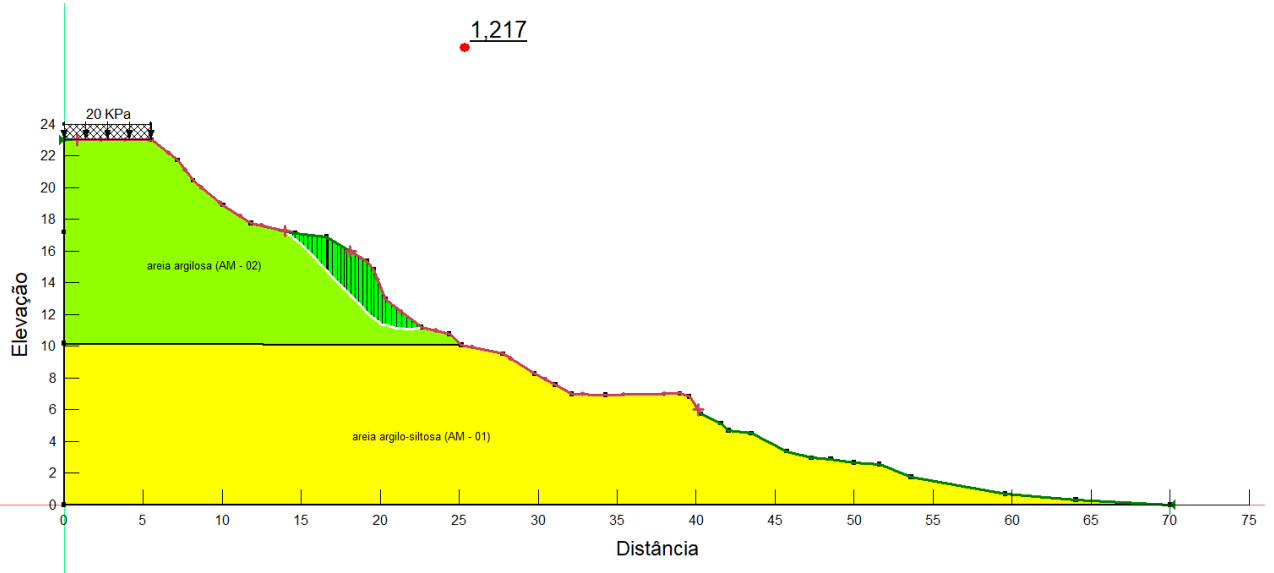
Tabela 23: Parâmetros das camadas do solo de análise

TIPO DE ANÁLISE	FUNÇÃO LATERAL	DIREÇÃO DO MOVIMENTO	SLIP SURFACE OPTION	MODELO DO MATERIAL
Bishop	-	Esquerda para direita	Entrada e Saída	Mohr-Coulomb
Morgenstern-Price	Meia-senóide	Esquerda para direita	Entrada e Saída	Mohr-Coulomb

Fonte: Os autores, 2024.

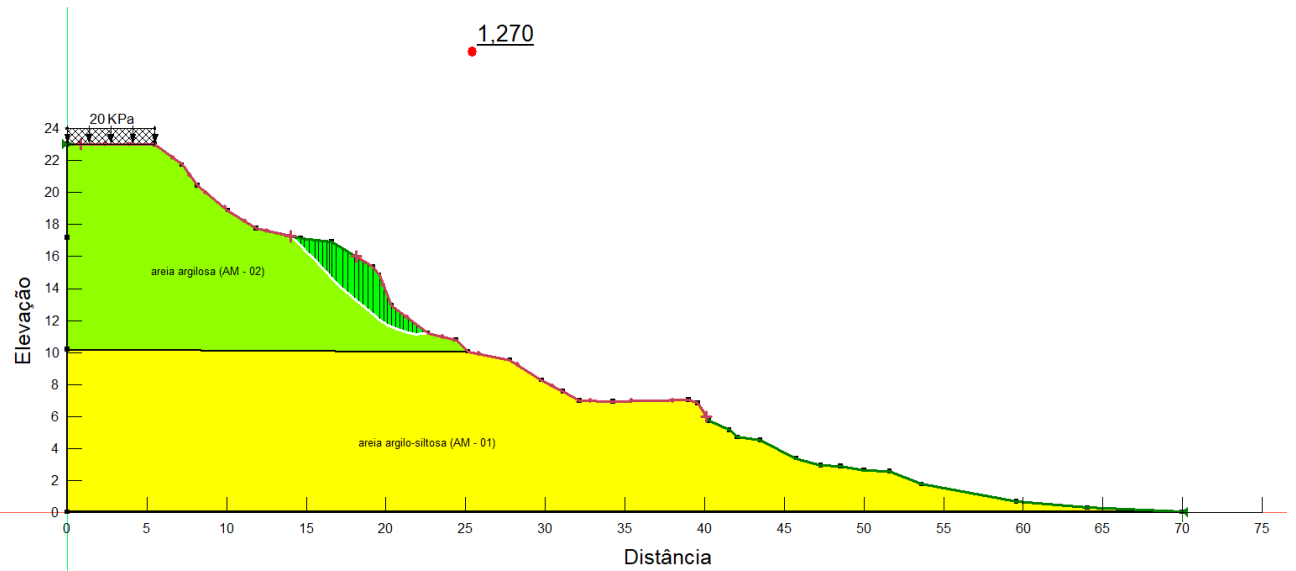
As Figuras 51 a 56 apresentam as superfícies de ruptura críticas obtidas nas análises de estabilidade das Seções 1, 2 e 3, utilizando os métodos de Bishop (1995) e Morgenstern Price (1965), com base nos valores de peso específico natural das amostras. As imagens estão organizadas em pares, permitindo a comparação entre os resultados obtidos por ambos os métodos para cada seção.

Figura 51: Seção 1: Análise do FS com o método de Bishop (Peso específico natural).



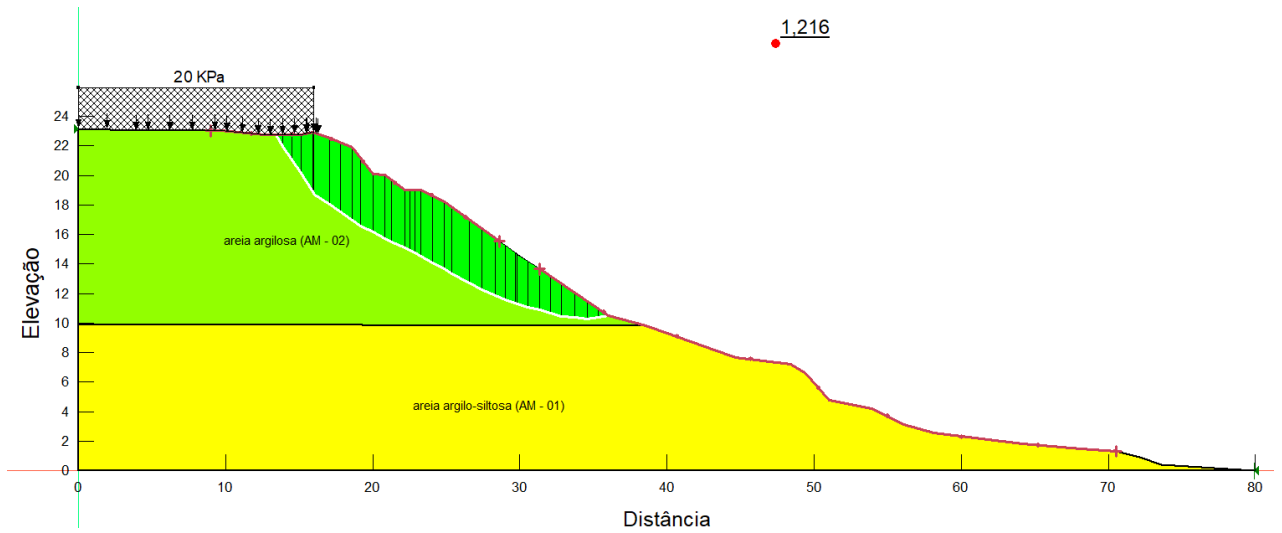
Fonte: Os autores, 2024.

Figura 52: Seção 1: Análise do FS com o método de Morgenstern-Price (Peso específico natural).



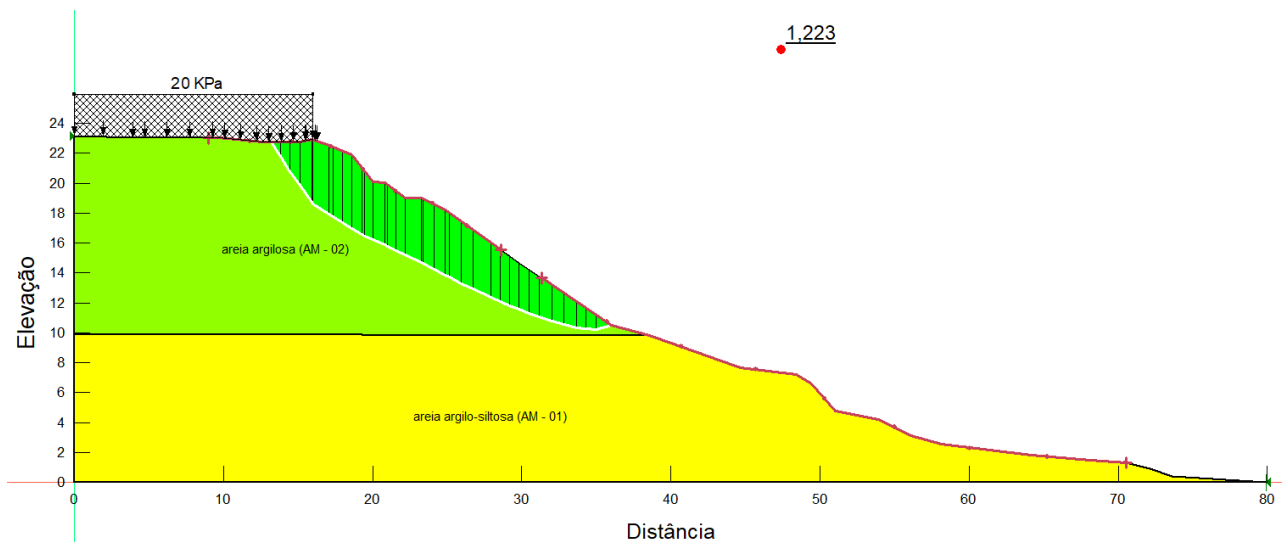
Fonte: Os autores, 2024.

Figura 53: Seção 2: Análise do FS com o método de Bishop (Peso específico natural).



