



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

DANYLO DE ANDRADE LIMA

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL PARA ANÁLISE DA
ESTABILIDADE DE TALUDES**

Campina Grande – PB

2023

DANYLO DE ANDRADE LIMA

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL PARA ANÁLISE DA
ESTABILIDADE DE TALUDES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior

Campina Grande – PB

2023

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades, além disso, colocar pessoas tão maravilhosas no meu caminho.

Agradeço a minha mãe Conceição Andrade e ao meu pai Francisco Flávio por todo apoio, por todas as orações, carinho, atenção, por sempre me motivarem e se esforçarem para me manter estudando, mesmo com todas as dificuldades da vida. Saibam que tudo que sou devo a vocês.

Ao Professor Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior, pela confiança, orientação e por proporcionar as condições necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa no campo e estar sempre acessível mesmo nos tempos difíceis de pandemia.

A Edilene Abreu por todo o companheirismo, paciência, apoio, pelo carinho, pelas palavras incentivadoras, por sempre me dar força nos momentos difíceis e me mostrar o lado bom das coisas.

A minha irmã Dayane, que é minha referência, obrigado por todo o apoio, carinho, pelos puxões de orelha, por todo o aprendizado nas contribuições feitas para o trabalho, por me ajudar nessa jornada, muito obrigado maninha.

A Bruna Lira, por agregar informações e tirar minhas dúvidas a respeito da área de estudo e por ter aceitado participar da banca de avaliação do trabalho e pelas contribuições.

A John Cunha, por ter aceitado participar da banca de avaliação do trabalho e pelas contribuições.

A todos os professores que contribuíram para a minha formação profissional e que auxiliaram também em meu desenvolvimento pessoal.

A meus amigos que sempre me ajudaram e me deram força, em especial a Bruna Ellem, Conceição Sousa, Rodrigo Lima, Brenda Nunes, Mateus Valdevino e todos que convivi durante essa caminhada.

Ao Fábio Oliveira e a todos da Métrica pelo suporte logístico que contribuiu no desenvolvimento do trabalho.

A Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil e Ambiental pela oportunidade de realização do curso, agradeço a todos os servidores, técnicos e coordenadores que fizeram parte da minha formação.

A CAPES, pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de estudo, cuja contribuição foi imprescindível para realização dessa pesquisa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão de mais uma etapa em minha vida. Meus sinceros agradecimentos.

L732m Lima, Danylo de Andrade.
Modelagem tridimensional para análise da estabilidade de taludes /
Danylo de Andrade Lima. – Campina Grande, 2023.
87 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) –
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e
Recursos Naturais, 2023.
"Orientação: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior".
Referências.

1. Geotecnia. 2. Drone – Levantamento Aéreo. 3. Movimentos de
Massa. 4. Geotecnologias. I. Santos Júnior, Olavo Francisco dos.
II. Título.

CDU 624.13(043)

DANYLO DE ANDRADE LIMA

MODELAGEM TRIDIMENSIONAL PARA ANÁLISE DA
ESTABILIDADE DE TALUDES

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 31 / 08 / 2023

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JUNIOR
Data: 27/09/2023 14:31:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^o. Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior
(Orientador – Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN)

Documento assinado digitalmente
 JOHN ELTON DE BRITO LEITE CUNHA
Data: 28/09/2023 20:31:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^o. Dr. John Elton de Brito Leite Cunha
(Examinador Interno – Universidade Federal da Campina Grande - UFCG)

Documento assinado digitalmente
 BRUNA SILVEIRA LIRA
Data: 26/09/2023 20:07:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dra. Bruna Silveira Lira
(Examinadora Externa – Universidade Federal do Piauí - UFPI)



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

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): DANYLO DE ANDRADE LIMA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR. OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JUNIOR - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR. JOHN ELTON DE BRITO LEITE CUNHA - PPGECA/UFCG, DR.^a BRUNA SILVEIRA LIRA - UFPI - EXAMINADORA EXTERNA (PORTARIA 30/2023). / TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “MODELAGEM TRIDIMENSIONAL PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 09:00 HORAS / NA SALA 02 DO BLOCO CT, LABORATÓRIO DE PAVIMENTOS, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 31 DE AGOSTO 2023**
- 5.
- 6.
- 7.
- 8.
9. **BRUNA SILVEIRA LIRA - UFPI - EXAMINADORA EXTERNA**



Documento assinado eletronicamente por **JOHN ELTON DE BRITO LEITE CUNHA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/09/2023, às 14:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Danylo de Andrade Lima, Usuário Externo**, em 01/09/2023, às 14:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruna Silveira Lira, Usuário Externo**, em 01/09/2023, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JÚNIOR, PROFESSOR**, em 01/09/2023, às 18:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 04/09/2023, às 07:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3715697** e o código CRC **D04A34BA**.

“Não importa o que a vida fez de você,
mas o que você faz com o que a vida fez de você”

Jean-Paul Sartre

RESUMO

A análise da estabilidade de taludes é um tópico científico amplamente estudado na geotecnia. Essas análises procuram uma melhor compreensão do assunto para permitir a tomada de decisões e ações preventivas ou corretivas, uma vez que a ocorrência de deslizamentos pode causar danos ambientais, sociais e patrimoniais. Este estudo apresenta uma configuração prática desenvolvida de modo a gerar imagens de alta resolução e modelos tridimensionais (3D) utilizando-se de drones para monitoramento de encostas e maciços de terra. A área de estudo definida foi o talude da Rua João Lourenço, no município de Areia-PB, que foi identificada como uma área de risco em pesquisa realizada pela CPRM (2015). Para o mapeamento, foi necessária uma plataforma de voo (*Drone Harmony*), de forma a realizar a ação com maior acurácia e auxiliar o usuário na aquisição das imagens de alta resolução. Estas imagens foram processadas por um *software* de fotogrametria o *Metashape* para gerar modelos da área de estudo. A análise de estabilidade de taludes foi realizada com a integração do modelo 3D gerado pela fotogrametria com o *software* Slide3 da Rocscience, que resultou em uma rápida aquisição de dados relacionados a superfície e topografia da área, possibilitando a realização da análise de estabilidade eficiente. Isso resulta em diversos benefícios, como a verificação prática e precisa das encostas, relação custo-benefício favorável e maior eficiência na investigação da estabilidade dos taludes. A análise tridimensional mostrou resultados similares a estudos anteriores, com os fatores mínimos de segurança (FS) de 1,11 a 1,89. Essa abordagem inovadora tem potencial para melhorar a eficiência e acurácia das avaliações, contribuindo para um planejamento mais seguro e sustentável de projetos geotécnicos. Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que o levantamento aéreo feito por fotogrametria e modelagem tridimensional são ferramentas com grande importância nos levantamentos, na interpretação dos dados e na tomada de decisões rápidas e efetivas.

Palavras-chave: Drone. levantamento aéreo, movimentos de massa, geotecnologias

ABSTRACT

The analysis of slope stability is a widely studied scientific topic in geotechnics. Thus, studies in this area seek a better understanding of the subject to enable decision-making and preventive or corrective actions, as landslide occurrences can lead to significant environmental, social, and property damages. This study introduces a practical configuration developed to generate high-resolution images and three-dimensional (3D) models using drones for monitoring slopes and earth masses. The defined study area was the slope located in the João Lourenço street in the municipality of Areia-PB, identified as a high-risk area in research conducted by CPRM (2015). For mapping purposes, a Drone Harmony flight platform was employed to achieve greater accuracy and assist users in acquiring high-resolution images. These images were processed using photogrammetry software, Metashape, to generate models of the study area. The slope stability analysis was conducted by integrating the 3D model generated through photogrammetry with Rocscience's Slide3 software, enabling the efficient acquisition of data related to surface and topography, facilitating effective stability analysis. This approach yields several benefits, including practical and precise slope verification, favorable cost-benefit ratio, and increased efficiency in investigating slope stability. The three-dimensional analysis showed results similar to previous studies, with minimum safety factors (FS) ranging from 1.11 to 1.89. This innovative approach has the potential to enhance efficiency and accuracy in evaluations, contributing to safer and more sustainable geotechnical project planning. Based on the obtained results, it can be concluded that aerial surveying through photogrammetry and three-dimensional modeling are tools of great importance in surveys, data interpretation, and prompt effective decision-making.

Keywords: Drone. aerial survey, mass movements, geotechnologies

Lista de Figuras

Figura 1 - Mortes em número absoluto no Brasil por processo natural, banco de dados do UFSC-CEPED-Santa Catarina (esquerda) e dados do banco de dados internacional EM-DAT (direita).	20
Figura 2 - Apresentação dos diferentes tipos de deslizamento.....	23
Figura 3 - Deslizamentos em solos residuais.....	25
Figura 4 - Apresentação dos diferentes tipos de escorregamento.	31
Figura 5 - Área projetada por uma câmera com o ângulo de visão α voando na altitude h (área do solo que é visível através da câmera em uma determinada posição e orientação).	32
Figura 6 - Ilustração da visão estereoscópica.	33
Figura 7 - Localização do Município de Areia.....	39
Figura 8 - Mapa de situação talude da Rua João Lourenço.....	40
Figura 9 - Área onde ocorreu um movimento de massa na Rua João Lourenço.....	41
Figura 10 - Diagnóstico do município de Areia - Mapa Geológico	42
Figura 11- Fluxograma da metodologia	43
Figura 12 - Ensaio SPT -Delimitação dos perfis do solo	44
Figura 13 - Esquema de coleta e furo de sondagem.....	45
Figura 14 - Plano de voo na plataforma Drone Harmony	47
Figura 15 - Demarcação dos pontos de controle.	48
Figura 16 - Base GPS RTK, GNSS South S86S	48
Figura 17 - Drone DJI Mavic Mini 2.....	50
Figura 18 – Dados das imagens do levantamento	51
Figura 19 - Metashape – Demarcação dos pontos de controle.....	52
Figura 20 – Ilustração: nuvem espaçadas e nuvem densa de pontos.....	52
Figura 21 – Ilustração da Nuvem de pontos classificada	53
Figura 22 - Delimitação da área para análise de estabilidade.....	54
Figura 23 - Superfície topográfica da área de estudo	55
Figura 24 - Simplificação e o reparo da superfície.....	56
Figura 25 - Inserção dos furos para delimitação dos perfis do solo	56
Figura 26 - Planos de delimitação das camadas de solo no modelo 3D (a) e em corte (b).	57
Figura 27 - Delimitação das camadas de solo no modelo	58
Figura 28 - Ferramenta de análise e seus diversos métodos de estabilidade de taludes.....	59
Figura 29 - Imagens do levantamento feitos com drone	61