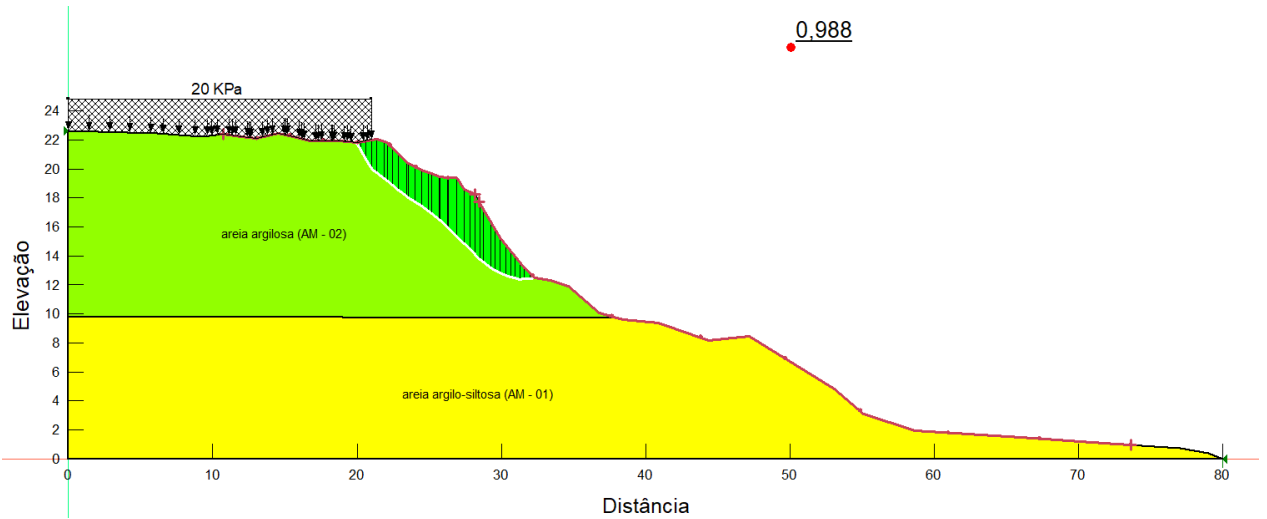
Fonte: Os autores, 2024.

Figura 54: Seção 2: Análise do FS com o método de Morgenstern-Price (Peso específico natural).



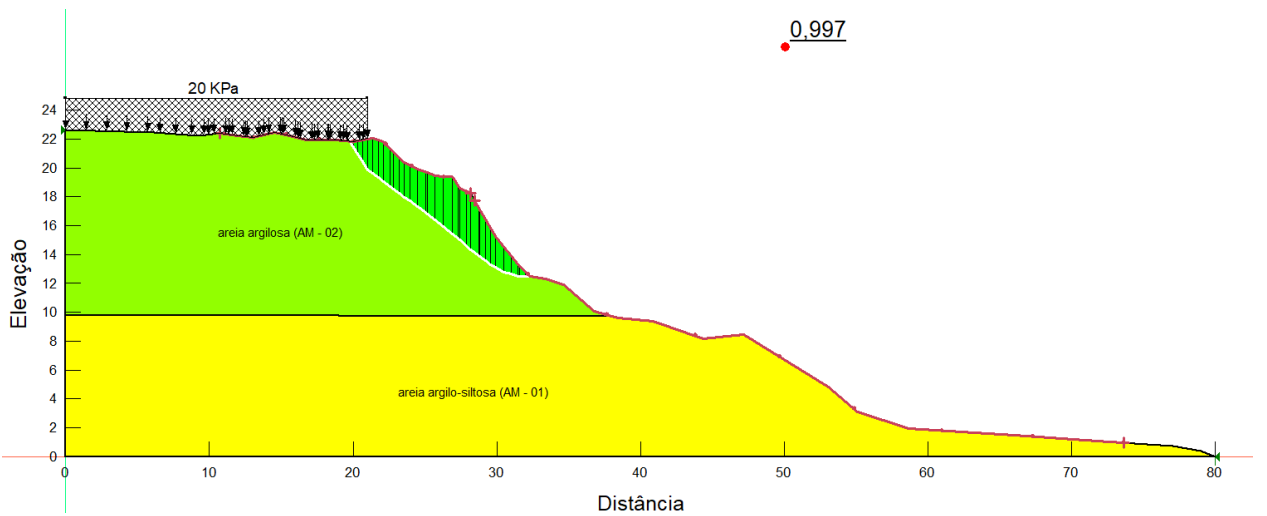
Fonte: Os autores, 2024.

Figura 55: Seção 3: Análise do FS com o método de Bishop (Peso específico natural).



Fonte: Os autores, 2024.

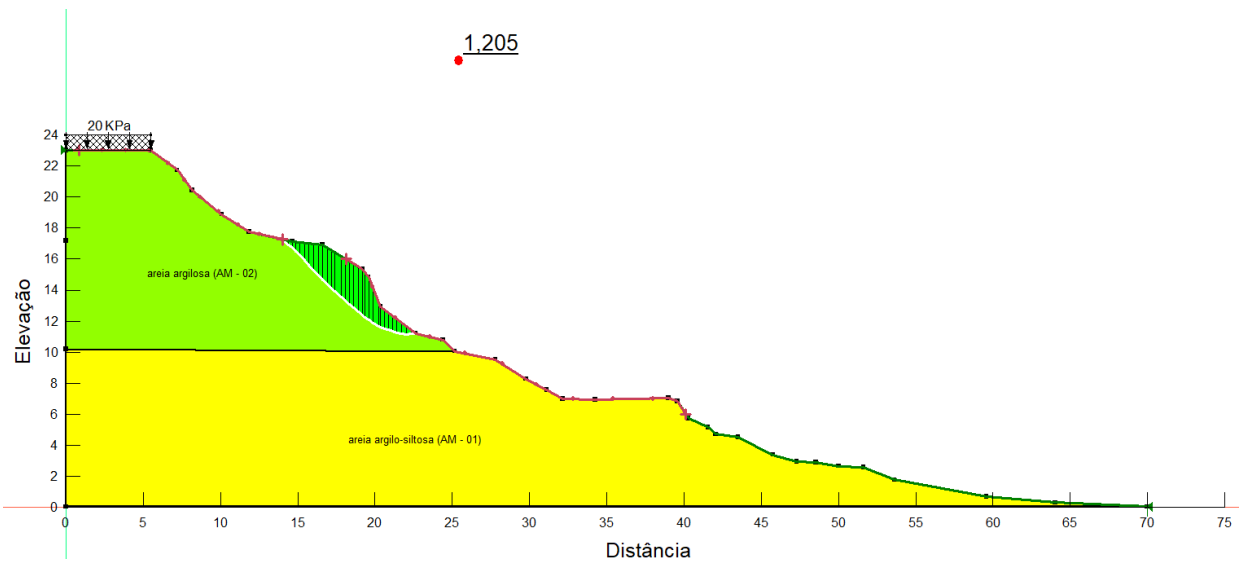
Figura 56: Seção 3: Análise do FS com o método de Morgenstern-Price (Peso específico natural).



Fonte: Os autores, 2024.

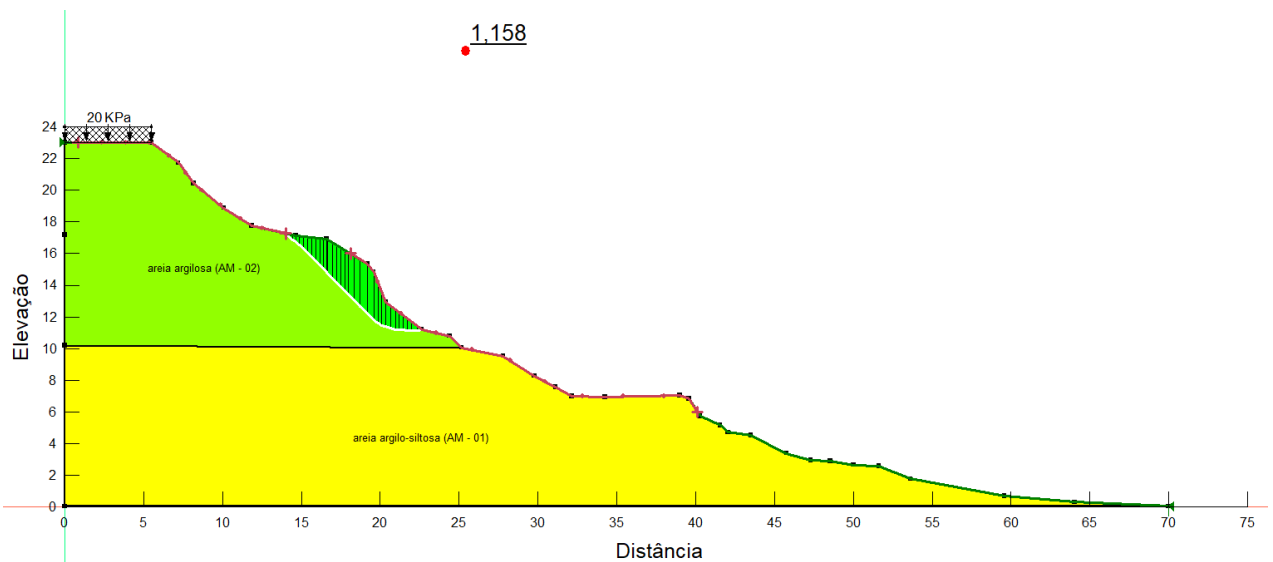
As Figuras 57 a 62, por sua vez, mostram as mesmas análises aplicadas às três seções, mas utilizando como dado de entrada os valores de peso específico saturado, simulando uma condição de umidade máxima no solo. Esse cenário visa representar uma situação crítica de estabilidade, considerando a possível elevação do nível de saturação decorrente de eventos climáticos extremos ou infiltrações.

Figura 57: Seção 1: Análise do FS com o método de Morgenstern-Price (Peso específico saturado).



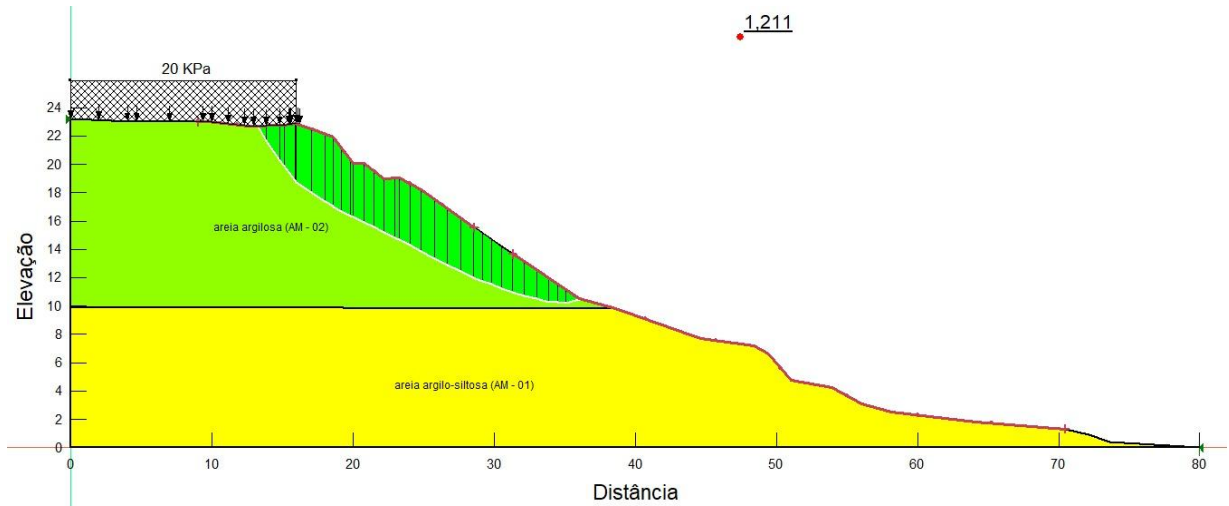
Fonte: Os autores, 2024.

Figura 58: Seção 1: Análise do FS com o método de Bishop (Peso específico saturado).



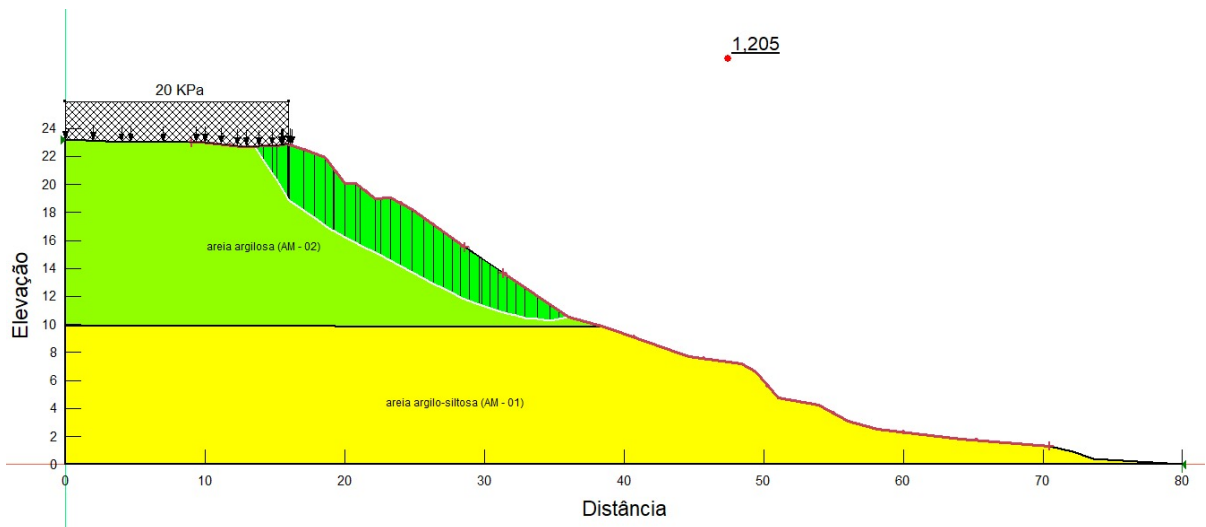
Fonte: Os autores, 2024.

Figura 59: Seção 2: Análise do FS com o método de Morgenstern-Price (Peso específico saturado).



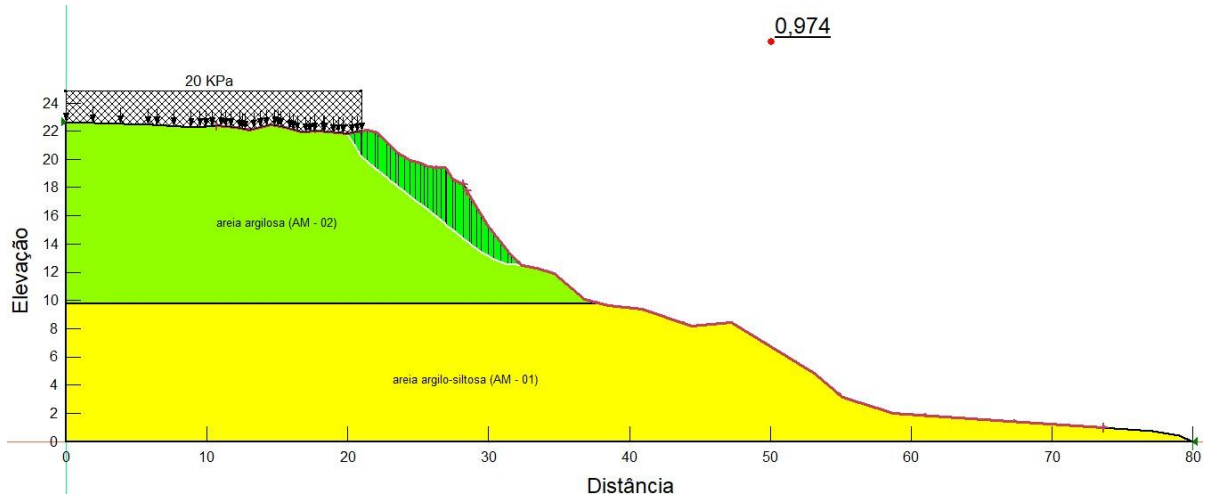
Fonte: Os autores, 2024.

Figura 60: Seção 2: Análise do FS com o método de Bishop (Peso específico saturado).



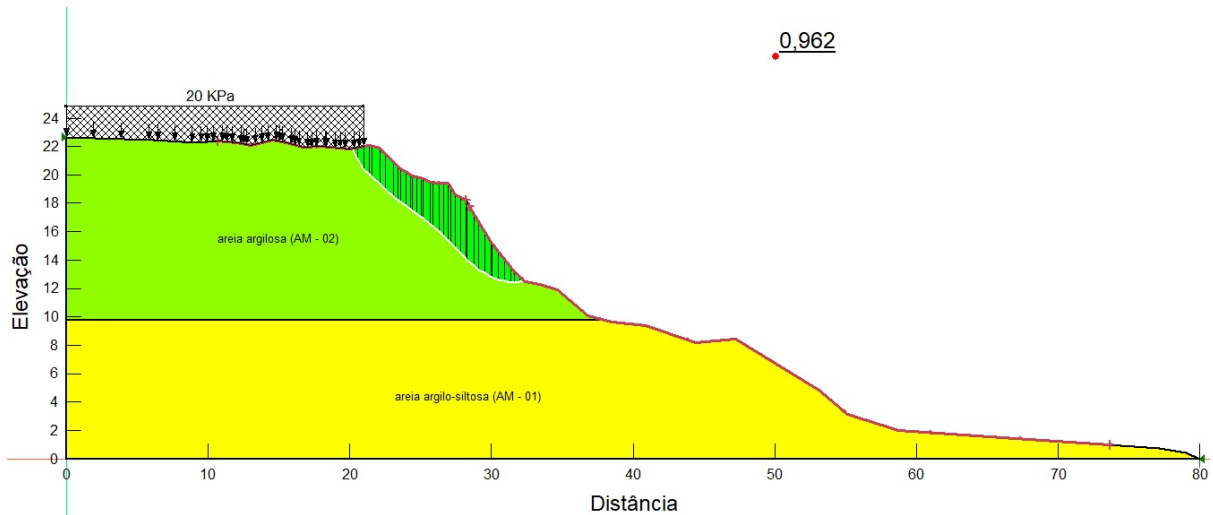
Fonte: Os autores, 2024.

Figura 61: Seção 3: Análise do FS com o método de Morgenstern-Price (Peso específico saturado).



Fonte: Os autores, 2024.

Figura 62: Seção 3: Análise do FS com o método de Bishop (Peso específico saturado).



Fonte: Os autores, 2024.

Em ambas as séries de figuras, é possível observar a geometria do talude, a localização da superfície de ruptura crítica, destacada pela zona verde composta por lamelas, e os fatores de segurança (FS) obtidos em cada condição simulada.

As três seções transversais foram extraídas a partir do levantamento planialtimétrico da área de estudo e apresentam as seguintes características geométricas:

- A Seção 1 (estaca 0+2,50) possui 70,14 metros de comprimento, com uma diferença de altura de 23,11 metros e inclinação média de 32,94%.
- A Seção 2 (estaca 0+5,00) apresenta 85,07 metros de extensão, com desnível de 23,18 metros e inclinação média de 27,24%.
- A Seção 3 (estaca 0+7,50) tem 85,48 metros de comprimento, diferença de altura de 22,77 metros e inclinação média de 26,63%.

Geologicamente, todas as seções estão inseridas na Formação Barreiras, composta predominantemente por solos do tipo areia argilosa e areia argilo siltosa. Esses materiais apresentam baixa a média plasticidade, granulometria mal graduada e baixa compactação relativa, características que comprometem a resistência e a estabilidade natural das encostas analisadas.

Para maior realismo na simulação, foi aplicada uma sobrecarga uniforme de 20 kPa no topo das três seções, conforme estabelece a norma brasileira ABNT NBR 11682:2019, que recomenda a consideração de uma carga acidental mínima sobre a superfície do terreno em áreas urbanizadas. Essa sobrecarga visa representar a presença de edificações, muros, pavimentos e demais estruturas localizadas sobre ou próximas ao topo do talude, permitindo que os efeitos das intervenções antrópicas sejam adequadamente refletidos nas análises de estabilidade.

A Tabela 24 e 25, apresentada a seguir, reúne os fatores de segurança obtidos para as três seções analisadas do talude, calculados pelos dois métodos:

Tabela 24: Fatores de segurança (Peso específico natural)

Peso específico natural		
SEÇÃO	MÉTODO DE BISHOP	MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE
1	1,217	1,270
2	1,216	1,223
3	0,988	0,997

Fonte: Os autores, 2024.

Tabela 25: Fatores de segurança (Peso específico saturado)

Peso específico saturado		
SEÇÃO	MÉTODO DE BISHOP	MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE
1	1,158	1,205
2	1,205	1,211
3	0,962	0,974

Fonte: Os autores, 2024.

5.8.2 Discussão

A análise de estabilidade dos taludes desenvolvida neste trabalho teve como principal objetivo identificar as zonas críticas de ruptura em uma encosta com potencial risco geotécnico, utilizando os métodos de Bishop e Morgenstern-Price por meio do software SLOPE/W. Considerando as características geológicas e climáticas da área em estudo, espera-se a presença de um nível freático naturalmente baixo, justificando a não adoção de um nível freático nos modelos numéricos. Essa premissa foi adotada devido à ausência de dados diretos sobre a posição do nível d'água subterrâneo, sendo compatível com observações em campo e com o histórico geotécnico da região.

Os resultados obtidos na Tabela 26 evidenciaram que os fatores de segurança (FS) apresentaram variações sutis entre os dois métodos analisados, com diferença máxima de 0,053 (Seção 1) e mínima de 0,007 (Seção 2), quando se consideraram os valores de peso específico natural das amostras. De maneira similar, na condição de saturação do solo, os fatores de segurança também se mantiveram próximos entre os métodos, com variações que oscilaram entre 0,006 (Seção 2) e 0,047 (Seção 1). Isso confirma a coerência dos métodos mesmo sob condição crítica de umidade, reforçando a confiabilidade das análises e a consistência dos resultados obtidos com a modelagem computacional. Além disso, a manutenção dessa pequena diferença entre os métodos, mesmo com o aumento da massa específica do solo devido à saturação, destaca a robustez do método de Morgenstern-Price frente a situações de maior complexidade geotécnica, ao passo que o método de Bishop continua fornecendo resultados próximos e tecnicamente válidos para análises preliminares ou de menor risco.