Figura 30 - Criação da nuvem de pontos espaçada	62
Figura 31 - Criação da nuvem de pontos densa (a) - densidade dos pontos obtidos (b)	63
Figura 32 - Nuvem de pontos classificada.....	64
Figura 33 - Metashape - Criação o Modelo Digital de Superfície (MDS)	65
Figura 34- Criação Modelo Digital do Terreno (MDT)	66
Figura 35 - Curvas de nível geradas área de estudo	67
Figura 36 – Ortomosaico a de alta resolução	68
Figura 37 - Criação modelo texturizado	68
Figura 38 - Modelagem da superfície analisada.....	71
Figura 39 - Mapa da superfícies analisadas – Cenário 1	72
Figura 40 - Mapa da superfícies analisadas – Cenário 2	72
Figura 41 - Mapa de de segurança da do talude – Cenário 1	73
Figura 42 - Mapa de de segurança da do talude – Cenário 2	74
Figura 43 - Região suscetível a movimento de massa – Cenário 1	75
Figura 44 - Região suscetível a movimento de massa – Cenário 2	75
Figura 45 - Modelo de elevação para análise de estabilidade	76

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação de Varnes	21
Tabela 2 - Classificação dos fatores deflagradores dos movimentos de encostas (Varnes, 1978)	21
Tabela 3 - Classificação de Varnes dos movimentos de massa quanto à velocidade.	22
Tabela 4 - Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas.....	26
Tabela 5 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.....	27
Tabela 6 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos	27
Tabela 7 - Resumo das estruturas utilizadas para o armazenamento de (MDE).....	37
Tabela 8 - Métodos de aquisição de dados para a construção de Modelos Digitais de Elevação.	37
Tabela 9 - Parâmetros Intercepto coesivo e ângulo de atrito dos solos no ensaio Cisalhamento direto	Erro! Indicador não definido.
Tabela 10 - Parâmetros de resistência dos solos JLT, JLC e JLB no ensaio CIU	Erro! Indicador não definido.
Tabela 11 - Relatório com as coordenadas dos pontos de controle obtidos pelo levantamento com RTK GNSS.....	49
Tabela 12 - Relatório de processamento. Pontos de Controle: RMSE. X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.	69
Tabela 13 - Pontos de Controle: X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.....	69
Tabela 14 - Pontos de Controle, Check points. X - Easting, Y - Northing, Z – Altitude	69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo geral.....	16
1.1.1 Objetivos específicos	16
1.2 Justificativa	17
1.3 Estrutura da dissertação	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Urbanização x movimentos de massa	19
2.2 Movimentos de massa.....	20
2.3 Classificações de taludes	23
2.4 Fatores instabilizantes e mecanismos de ruptura	24
2.5 Análises de estabilidade de taludes	26
2.6 Métodos de equilíbrio limite	28
2.8 Drones e suas aplicações.....	32
2.9 Fotogrametria	33
2.10 Os modelos digitais (MDT e MDE)	35
2.11 Modelagem Digital de Elevação	36
2.12 Descrição geral do Município de Areia.....	38
3. METODOLOGIA.....	43
3.1 Área de estudo.....	43
3.1.1 Delimitação da área e planejamento de voo	43
3.1.2 Demarcação dos pontos de controle	47
3.1.3 Levantamento aéreo	50
3.1.4 Processamento dos dados	51
3.1.5 Aquisição dos modelos	53
3.2 Análise de estabilidade	54
3.2.1 Compatibilização da superfície de estudo	54

3.2.2	Análise de estabilidade	55
3.2.3	Coefficientes de segurança.....	60
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1	Levantamento aéreo	61
4.2	Nuvem de pontos.....	61
4.3	Modelos digitais	64
4.4	Levantamento planialtimétrico	66
4.5	Imagem de alta resolução - ortomosaico	67
4.6	Modelo tridimensional da área.....	68
4.7	Análise de estabilidade	70
4.7.1	Superfícies analisadas.....	70
4.7.2	Mapa de superfície analisadas	71
4.7.3	Delimitação da área com menores coeficientes de segurança	73
5.	CONCLUSÕES.....	78
	REFERÊNCIAS	79
	ANEXOS	85

1 INTRODUÇÃO

As comunidades de baixa renda que vivem em áreas de encosta enfrentaram uma série de desafios recorrentes ao longo do tempo, muitas vezes resultando em situações de risco devido à instabilidade de encostas, mudanças na formação rochosa, movimento de massa, rachaduras e descontinuidades. Esses problemas sociais relacionados à habitação persistem há anos sem a devida intervenção das autoridades governamentais. Como resultado, grandes faixas de nosso território foram ocupadas desordenadamente, por influências humanas e naturais, comprometendo a segurança e a estabilidade dessas áreas habitadas. (Tominaga *et al.* 2015).

A estabilidade de taludes é fundamental para garantir a segurança das pessoas e da infraestrutura. No Brasil, movimentos de massa relacionados a taludes têm atraído a atenção por seus efeitos devastadores. Esses eventos naturais, como quedas de rochas, colapsos de encostas, deslizamentos de terra e detritos, podem ter consequências catastróficas. A ocorrência de movimentos de massas é afetada por fatores internos e externos, como a geometria da superfície do deslizamento, chuva e erosão (Gameiro *et al.*, 2021).

Os avanços na tecnologia de levantamento por drone abriram novas oportunidades para análises precisas e detalhadas da estabilidade de taludes. Dentre essas técnicas, a fotogrametria aliada à modelagem tridimensional (3D) tem se mostrado uma abordagem promissora. A fotogrametria envolve a extração de medições confiáveis de fotografias para criar modelos 3D de alta resolução de encostas e terrenos (Lato & Vöge., 2012; Long, *et al.*, 2021).

O uso frequente de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) ganhou popularidade, principalmente devido ao custo relativamente baixo de aquisição de imagens, o que tem levado ao uso cada vez maior da fotogrametria aérea dos VANTs. (Salvini *et al.*, 2020), No entanto, a implementação generalizada dessa tecnologia ainda enfrenta desafios significativos, a baixa difusão dessa tecnologia associada a padronização de métodos de coleta e análise de dados, a integração de sensores especializados, e questões regulatórias relacionadas à operação de drones em áreas sensíveis. Superar esses obstáculos é fundamental para permitir que os drones desempenhem um papel integral na melhoria da segurança e eficiência do monitoramento de taludes, contribuindo assim para a redução de riscos em projetos de engenharia geotécnica.

A análise de estabilidade compreende uma série de métodos com o objetivo de calcular um índice ou medida que possibilite quantificar a proximidade da ruptura de um talude específico ou de uma encosta, considerando diversas condições presentes, como pressões neutras, cargas adicionais, geometria, composição do solo, entre outras (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

Os avanços tecnológicos voltados aos *drones*, a capacidade de processamento dos computadores da nova geração e a disponibilidade de *softwares* para tratar os dados têm possibilitado cada vez mais a expansão da utilização da modelagem tridimensional, principalmente aplicadas em áreas extensas e de difícil acesso, observando resultados consistentes de levantamentos, como análises volumétricas e inspeção visual de locais inacessíveis, trazendo uma série de benefícios (Lee & Choi, 2015).

A aplicação da fotogrametria e da modelagem 3D na análise da estabilidade de taludes oferece diversas vantagens financeiras e de eficiência, pois proporciona um método prático e econômico para coletar dados de alta resolução, reduzindo significativamente o tempo e os recursos necessários para levantamentos de campo tradicionais (Westen *et al.*, 2008).

Nesta conjuntura, o levantamento e avaliação de riscos emergem como ferramentas cruciais para orientar as estratégias de gestão de riscos. Isso possibilita a identificação e descrição das regiões que têm o potencial de provocar danos à população, construções e infraestrutura. Além disso, auxilia na criação de uma ordem de prioridade para as situações identificadas, oferecendo orientação valiosa para as ações empreendidas pelas instituições responsáveis.

O estudo se concentrou em avaliar a estabilidade de taludes em regiões propensas a movimentos de massas no Município de Areia – PB. Os dados coletados foram processados utilizando *softwares* fotogramétricos avançados para gerar modelos 3D de alta precisão, a fim de realizar a análise de estabilidade de taludes, visando compreender e mitigar os riscos associados a esses movimentos de massa em encostas.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo realizar a modelagem tridimensional a partir de imagens de alta resolução capturadas por meio de drones para análise de estabilidade e monitoramento de encostas, buscando desenvolver uma abordagem que agregue informações confiáveis sobre a geometria dos taludes, áreas de instabilidade e fator de segurança (FS) para auxiliar na tomada de decisões relacionadas ao monitoramento dessas áreas.

1.1.1 Objetivos específicos

- Obtenção de resolução adequada para a análise do talude para criação de nuvem de pontos por meio da execução de levantamento aerofotogramétrico da área de estudo;

- Desenvolver uma metodologia para classificar da nuvem de pontos, com o propósito de obter o Modelo Digital de Superfície (MDS) e o Modelo Digital do Terreno (MDT) da área em estudo;
- Realizar a análise de estabilidade tridimensional, a partir das superfícies geradas pela modelagem;
- Determinar os fatores de segurança de locais com potencial risco de movimentos de massas.

1.2 Justificativa

O processo de urbanização requer a construção e implementação de políticas para garantir o acesso e conforto dos habitantes. Isso inclui intervenções em setores como transporte, energia, hidráulica, saneamento e outras infraestruturas. Muitas dessas construções são realizadas em áreas de taludes, o que provoca mudanças nas condições naturais e transforma a paisagem. No entanto, é importante destacar que a construção nessas áreas pode desencadear processos geodinâmicos, como movimento de massas ao longo das encostas, conforme apontado por Nunes (2015).