Tabela 26: Comparação entre Métodos (Bishop vs. Morgenstern-Price)

SEÇÃO	PESO ESPECÍFICO	BISHOP	MORGENSTERN-PRICE	DIFERENÇA (MP – B)
Seção 1	Natural	1,217	1,270	0,053
	Saturado	1,158	1,205	0,047
Seção 2	Natural	1,213	1,223	0,007
	Saturado	1,205	1,211	0,006
Seção 3	Natural	0,988	0,977	0,009
	Saturado	0,962	0,974	0,012

Fonte: Os autores, 2024.

Ao comparar os achados deste estudo com a literatura, nota-se convergência com pesquisas como as de Freitas (2011) e Dutra (2013), que destacam a precisão do método de Morgenstern-Price frente aos métodos simplificados, especialmente em situações onde a interação entre as lamelas e as forças internas do solo não podem ser negligenciadas. Ainda assim, a proximidade dos resultados com o método de Bishop sugere que, para o perfil de talude analisado, o uso de métodos menos rigorosos pode, em alguns casos, fornecer estimativas suficientemente confiáveis, desde que aliados a uma análise crítica dos dados de entrada.

A Tabela 27 apresenta os fatores de segurança (FS) obtidos para as três seções analisadas, considerando dois cenários distintos: o solo em condição natural (peso específico natural) e o solo em condição saturada (peso específico saturado). Essa comparação é fundamental para avaliar o impacto da umidade do solo na estabilidade dos taludes, uma vez que a saturação aumenta o peso do solo e pode reduzir a resistência ao cisalhamento, elevando o risco de instabilidade.

Tabela 27: Comparação entre Condições (Natural vs. Saturado)

SEÇÃO	MÉTODO	FS NATURAL	FS SATURADO	DIFERENÇA (NAT – SAT)
Seção 1	Bishop	1,217	1,158	0,059
	Morgenstern-price	1,270	1,205	0,065
Seção 2	Bishop	1,216	1,205	0,011
	Morgenstern-price	1,223	1,211	0,012
Seção 3	Bishop	0,988	0,962	0,026
	Morgenstern-price	0,997	0,974	0,023

Fonte: Os autores, 2024.

Os resultados indicam uma redução geral dos fatores de segurança quando o peso específico saturado é considerado, o que confirma a tendência esperada de maior risco em condições de máxima umidade. No entanto, a diminuição dos FS entre as condições natural e saturada é relativamente moderada, sugerindo que, apesar da elevação da massa do solo, as características geotécnicas das amostras e o modelo adotado mantêm a estabilidade dentro de parâmetros aceitáveis para as duas primeiras seções analisadas. A Seção 3, por sua vez, apresenta valores próximos à condição crítica, o que evidencia a necessidade de maior atenção em situações de

saturação, já que o FS fica ligeiramente abaixo de 1,0, indicando instabilidade potencial.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o risco de deslizamento de solo e a estabilidade dos taludes no Complexo Chã da Jaqueira, especificamente na área das Cavalarias RPMON, em Maceió-AL. Para isso, foram realizados o mapeamento topográfico da área, a caracterização geotécnica do solo e a modelagem computacional da estabilidade dos taludes utilizando o software SLOPE/W.

A escolha do tema demonstrou-se relevante para a sociedade, ao tratar de uma área urbana vulnerável e densamente ocupada, e para o campo da Engenharia Civil, ao contribuir com metodologias aplicáveis à análise de riscos geotécnicos em encostas urbanas. Para os pesquisadores, representou uma oportunidade de aprofundamento prático e teórico sobre os processos naturais e antrópicos que condicionam a instabilidade de taludes.

Com relação aos objetivos traçados, todos foram plenamente alcançados. O levantamento topográfico permitiu identificar as variações de declividade que influenciam diretamente a estabilidade da área, evidenciando os setores mais suscetíveis a deslizamentos. A caracterização geotécnica revelou que os solos predominantes apresentam granulometria de areia argilo-siltosa e areia argilosa, características típicas da Formação Barreiras. Por fim, a modelagem computacional permitiu simular condições com peso específico natural e saturado, oferecendo um panorama mais abrangente do comportamento do talude sob diferentes estados de umidade. Os fatores de segurança (FS) obtidos com os métodos de Bishop e Morgenstern-Price apresentaram variações discretas em ambas as condições, demonstrando coerência entre os modelos aplicados. Mesmo com a introdução do peso saturado, condição crítica para estabilidade, os resultados mantiveram-se estáveis, com variações máximas de FS entre os métodos inferiores a 0,06. Isso reforça a confiabilidade das simulações, bem como a robustez do método de Morgenstern-Price em contextos mais complexos.

As análises indicaram que a Seção 3 apresenta risco iminente de ruptura (FS < 1,0), enquanto a Seção 1 e Seção 2 apresentaram valores intermediários (FS ≈ 1,2),

próximos ao limite mínimo de segurança ($FS \approx 1,5$), sugerindo uma condição de estabilidade limitada que demanda atenção.

No entanto, é importante reconhecer as limitações do estudo. A ausência de ensaios de campo mais detalhados, como sondagens com ensaios SPT e levantamento do nível d'água, restringe a precisão dos parâmetros utilizados. A modelagem foi baseada em dados planialtimétricos e referências bibliográficas de parâmetros de resistência, o que pode introduzir incertezas nos resultados. Apesar disso, a análise probabilística via Monte Carlo contribuiu para mitigar parcialmente esses efeitos, tornando a avaliação mais realista diante da variabilidade natural dos solos.

Com base nos resultados obtidos, a hipótese da pesquisa de que a instabilidade estaria relacionada à constituição litológica do solo e às características geomorfológicas da encosta foi confirmada. A problemática da pesquisa, que buscava identificar os fatores críticos que comprometem a estabilidade da área, foi respondido por meio de uma análise integrada entre dados de campo, laboratoriais e simulações numéricas.

Como sugestão para futuras pesquisas, recomenda-se a realização de investigações geotécnicas mais detalhadas in loco, incluindo ensaios triaxiais e cisalhamento direto, além de análises considerando diferentes condições de saturação, como cenários de pós-chuva e variações sazonais. Também seria relevante incorporar critérios de ruptura não circulares, a fim de avaliar a sensibilidade do modelo a diferentes geometrias de falha e aprimorar a representação dos mecanismos de ruptura mais complexos.

REFERÊNCIAS

AGISOFT. **Modelagem 3D de qualidade profissional com facilidade com o Metashape Pro**. Disponível em: <https://agisoft.com.br/>. Acesso em: 05 jun. 2024.

AMARAL, Ricardo do; GUTJAHR, Maurício Roberto. **Desastres naturais**. São Paulo: IG/SMA, 2011.

AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. **Manual of photogrammetry**. [S.l.]: ASP, 1966. 1220 p.

ANJOS, Carlos Alberto Dias dos. **Estudo da estabilidade de encostas em Maceió**. [S.l.]: Universidade Federal da Paraíba, 1992.

ARIAS, Arthur. **Como fazer o planejamento de voo para grandes áreas?** *DronEng: Drones & Engenharias*, 2017. Disponível em: <http://blog.droneng.com.br/planejamento-de-voo-para-grandes-areas/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13133**: Execução de levantamento topográfico – Procedimento. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

AUGUSTO FILHO, Orlando; VIRGILI, João Carlos. **Estabilidade de taludes**. *In*: OLIVEIRA, Antonio Manoel de Souza; BRITO, Sérgio Nelson Andrade (org.). Geologia de engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. cap. 15, p. 243–269.

AUGUSTO FILHO, Orlando. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas**: uma proposta metodológica. *In*: CONFERÊNCIA

BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1992, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: [s.n.], 1992.

BANCO MUNDIAL. **Avaliação de perdas e danos:** inundações bruscas em Pernambuco, junho de 2010. Brasília, DF: [s.n.], 2012a. 75 p. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/Inundaes-Bruscas-em-Pernambuco.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2024.

BANCO MUNDIAL. **Avaliação de perdas e danos:** inundações bruscas em Santa Catarina, novembro de 2008. Brasília, DF: [s.n.], 2012b. 63 p. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/Inundaes-Bruscas-em-Santa-Catarina.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2024.

BANCO MUNDIAL. **Avaliação de perdas e danos:** inundações e deslizamentos na Região Serrana do Rio de Janeiro, janeiro de 2011. Brasília, DF: [s.n.], 2012c. 59 p. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/InundacoesDeslizamentosnaRegiaoSerranaDoRioDeJaneiro.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2024.

BARRETO, Lucas. **DronEng: Drones & Engenharias**, 2016. Mosaico de ortofotos: o que você precisa saber. Disponível em: <http://blog.droneng.com.br/mosaico-de-ortofotos/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

BARROS, Alexandre Hugo Cezar; et al. **Climatologia do Estado de Alagoas:** Dados eletrônicos. Recife: Embrapa Solos, 2012. 32 p.; il. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Solos, ISSN 1678-0892; 211).

BIGARELLA, João José. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2003.

BISHOP, Alan Walter. The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes. **Geotéchnique**, v. 5, n. 1, p. 7–17, 1995.

BLOOM, Arthur L. Superfície da Terra. Trad. Sílvia Petri e Roberto Ellert. São Paulo: Edgard Blucher/Edusp, 1988. 184 p. (Série de Textos Básicos de Geociências).

BRITO, João Luiz Nogueira da Silva; COELHO FILHO, Luiz Carlos Tavares. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: Editora da UERJ, 2009.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 4. ed., 1977.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 7. ed., 2015.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas aplicações**. v. 2. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1969.

CAMPOS NETO, Osvaldo Pacheco de Almeida; LIMA, Washington Soares; CRUZ, Francisco Eduardo Gomes. Bacia Sergipe-Alagoas. **Boletim de Geociências**, v. 15, n. 2, maio/nov. 2007. Rio de Janeiro, p. 200.

CARVALHO, Bruno Nunes Rodrigues. **Um Sistema de Informações para a prática do Gerenciamento e Planejamento Urbano**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1991.

COELHO, Antonio Carlos Silveira. **Avaliação do desempenho de receptores GPS em levantamentos altimétricos, para fim de sistematização de terras**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Setorização de áreas em alto e muito alto risco a movimentos de massa, enchentes e inundações**: Gameleira, Pernambuco. Recife: CPRM, 2018. 38 p. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/19956>. Acesso em: 14 abr. 2024.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson, 2007.