Com a ocupação de espaços urbanos e rurais, como por exemplo, ocupações irregulares de morros e limitações de espaços com a construção de novas rodovias e ferrovias, muitas vezes se faz necessário a utilização de terrenos a montante ou a jusante de taludes pré-existentes ou a escavação de novos taludes com geometria delimitada por interferências no terreno.

Os drones têm sido aplicados em diversas áreas, como medição de obras em terra, inspeção de taludes, reservatórios em concreto armado, barragens de terra, inspeção de fachadas de prédios e pontes. Além disso, são utilizados no monitoramento de vegetação e recursos hídricos em setores agrícolas e ambientais. A coleta de dados de imagens aéreas por meio de drones traz benefícios significativos em termos de tempo e recursos, permitindo a detecção e monitoramento de movimentos de massa e erosões, desafios constantes para engenheiros geotécnicos (Bar *et al.*, 2020).

A coleta de dados no campo da engenharia geotécnica está se tornando cada vez mais automatizada, garantindo a segurança e simplificando o trabalho (Alameda-Hernández *et al.*, 2017).

A metodologia de modelagem tridimensional de taludes é uma alternativa para automatizar a coleta de dados na área da geotecnia. Nesta ótica, devem ser analisadas as diversas

possibilidades de dimensionamento, pois o levantamento aéreo acelera o processo de modelagem e gera uma ampla possibilidade de dados para serem analisados.

Os métodos tradicionais de avaliação de taludes, tais como os levantamentos topográficos e análises em 2D, trazem limitações que acarretam em longos períodos de execução, sujeitos a erros e podem não fornecer uma visão completa da geometria e características dos taludes. A utilização da fotogrametria como uma abordagem alternativa tem o potencial de superar essas limitações, oferecendo uma solução mais eficiente e precisa (Wines, 2016).

Portanto, o presente estudo justifica-se por proporcionar a validação da aplicação de modelagem tridimensional a partir da ação aerofotogramétrica de drones para a análise da estabilidade de taludes usando *softwares* 3D.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta pesquisa foi estruturada em 5 tópicos. O tópico 1 apresenta uma contextualização das situações que envolvem problemas relacionados aos taludes, os objetivos da dissertação e sua justificativa. O tópico 2 apresenta uma revisão bibliográfica, abordando os temas desenvolvidos nesta dissertação, como fotogrametria, modelagem tridimensional, movimentos de massa e estabilidade de taludes. O tópico 3 apresenta a metodologia, incluindo procedimentos, equipamentos e normas utilizadas. No tópico 4 foram apresentados os resultados das modelagens 3D, as simulações de estabilidade dos cenários e a discussão dos resultados com outros autores. No tópico 5 foram apresentadas as conclusões obtidas a partir do estudo e as recomendações e sugestões para pesquisas futuras. Por fim são apresentadas as referências bibliográficas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Urbanização x movimentos de massa

Os movimentos de massa são fenômenos naturais com o potencial de causar danos devastadores tanto ambientais quanto sociais e materiais. Embora sejam mais comuns em encostas íngremes de montanhas, eles também podem ser desencadeados ou agravados pela intervenção humana, principalmente em áreas urbanas. Nestes casos, as populações que habitam estas áreas podem ter grande prejuízo, assim como as autoridades governamentais e as entidades privadas dos locais afetados (Antunes, 2015).

A Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) – Lei 12.608/12, que institui e dispõe sobre a Política Nacional, o Sistema Nacional e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil, prevê, em seu Art. 22, o que segue: os municípios incluídos no cadastro nacional que possuam áreas susceptíveis a grandes deslizamentos, inundações abruptas ou processos geológicos ou hidrológicos relacionados, devem elaborar um plano geotécnico para adequação à urbanização. A referida norma estabelece diretrizes de planejamento urbano, visando tanto garantir a segurança de parcelas solitárias recém-criadas quanto maximizar o uso de agregados para construção civil (Brasil, 2012). Poderia incluir após esse parágrafo, como os drones/fotogrametria poderia contribuir para o planejamento urbano por meio da identificação de áreas de risco.

Os movimentos de massa ocorrem quando o solo é incapaz de suportar o peso das camadas superiores. Estes podem ser desencadeados por fatores como a chuva intensa, a falta de drenagem adequada e a ocupação inadequada do solo. Esses eventos podem causar danos significativos à infraestrutura urbana, prejuízos ao meio ambiente, perdas materiais e em casos mais extremos, podem ocasionar perdas de vidas humanas.

As falhas em taludes representam riscos naturais altamente perigosos e destrutivos, pois podem resultar em um gigantesco número de mortes humanas, uma grande área de devastação ambiental e incalculáveis danos materiais (Varnes, 1984; Nadim *et al.*, 2006; Manunta *et al.*, 2004). De acordo com o banco de dados "Deslizamento de terra e outros movimentos de massa em encostas", da Associação Internacional de Geologia de Engenharia (IAEG), aproximadamente 14% das lesões e mortes decorrentes de catástrofes naturais são causadas por falhas de taludes (Aleotti & Chowdhury, 1999). Um estudo realizado pelo *Centre for Research on the Epidemiology of Disaster* - CRED (Centro de Pesquisa em Epidemiologia de Desastres),

revelou que falhas em encostas deixaram mais de 2,5 milhões de pessoas desabrigadas durante a primeira década do século XXI (CRED, 2020).