DIAS, Felipe Barros. **Avaliação de estabilidade de barragem alteada pelo método de montante por diferentes metodologias de cálculo de fator de segurança: comparação determinística**. 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

DUNCAN, James Michael; WRIGHT, Stephen G. **Soil strength and slope stability**. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

DUTRA, Vanessa Aparecida da Silva. **Projeto de Estabilização de Taludes e Estruturas de contenção englobando Dimensionamento Geotécnico e Estrutural**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2013.

DYMINSKI, Alvaro Silvio. **Notas de Aula – Estabilidade de Taludes**. Curitiba: UFPR, 1996.

FEIJÓ, Francisco José. Bacias de Sergipe e Alagoas. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 8, n. 1, p. 149–161, 1994.

FELLENIIUS, Wolmar. **Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen**. Berlim: Ernst & Sohn, 1927.

FERNANDES, Nelson Ferreira; AMARAL, Cláudia Pereira. **Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica**. In: GUERRA, Antônio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista (org.). Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 123–194.

FERRASSOLI, Marcus Antônio; ALVES, Vitor Augusto Honório dos Santos; MENDES, Victor Azevedo. **Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros**

Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL): aspectos geológicos e estruturais. Rio de Janeiro: [s.n.], 2019.

FREITAS, Marcos Aurélio Coelho de. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia.** 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Porto, 2011.

GERSCOVICH, Daniel Marcos Sztajn. **Estabilidade de Taludes.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GOGONI, Ronaldo. *Tecnoblog*, 2019. **O que é um pixel?** Disponível em: <https://tecnoblog.net/295290/o-que-e-um-pixel/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

GONÇALVES, Luiz Felipe Heringer; GUERRA, Antônio José Teixeira. **Movimentos de massa na cidade de Petrópolis (Rio de Janeiro).** In: GUERRA, Antônio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista (org.). Impactos ambientais urbanos no Brasil. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

GUERRA, Antônio José Teixeira. **Encostas e a questão ambiental.** In: GUERRA, Antônio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista. A questão ambiental: diferentes abordagens. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

HOEK, Evert; BRAY, John William. **Engenharia de taludes rochosos.** 3. ed. Londres: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Recomendações para utilização do GPS com correção diferencial via internet.** 2008. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/recom_gps_internet.pdf. Acesso em: 14 abr. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Página institucional.** Brasília: INMET, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inmet/>. Acesso em: 14 abr. 2024.

KÖPPEN, Wladimir. Das **geographische System der Klimate.** Berlim: Gebr. Borntraeger, 1936. p. 1–44.

LAMBE, Thomas William; WHITMAN, Robert Victor. **Soil mechanics.** Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1969.

LANA, Julio Cesar; MARCUSSÍ, Maria Carolina Rodrigues. **Diagnóstico da população em áreas de risco geológico, Maceió.** Belo Horizonte: CPRM, 2022.

MAGALHÃES, Joany Silva Lins Albuquerque. **Estudo de estabilidade da Encosta Alto do Padre Cícero no município de Camaragibe – PE.** Recife, 2013.

MORAIS, Ronaldo Martins de Oliveira. **Sistemas fluviais terciários na área emersa da bacia do Espírito Santo (Formações Rio Doce e Barreiras).** Tese

(Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MORGENSTERN, Norbert R.; PRICE, Vernon E. **The analysis of the stability of general slip surfaces**. *Géotechnique*, v. 15, 1965.

SILVA NETO, Manoel. **DronEng: Drones & Engenharias**, 2015. Pontos de controle: quando utilizar no mapeamento aéreo com drone? Disponível em: <http://blog.droneng.com.br/pontos-de-controle-quando-utilizar/>. Acesso em: 11 nov. 2024.

SILVA NETO, Manoel. **DronEng: Drones & Engenharias**, 2016. Para que serve o GSD? Disponível em: <https://blog.droneng.com.br/gsd/>. Acesso em: 17 nov. 2024.

OLIVEIRA, Antônio Benjamim Veras. **Uso do GPS para o estudo da anomalia equatorial**. Tese (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

OLIVEIRA, Antonio Manoel de Souza; BRITO, Sérgio Nelson Andrade. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 136–140.

OLIVEIRA, José Francisco Correia Martins. **Análise da estabilidade de taludes pelo método de Sarma**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Porto, 2014.

PIMENTA, Ilton José. **Caracterização e análise de estabilidade de taludes de mineração em solos da Mina de Capão Xavier**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

PIO-FIORI, André. Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas. **Boletim Paranaense de Geografia**, n. 43, 1995.

RECKZIEGEL, Elisabete Weber. **Identificação e mapeamento das áreas com perigo de movimento de massa no município de Porto Alegre – RS**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SANTOS, Ricardo José Queiroz dos; LIMA, Rochana Campos de Andrade; FERREIRA NETO, José Vicente. **A geomorfologia do tabuleiro como consequência do neotectonismo**. In: ARAÚJO, Lindemberg Medeiros de (org.). *Geografia: espaço, tempo e planejamento*. Maceió: EDUFAL, 2004. p. 320.

SANTOS, Sheila Rodrigues. **Topografia. 2016**. Disponível em: <http://site.ufvjm.edu.br/icet/files/2016/07/Conceitos-de-Topografia.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2024.

SEEBER, Günter. **Satellite geodesy: foundations, methods and applications**. 2. ed. Berlim; Nova York: Walter de Gruyter, 2003. 588 p.

SEVERO, Rodrigo Nunes Falcão. **Caracterização geotécnica da falésia da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul – RN considerando a influência do comportamento dos solos nos estados indeformado e cimentado artificialmente.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

SILVA, Joubert Costa; SOUZA, Geraldo Alves. **Estudo dos deslocamentos urbanos de Coari, Itacoatiara e Parintins e possíveis influências da topografia na divisão modal.** Geo UERJ, [s.l.], n. 33, p. e24891, 2018. DOI: 10.12957/geouerj.2018.24891. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/geouerj/article/view/24891>. Acesso em: 01 nov. 2024.

SILVA, Maria Marilene. **Estudo geológico-geotécnico de uma encosta com problemas de instabilidade no município de Camaragibe – PE.** Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

SUPORTE SOLOS. **Suporte Solos.** Disponível em: <https://www.suportesolos.com.br>. Acesso em: 14 abr. 2024.

SKEMPTON, Alec Westley. **Stability of cuttings in brown London Clay.** *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics*, v. 3, p. 261–270, Tóquio, 1977.

TOMMASELLI, Antonio Mauro Gambi. **Fotogrametria básica: introdução.** 2009. Disponível em: http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/891/introducao_a_fotogrametria.pdf. Acesso em: 04 abr. 2020.

UNISDR – UNITED NATIONS SYSTEM FOR THE COORDINATION OF DISASTER RISK REDUCTION. **Economic losses, poverty & disasters: 1998–2017.** [S.l.]: CRED, 2018. 31 p. Disponível em: https://www.preventionweb.net/files/61119_credeconomiclosses.pdf. Acesso em: 02 jun. 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012: Brasil.** 2. ed. rev. Florianópolis: UFSC, 2013. 126 p. Disponível em: <http://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2012/01/Mapas-Atlas-2012-Brasil.zip>. Acesso em: 02 jun. 2024.

VILAR, Orlando Moreira; BUENO, Bernardo de Souza. **Mecânica dos Solos: volume II.** Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo: 2004.

WOLF, Paul Richard. **Elements of photogrammetry.** Nova York: McGraw Hill, 1983. 626 p.

WRIGHT, Stephen G.; KULHAWY, Fred H.; DUNCAN, James Michael. **Accuracy of equilibrium slope stability analysis.** *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, p. 783–791, 1973.

ZIMMERMANN, Claudio César. **Apostila de Topografia**. 2017. Disponível em:
<https://www.bibliotecaagpatea.org.br/agricultura/topografia/livros/APOSTILA%20DE%20TOPOGRAFIA%20UFSC.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2024.

7 APÊNDICE

APÊNDICE A: Relatório de ajustamento de coordenadas (IFAL001-P1-P2)



CABEÇALHO DO PROJETO

Nome do Projeto: **TALUDE RPMON 03.ftp**
 Pasta do Projeto: **C:\Users\ DANIEL\OneDrive\Documentos\Topcon Tools Jobs**
 Hora da Criação do Projeto: **13/05/2024 11:43:19**
 Criado por:
 Comentários:
 Unidade Linear: **Meters**
 Unidade Angular: **DMS**
 Projeção UTM: **UTMSouth-Zone_25 : 36W to 30W**
 Datum: **SIRGAS2000**
 Geóide:
 Hora: **E. South America Standard Time**

AJUSTAMENTO

Tipo de Ajustamento: **Plano + Altura, Minimal constraint**
 Nível de Confiança: **68 %**
 Numero de pontos Ajustados: **3**
 Numero de Pontos de Controle Planimétricos: **1**
 Numero de Pontos Planimétricos Ponderados: **1**
 Numero de vetores GPS usados: **2**
 Plano UWE A posteriori: **1**, Bounds: **(1 , 1)**
 Numero de Pontos de Controle Altimétricos: **1**
 A posteriori altura UWE: **1**, Intervalo: **(1 , 1)**

COORDENADAS UTM

Nome	Malha Norte (m)	Malha Este (m)	Elevação (m)
IFAL001	8930461,111	200399,707	-4,006
P01	8935617,781	198100,402	-0,062
P02	8935606,169	198108,255	0,204

COORDENADAS GEOGRAFICAS

Nome	Latitude	Longitude	Elevação (m)
IFAL001	9°39'52,889"S	35°43'47,843"W	-4,006
P01	9°37'04,576"S	35°45'01,847"W	-0,062
P02	9°37'04,955"S	35°45'01,593"W	0,204

DESVIO PADRÃO

Nome	Desv Padrão n (m)	Desv Padrão e (m)	Desv Padrão Hz (m)	Desv Padrão u (m)	Código
IFAL001	0,001	0,001	0,001	0,002	
P01	0,005	0,004	0,007	0,014	
P02	0,005	0,004	0,007	0,014	

FATOR DE ESCALA

Nome	Fator de Escala Combinado Proj ao Terr	Convergência
IFAL001	0,999288975166	0°27'31,1553"
P01	0,999272494243	0°27'35,6360"
P02	0,999272594610	0°27'35,6114"

PRECISÃO

Nome	dN (m)	dE (m)	dZ (m)	North RMS(m)	East RMS(m)	Vert RMS (m)	CorrXY	CorrXZ	CorrYZ
IFAL001-P01	5156,669	-2299,305	3,944	0,005	0,004	0,014	-0,7984	-0,7886	0,6144
IFAL001-P02	5145,058	-2291,453	4,210	0,005	0,004	0,014	-0,7813	-0,7693	0,5892

DISTANCIA, SOLUÇÃO, ORBITA E PDOP

Nome	Distância (m)	Tipo Solução	Órbita	PDOP	HDOP	VDOP
IFAL001-P01	5642,005	Fixo	Radio Difusão	2,929	1,151	2,693
IFAL001-P02	5628,213	Fixo	Radio Difusão	3,013	1,160	2,780

DURAÇÃO E INTERVALO

Nome Ponto	Nome Original	Hora Início	Hora Fim	Duração	Método	Interval (msec)	Tipo Antena	Altura A
IFAL001	Iml2_K	03/04/2024 09:32:21	03/04/2024 12:34:45	03:02:24	Estático	1000	R90ineo	0,1
P01	514B	03/04/2024 11:13:04	03/04/2024 11:49:56	00:36:52	Estático	1000	R90ineo	1,1
P02	PR16_K	03/04/2024 11:17:02	03/04/2024 11:49:52	00:32:50	Estático	1000	R90ineo	2,1

PONTOS DE CONTROLE

Nome	Latitude	Longitude	Alt Elip (m)	Código	Desv Padrão n (m)	Desv Padrão e (m)	Desv Padrão Hz (m)	Desv
IFAL001	9°39'52,889"S	35°43'47,843"W	-4,006		0,001	0,001	0,001	

APÊNDICE B: Relatório de ajustamento de coordenadas (IFAL001-P3-P4)



CABEÇALHO DO PROJETO

Nome do Projeto: TALUDE RPMON 11.tlp
 Pasta do Projeto: C:\Users\DANIEL\OneDrive\Documents\Topcon Tools Jobs
 Hora da Criação do Projeto: 13/05/2024 12:32:33
 Criado por:
 Comentários:
 Unidade Linear: Metros
 Unidade Angular: DMS
 Projeção UTM: UTM South-Zone_25 : 36W to 39W
 Datum: SIRGAS2000
 Geóide:
 Hora: E. South America Standard Time

AJUSTAMENTO

Tipo de Ajustamento: Plano + Altura, Minimal constraint
 Nível de Confiança: 68 %
 Número de pontos Ajustados: 3
 Número de Pontos de Controle Planimétricos: 1
 Número de Pontos Planimétricos Ponderados: 1
 Número de vetores GPS usados: 2
 Plano UWE A posteriori: 1 , Bounds: (1 , 1)
 Número de Pontos de Controle Altimétricos: 1
 A posteriori altura UWE: 1 , Intervalo: (1 , 1)

COORDENADAS UTM

Nome	Malha Norte (m)	Malha Este (m)	Elevação (m)
IFAL001	8930461,111	200399,707	-4,006
P03	8935661,582	198202,038	38,989
P04	8935662,023	198193,957	39,068

COORDENADAS GEOGRÁFICAS

Nome	Latitude	Longitude	Elevação (m)
IFAL001	9°39'52,889"S	35°43'47,843"W	-4,006
P03	9°37'03,177"S	35°44'58,505"W	38,989
P04	9°37'03,161"S	35°44'58,770"W	39,068

DESVIO PADRÃO

Nome	Desv Padrão n (m)	Desv Padrão e (m)	Desv Padrão Hz (m)	Desv Padrão u (m)	Código
IFAL001	0,001	0,001	0,001	0,002	
P03	0,010	0,008	0,013	0,047	
P04	0,005	0,004	0,006	0,021	

FATOR DE ESCALA

Nome	Fator de Escala Combinado Proj ao Terr	Convergência
IFAL001	0,999288975166	0°27'31,1553"
P03	0,999279377680	0°27'35,0101"
P04	0,999279329764	0°27'35,0537"

PRECISÃO

Nome	dN (m)	dE (m)	dZ (m)	North RMS(m)	East RMS(m)	Vert RMS (m)	CorrXY	CorrXZ	CorrYZ
IFAL001-P03	5200,471	-2197,669	42,995	0,010	0,008	0,047	-0,9502	-0,9005	0,8790
IFAL001-P04	5200,912	-2205,750	43,074	0,004	0,004	0,021	-0,9245	-0,8656	0,8393

DISTANCIA, SOLUÇÃO, ORBITA E PDOP

Nome	Distancia (m)	Tipo Solução	Órbita	PDOP	HDOP	VDOP
IFAL001-P03	5641,886	Fixo	Radio Difusão	5,216	1,428	5,016
IFAL001-P04	5645,440	Fixo	Radio Difusão	4,863	1,376	4,664

DURAÇÃO E INTERVALO

Nome Ponto	Nome Original	Hora Inicio	Hora Fim	Duração	Método	Interval (msec)	Tipo Antena	Altura Ai
IFAL001	PR16_K	11/04/2024 10:00:20	11/04/2024 12:43:56	02:43:36	Estático	1000	R90íneo	0,1
P03	514B	11/04/2024 11:29:20	11/04/2024 12:01:28	00:32:08	Estático	1000	R90íneo	2,1
P04	lm2_K	11/04/2024 11:29:16	11/04/2024 12:00:44	00:31:28	Estático	1000	R90íneo	1,1

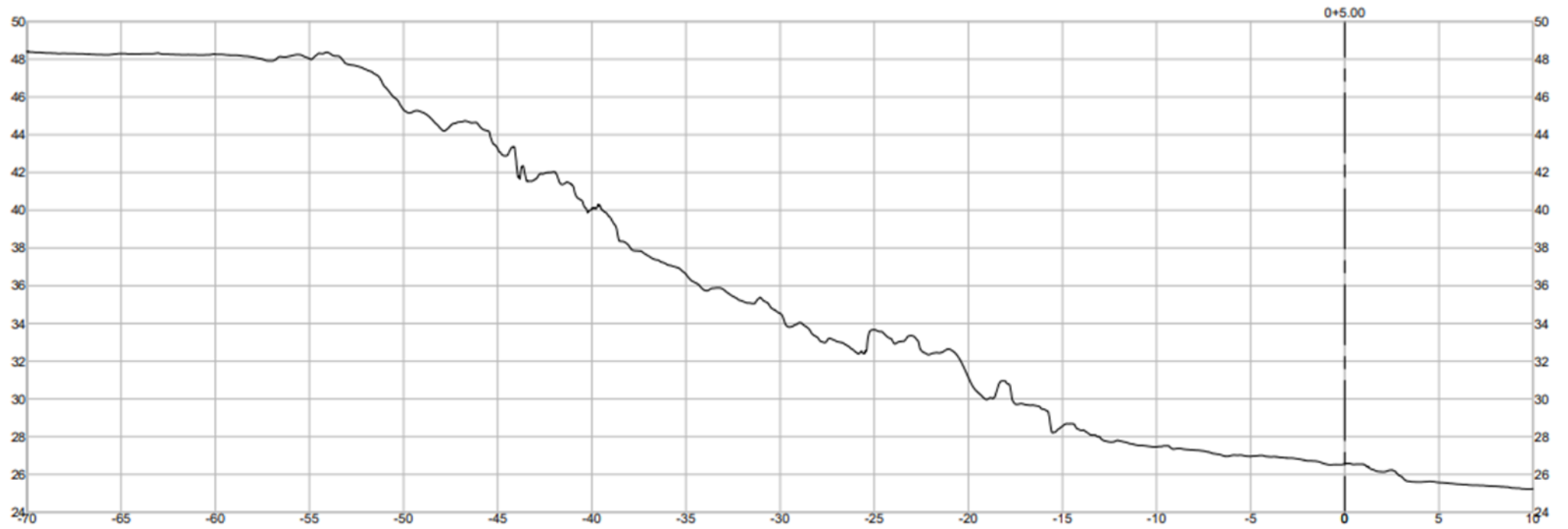
PONTOS DE CONTROLE

Nome	Latitude	Longitude	Alt Ellip (m)	Código	Desv Padrão n (m)	Desv Padrão e (m)	Desv Padrão Hz (m)	Desv
IFAL001	9°39'52,889"S	35°43'47,843"W	-4,006		0,001	0,001	0,001	

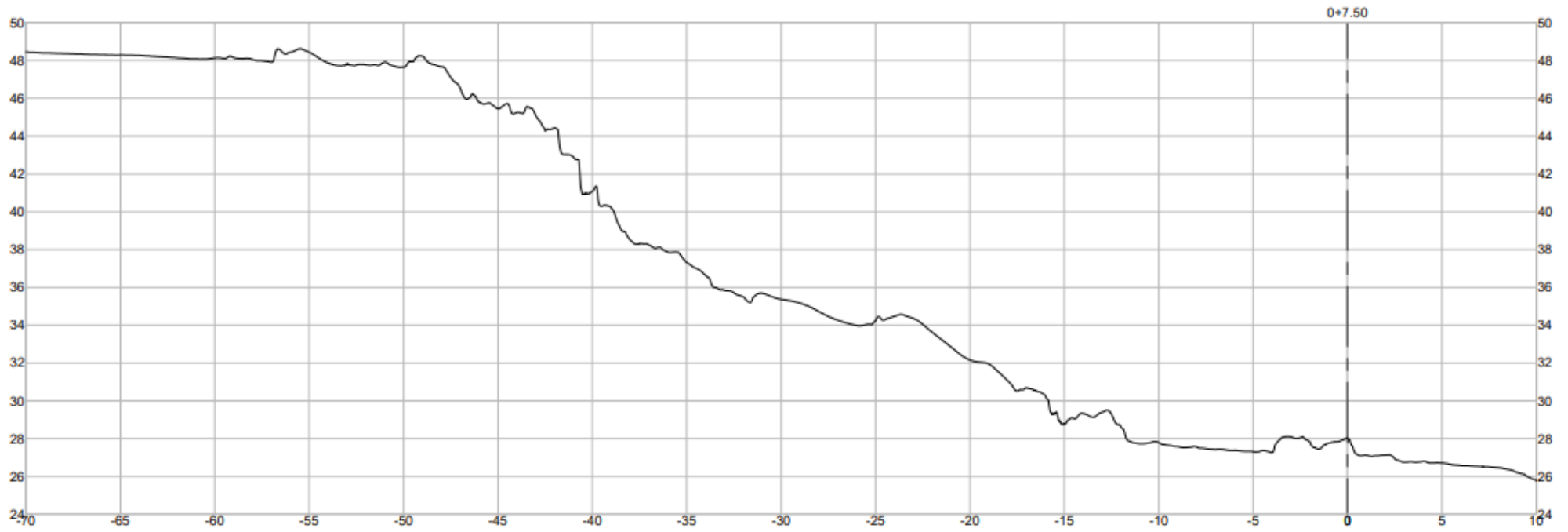
APÊNDICE C: Seção 1 (Civil 3D)



APÊNDICE D: Seção 2 (Civil 3D)



APÊNDICE E: Seção 3 (Civil 3D)