De acordo com Martins *et al.* (2017), durante o período de 1991 a 2015, ao examinar as informações do Banco de Dados Internacional para Desastres (EM-DAT) e do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), constatou-se que os desmoronamentos de terra representaram a segunda maior causa de óbitos em decorrência de eventos naturais no Brasil, sendo superado pelas enchentes e inundações (Figura 1).

Figura 1 - Mortes em número absoluto no Brasil por processo natural, banco de dados do UFSC-CEPED-Santa Catarina (esquerda) e dados do banco de dados internacional EM-DAT (direita).



Fonte: MARTINS *et al.*, 2017.

2.2 Movimentos de massa

Segundo a FAPEU (2020) âmbito nacional, a preparação refere-se às medidas adotadas para capacitar os órgãos do Sistema Nacional de Defesa Civil e as comunidades, visando assegurar uma resposta adequada diante de desastres, levando em consideração metas específicas e/ou cenários particulares. Atualmente, com o objetivo de cumprir o Plano Nacional de Gestão de Riscos e Respostas a Desastres, o Cemaden realiza o monitoramento de 958 municípios em todas as regiões do Brasil.

Ademais, esses municípios possuem um histórico documentado de desastres naturais resultantes de fenômenos de massa, como deslizamentos de encostas, fluxos de detritos, erosão de margens, quedas/rolamentos de blocos rochosos, bem como desastres associados a processos hidrológicos, incluindo inundações, enxurradas e grandes alagamentos. Além disso, é fundamental que os municípios monitorados identifiquem, mapeiem e georreferenciem as áreas de risco relacionadas a fenômenos hidrológicos e geológicos.

Além disso, existem diferentes tipos de movimentos de massa que podem ser identificados pela natureza dos materiais envolvidos e pela forma como ocorrem. Segundo Li & Mo (2019), alguns sistemas de classificação incluem outras variáveis, como a velocidade do movimento e a quantidade de água, ar ou gelo presentes no material que escorrega. Desde o século 19, surgiram muitos sistemas de classificação de movimentos de massa, mas o sistema de Varnes (1978) é amplamente aceito em todo o mundo.

Em 1978, Varnes desenvolveu um sistema de classificação para os diferentes tipos de movimentos de massa, que incluem queda, tombamento, escorregamento, expansão lateral, escoamento e complexo. De acordo com a Classificação de Varnes (1978), é possível categorizar os movimentos de massa com base na velocidade de deslocamento e na forma de ruptura observada, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação de Varnes

Tipos de movimento	Tipo de Material
Quedas	Rocha
Tombamentos	Rocha (blocos)
Escorregamentos	Massas de solo ou rocha
	<u>Rotacional</u>
	Translacional
Expansões laterais	Rocha
Fluxos	Rocha ou solo
Complexos	Conjugação de vários tipos de movimento

Fonte: Varnes (1978).

Compreender os principais elementos desencadeantes de movimentos de massa é de extrema relevância para antecipá-los, prevenir sua ocorrência ou minimizar suas ramificações. A Tabela 2 apresenta a categorização das fontes de desestabilização de encostas conforme a abordagem de Varnes (1978), a qual divide os elementos desencadeantes em duas categorias (aqueles que contribuem para o aumento da carga solicitante e os que reduzem a resistência).

Tabela 2 - Classificação dos fatores deflagradores dos movimentos de encostas (Varnes, 1978)

Ação	Fatores	Fenômenos Geológicos / Antrópicos
	Remoção de massa (lateral ou da base)	<ul style="list-style-type: none"> • Erosão; • Escorregamentos; • Cortes.
	Sobrecarga	<ul style="list-style-type: none"> • Peso da água de chuva; • Acúmulo natural de material (depósitos); • Peso da Vegetação;

Aumento da Solicitação		<ul style="list-style-type: none"> • Construções de estruturas, aterros, etc.
	Solicitações dinâmicas	<ul style="list-style-type: none"> • Terremotos, ondas, vulcões, etc; • Explosões, tráfego, sismos induzidos.
	Pressões laterais	<ul style="list-style-type: none"> • Água em trincas; • Congelamento; • Material expansivo.
Redução da Resistência ao Cisalhamento	Características Inerentes ao material (geometria, estruturas etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Características geomecânicas do material, tensões iniciais
	Mudanças ou fatores variáveis	<ul style="list-style-type: none"> • Ação do intemperismo provocando alterações físico-químicas; • Redução da coesão, ângulo de atrito; • Elevação do nível d'água, variação das poropressões; • Aumento da umidade / Redução da sucção; • Variações climáticas provocando umedecimento e secagem.

Fonte: Varnes, 1987.

Os movimentos de massa podem ser categorizados em uma ampla faixa de velocidades, variando de movimentos extremamente lentos a movimentos extremamente rápidos. Seguindo a escala de velocidades estabelecida por Varnes (1978), é adotada a classificação apresentada no Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação de Varnes dos movimentos de massa quanto à velocidade.