APÊNDICE E: Relatório de processamento Agisoft Metashape



Survey Data

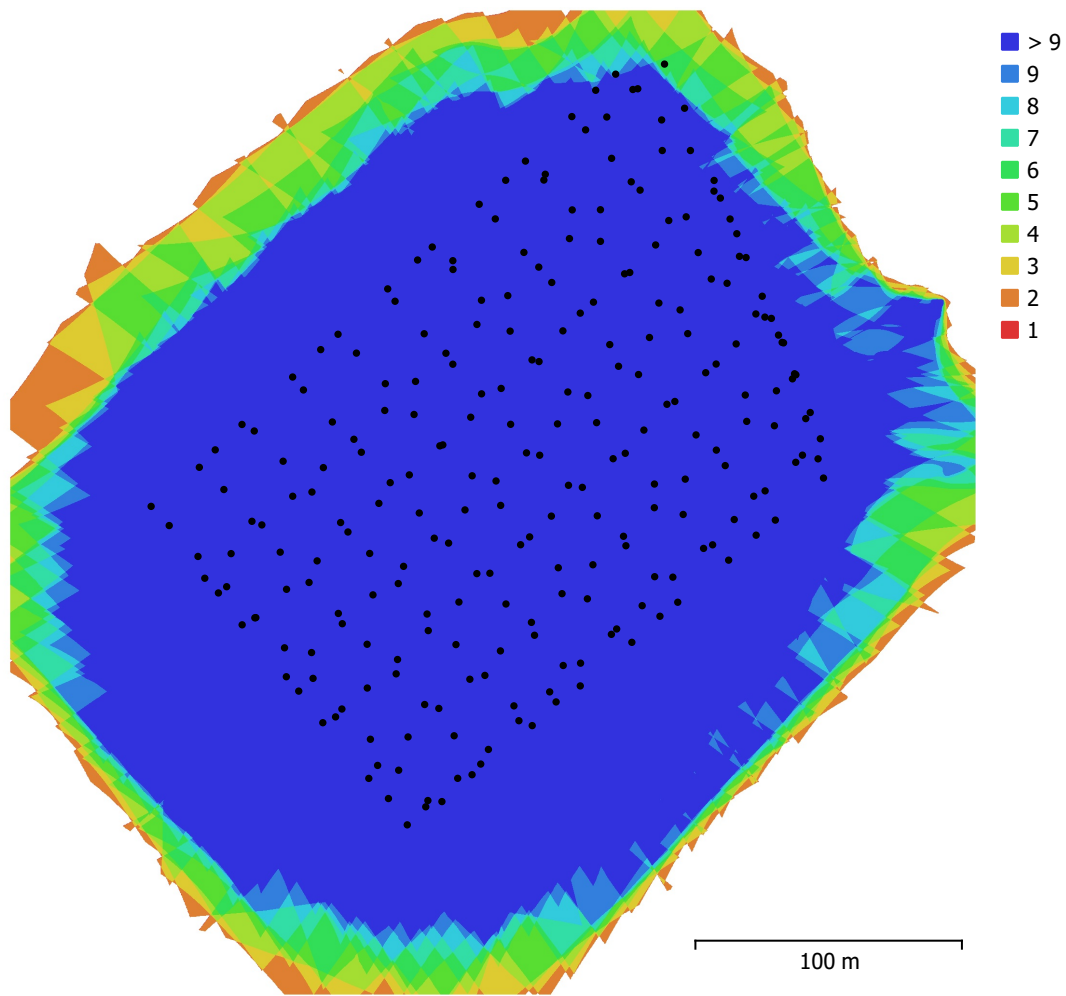


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	248	Camera stations:	248
Flying altitude:	61.0 m	Tie points:	146,149
Ground resolution:	1.67 cm/pix	Projections:	826,374
Coverage area:	0.0971 km ²	Reprojection error:	0.647 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310R (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μ m	Yes

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

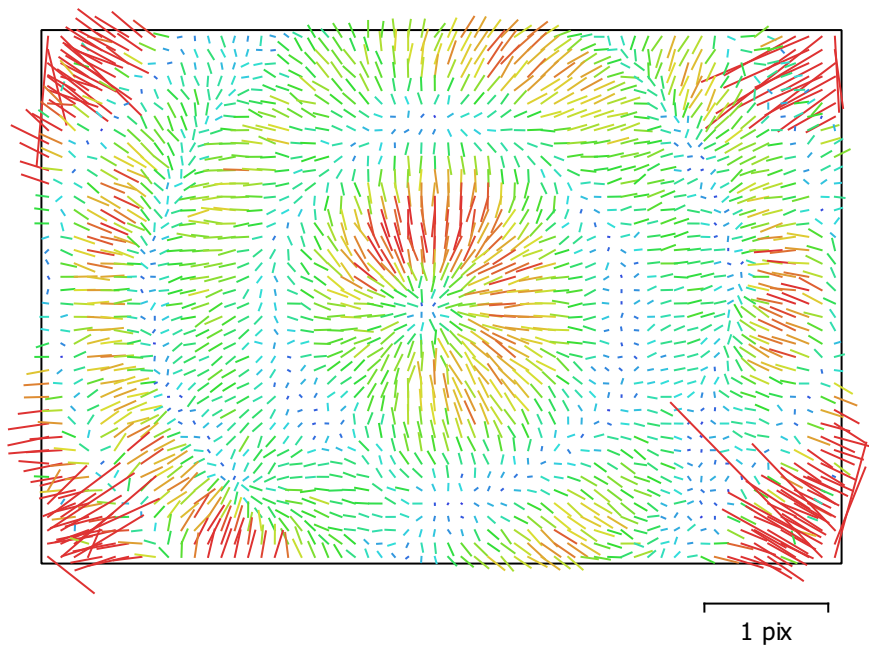


Fig. 2. Image residuals for FC6310R (8.8mm).

FC6310R (8.8mm)

248 images, precalibrated

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	3606.48	0.93	1.00	0.59	-0.78	-1.00	0.99	-0.97	-0.70	0.82
Cx	-12.2946	0.016		1.00	-0.47	-0.59	0.58	-0.57	-0.54	0.49
Cy	3.38676	0.017			1.00	0.78	-0.77	0.76	0.56	-0.80
K1	-0.268996	0.00014				1.00	-1.00	0.98	0.71	-0.82
K2	0.110957	0.00012					1.00	-1.00	-0.70	0.81
K3	-0.0287316	4.6e-05						1.00	0.69	-0.80
P1	-9.60624e-05	6.2e-07							1.00	-0.58
P2	5.91938e-05	8.1e-07								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

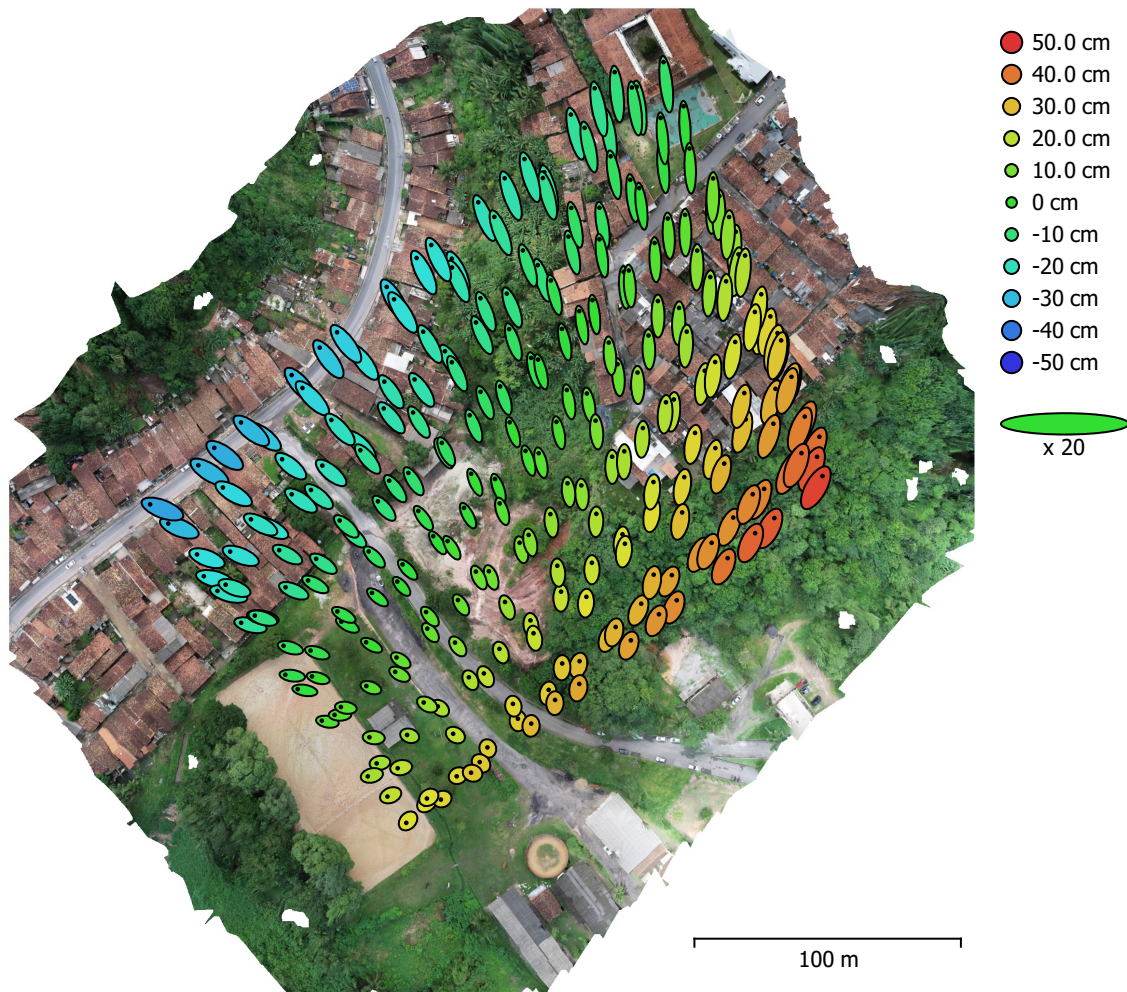


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
18.4984	41.7937	20.759	45.7045	50.198

Table 3. Average camera location error.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points