Definição	Velocidade
Extremamente rápido	> 3 m/s
Muito rápido	3 m/s a 0,3 m/s
Rápido	0,3 m/s a 1,6 m/dia
Moderado	1,6 m/dia a 1,6 m/mês
Lento	1,6 m/mês a 1,6 m/ano
Muito lento	1,6 m/ano a 0,06 m/ano
Extremamente lento	< 0,06 m/ano

Fonte: Varnes, 1987.

Os deslizamentos são os principais focos de interesse neste estudo. Sendo caracterizados por movimentos rápidos ao longo de superfícies bem definidas, esses eventos possuem uma importância extrema, sendo resultado da atuação de processos geomorfológicos em várias escalas temporais e frequentemente causando danos significativos à sociedade (NOGUEIRA,

2006). Esses tipos de movimentos ocorrem quando a resistência mobilizável é igual à resistência mobilizada, resultando em um fator de segurança igual a 1.

Essa condição pode ser expressa da seguinte maneira:

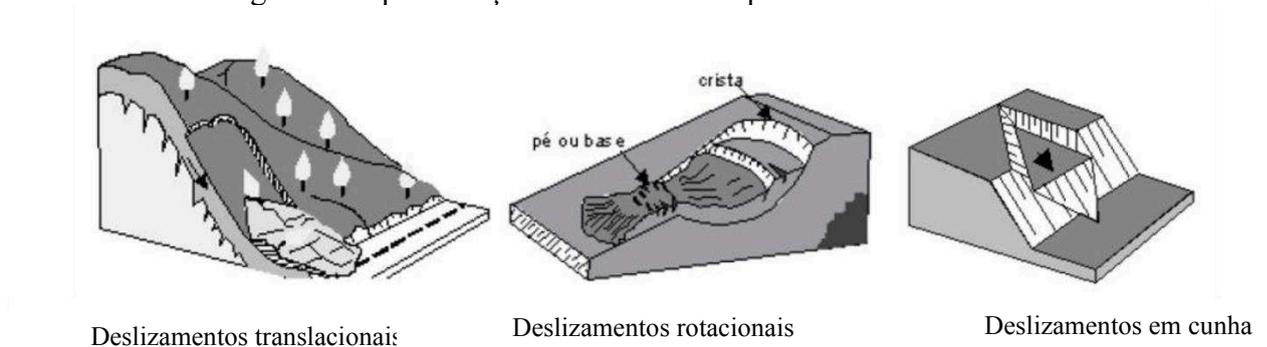
$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} = 1 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde τ_f é a tensão cisalhante na ruptura (valor máximo mobilizável) e τ_{mob} é a tensão cisalhante mobilizada.

Os deslizamentos podem estar associados a diversos processos, resultantes de movimentos de rotação, translação ou uma combinação de ambos. Dependendo do processo que os origina, eles podem ser classificados da seguinte forma (Figura 2):

- a) Deslizamentos translacionais (ou planares);
- b) Deslizamentos rotacionais (ou circulares);
- c) Deslizamentos em cunha.

Figura 2 - Apresentação dos diferentes tipos de deslizamento



Fonte: Adaptado de Gerscovich, 2012.

2.3 Classificações de taludes

Os taludes naturais ou encostas são definidos como superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos, originados por processos geológicos, geomorfológicos e ações antrópicas. Talude de corte é entendido como um talude originado de escavações antrópicas diversas (barragens, aterros de estrada, entre outros). Talude artificial se refere ao declive de aterros construídos a partir de materiais de diferentes granulometrias e origens, incluindo rejeitos industriais, urbanos ou de mineração (Gerscovich, 2012).

A análise e o controle de estabilizações de taludes e encostas têm seu amplo desenvolvimento com as grandes obras civis modernas. Atualmente, o estudo e controle de estabilidade de taludes e encostas podem ser relacionados a três grandes áreas de aplicação: construção e recuperação de grandes obras civis, exploração mineral e consolidação de ocupações urbanas em áreas de riscos e encostas.

Na classificação de taludes, o principal parâmetro é a ocorrência de descontinuidade, sendo um ponto periódico de uso quando se trata dos setores públicos, para uma caracterização de maciços de solo em áreas urbanas. Portanto, torna-se extremamente importante definir e caracterizar as descontinuidades existentes.

2.4 Fatores instabilizantes e mecanismos de ruptura

Os processos de instabilização em taludes estão relacionados a uma sequência de eventos, geralmente comportamentos cíclicos resultantes da formação rochosa e processos geológicos e geomórficos subsequentes (erosão, intemperismo e ação antrópica). De acordo com Terzaghi (1952) as causas estão divididas em:

I) Causas Internas: atuam reduzindo a resistência ao cisalhamento do solo constituinte do talude, sem ferir o seu aspecto geométrico visível.

II) Causas Externas: são devidas às ações externas que alteram o estado de tensões atuantes sobre o maciço, resultando em um acréscimo das tensões cisalhantes que, igualando ou superando a resistência intrínseca do solo, levam o maciço à condição de ruptura.

III) Causas Intermediárias: não podem ser explicitamente classificadas em uma das duas classes anteriormente definidas.