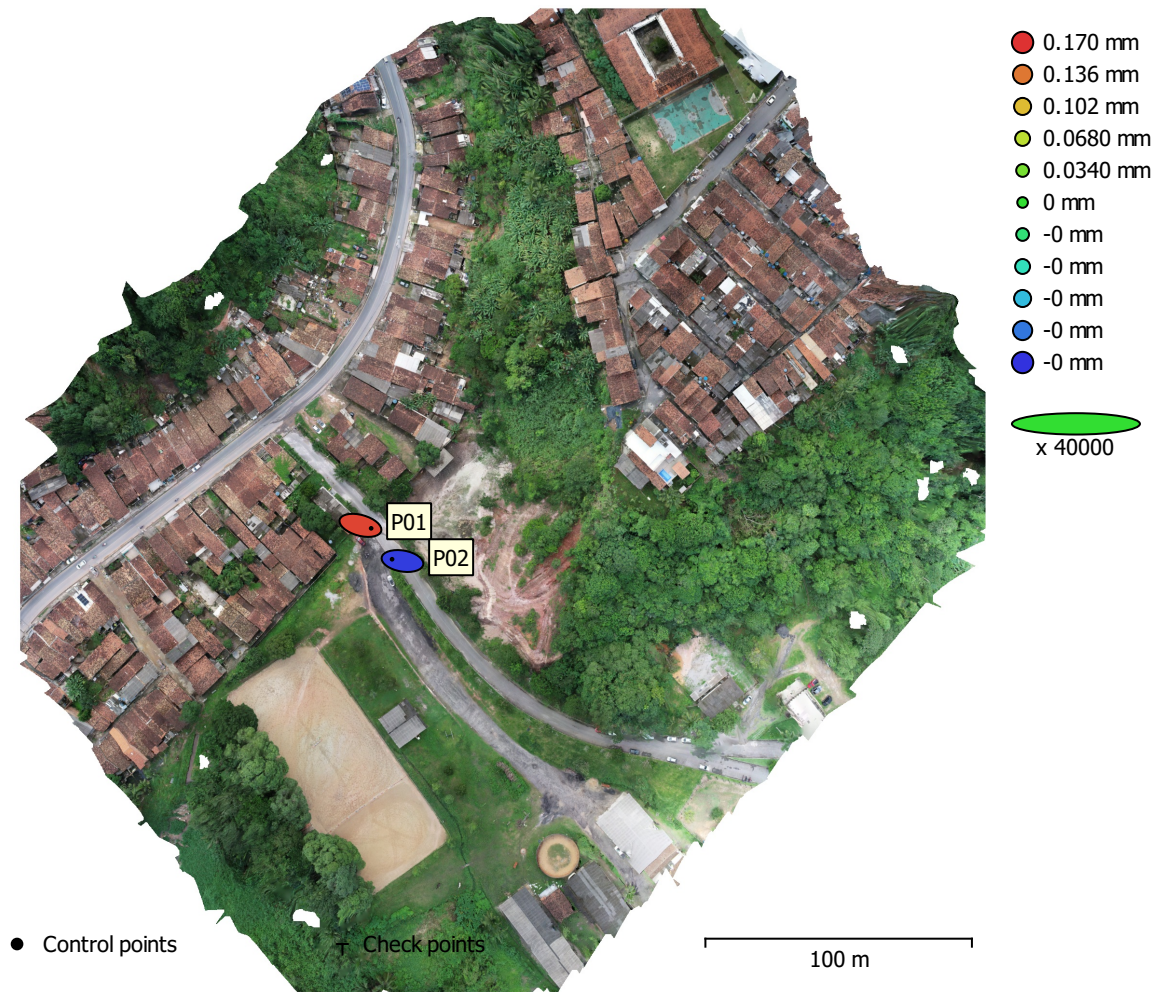


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
2	0.198282	0.04578	0.163074	0.203498	0.260777

Table 4. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
P01	0.201204	-0.0555264	0.161155	0.263699	4.260 (12)
P02	-0.195316	0.0332931	-0.164971	0.257822	0.605 (12)
Total	0.198282	0.04578	0.163074	0.260777	3.043

Table 5. Control points.
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

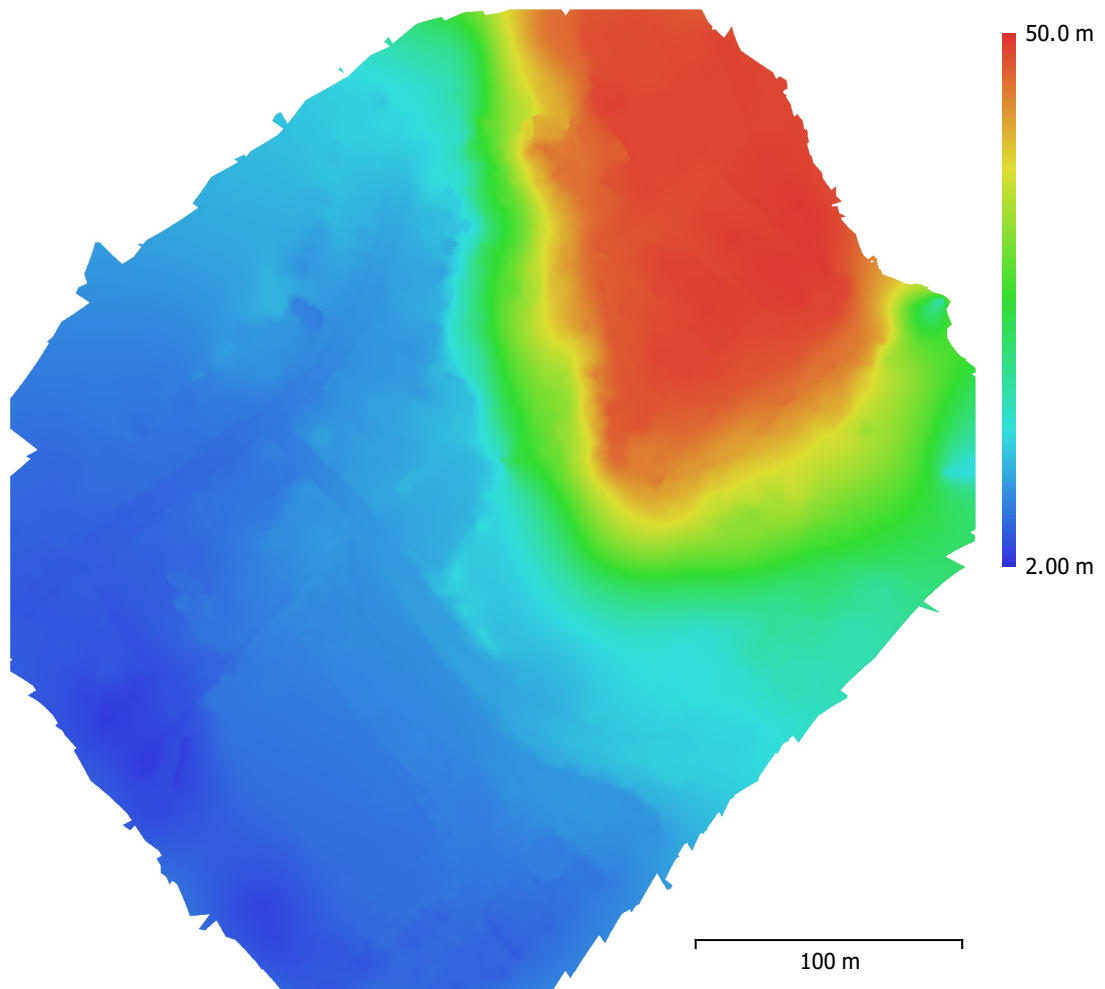


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 3.34 cm/pix
Point density: 898 points/m²

Processing Parameters

General

Images	248
Aligned images	248
Markers	2
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 25S (EPSG::31985)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Tie Points

Points	146,149 of 177,878
RMS reprojection error	0.160425 (0.646731 pix)
Max reprojection error	0.578323 (42.9535 pix)
Mean key point size	3.21537 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	5.9423

Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Key point limit per Mpx	1,000
Tie point limit	4,000
Exclude stationary tie points	Yes
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	2 minutes 11 seconds
Matching memory usage	721.14 MB
Alignment time	59 seconds
Alignment memory usage	363.52 MB

Optimization parameters

Parameters	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Exclude corners	No
Optimization time	3 seconds
Date created	2024:06:25 10:18:19
Software version	2.2.0.19135
File size	60.30 MB

Depth Maps

Count	248
-------	-----

Depth maps generation parameters

Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	12 minutes 40 seconds
Memory usage	5.11 GB
Date created	2024:06:25 10:39:45
Software version	2.2.0.19135
File size	1.60 GB

Point Cloud

Points	103,346,656
Coordinate precision	8.34 mm

Point attributes	
Color	3 bands, uint8
Normal	
Point classes	
Created (never classified)	82,926,510
Ground	19,662,527
Low Point (noise)	757,619
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Max neighbors	16
Processing time	12 minutes 40 seconds
Memory usage	5.11 GB
Point cloud generation parameters	
Source data	Depth maps
Processing time	20 minutes 33 seconds
Memory usage	9.69 GB
Ground points classification parameters	
Max angle (°)	10
Max terrain slope (deg)	10
Max distance (m)	1
Cell size (m)	50
Classification time	13 minutes 20 seconds
Classification memory usage	4.94 GB
Date created	2024:06:25 11:00:19
Software version	2.2.0.19135
File size	1.32 GB
DEM	
Size	10,846 x 11,056
Resolution	3.34 cm/pix
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 25S (EPSG::31985)
Reconstruction parameters	
Source data	Point cloud
Interpolation	Enabled
Source classes	Ground
Processing time	1 minutes 0 seconds
Memory usage	118.24 MB
Date created	2024:06:25 11:28:36
Software version	2.2.0.19135
File size	403.83 MB
Orthomosaic	
Size	10,588 x 10,585
Resolution	3.50 cm/pix
Coordinate system	SIRGAS 2000 / UTM zone 25S (EPSG::31985)
Colors	3 bands, uint8
Orthophotos	822.30 MB
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
Processing time	3 minutes 54 seconds
Memory usage	1.87 GB
Date created	2024:06:25 11:21:06
Software version	2.2.0.19135
File size	937.34 MB

System

Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	2.2.0 build 19135
OS	Windows 64 bit
RAM	127.25 GB
CPU	Intel(R) Xeon(R) w3-2535
GPU(s)	NVIDIA RTX 4000 Ada Generation



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal de Alagoas
***Campus* Maceió**
Biblioteca Benevides Monte

631.4
S586a

Silva, Sheldon Cristiano Souza da.
Avaliação da estabilidade de um talude do complexo da Chã da Jaqueira, Maceió - AL [recurso eletrônico] / Sheldon Cristiano Souza da Silva, Daniel Vinicius da Silva. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 6,92 MB). – 2025.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: Internet.

Orientação: Profa. Dra. Taise Monique De Oliveira Carvalho.

Coorientação: Prof. Dr. André Pinto Rocha.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Alagoas, *Campus* Maceió, Maceió, 2025.

1. Engenharia Civil. 2. Encostas urbanas – Estudo. 3. Encostas – Análise. 4. Barreiras – Formação. 4. Risco geotécnico. 5. Talude – Chã da Jaqueira. I. Silva, Daniel Vinicius da. II. Título.

Franciane Monick Gomes de França
Bibliotecária – CRB 4/1831



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal de Alagoas
Campus Maceió
Biblioteca Benevides Monte

631.4
S586a

Silva, Sheldon Cristiano Souza da.
Avaliação da estabilidade de um talude do complexo da Chã da Jaqueira, Maceió - AL [recurso eletrônico] / Sheldon Cristiano Souza da Silva, Daniel Vinicius da Silva. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 6,92 MB). – 2025.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: Internet.

Orientação: Profa. Dra. Taise Monique De Oliveira Carvalho.

Coorientação: Prof. Dr. André Pinto Rocha.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Alagoas, *Campus Maceió*, Maceió, 2025.

1. Engenharia Civil. 2. Encostas urbanas – Estudo. 3. Encostas – Análise. 4. Barreiras – Formação. 4. Risco geotécnico. 5. Talude – Chã da Jaqueira. I. Silva, Daniel Vinicius da. II. Título.

Franciane Monick Gomes de França
Bibliotecária – CRB 4/1831