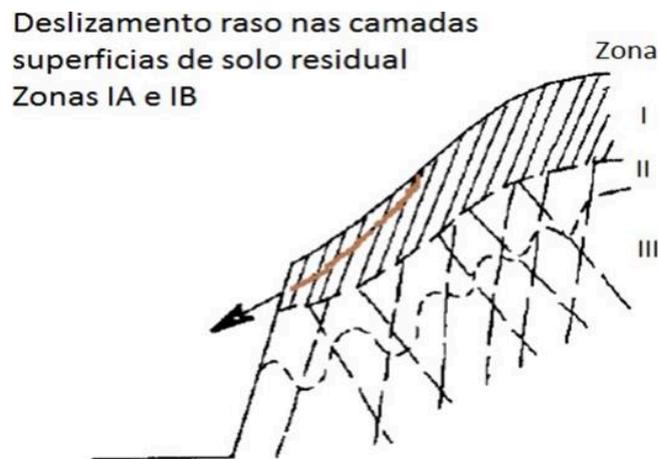
Uma variedade de fatores impacta a estabilidade das encostas, desencadeando movimentos de massa. Esses fatores englobam elementos como chuvas intensas, degelo de neve, flutuações de temperatura, abalos sísmicos, atividades vulcânicas e intervenções humanas diversas. O clima, em suas diferentes manifestações, exerce controle ou influência sobre alguns desses elementos, notadamente a precipitação e a temperatura, como observado por Gariano e Guzzetti (2016).

Os fatores que influenciam os deslizamentos em uma encosta são determinados pelo processo que aumenta a tensão de cisalhamento ou diminui a resistência ao cisalhamento. De acordo com as conclusões de Giani (1992), as principais razões por trás da diminuição da

resistência ao cisalhamento estão ligadas à composição do solo, à formação da rocha e suas imperfeições estruturais. Além disso, é válido considerar elementos como reações físicas e químicas, bem como modificações nas forças entre partículas granulares.

- De forma geral, taludes constituídos por solos residuais tendem a exibir uma estabilidade superior em inclinações mais acentuadas em comparação com taludes compostos por solos sedimentares.
- As rupturas observadas em taludes de solos residuais tendem a ser mais frequentemente superficiais, caracterizadas frequentemente por superfícies de falha ligeiramente curvas ou praticamente planas, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Deslizamentos em solos residuais



Fonte: Santos Jr, 2013.

A coesão assume uma relevância proeminente na estabilidade de taludes formados por solos residuais em comparação com aqueles compostos por solos sedimentares. Essa notável influência parece ser atribuída às ligações mais frágeis entre as partículas.

Um elemento de grande impacto na estabilidade de encostas constituídas de solos residuais é a resistência ao cisalhamento resultante da zona de pressão negativa acima do nível do lençol freático.

A ocorrência de movimentos de massa em solos residuais, em sua maioria, é desencadeada por chuvas intensas e atividades humanas. As precipitações geram aumentos temporários na pressão da água nos poros das encostas, resultando em deslizamentos. Atividades como escavações nas encostas, deposição de aterros, interferência nos padrões

naturais de drenagem e infiltração, além do desmatamento, são fatores que tendem a diminuir a estabilidade e podem culminar em falhas, sobretudo em contextos urbanos.

2.5 Análises de estabilidade de taludes

Existem duas formas de realizar análises de estabilidade de taludes: 1. Métodos determinísticos e; 2. Métodos probabilísticos. Os métodos determinísticos, em geral, baseiam-se em equilíbrio limite, utilizam valores médios para representar as tensões resistentes (τ_f) e mobilizantes (τ_{mob}). Embora esses valores sejam razoavelmente próximos da realidade, há uma variação associada a essas tensões, conforme mencionado pela ABNT - NBR 11682 (2009).

O conceito de "fator de estabilidade" é um resultado da avaliação de estabilidade que define as condições que permitem que um talude permaneça estável. Esse fator pode ser definido de diversas maneiras, sendo os mais comuns os seguintes: 1. Fator de Segurança (equilíbrio limite); 2. Índice de confiabilidade e; 3. Probabilidade de ruptura (Shamekhi, 2014). A seguir, serão apresentados de maneira resumida os principais conceitos de alguns métodos de equilíbrio limite, suas limitações e como utilizá-los.

Os fatores de segurança (FS) contemplados por esta Norma têm como objetivo abarcar as incertezas inerentes às várias fases de planejamento e implementação. Com base nos níveis de risco presentes, é necessário primeiro categorizar o projeto em uma das classificações de segurança listadas abaixo, as quais são estabelecidas considerando a probabilidade de perda de vidas humanas (conforme detalhado na Tabela 4) e de prejuízos materiais e ambientais (conforme descrito na Tabela 5) ABNT - NBR 11682 (2009).

Tabela 4 - Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas

Nível de segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego moderado
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

Fonte: ABNT - NBR 11682 (2009).

Tabela 5 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

Nível de segurança	Crítérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos

Fonte: ABNT - NBR 11682 (2009).

O engenheiro civil geotécnico deve justificar o enquadramento nas situações descritas nas Tabelas 4 e 5, em acordo com o contratante e em conformidade com requisitos das autoridades públicas. O fator de segurança mínimo necessário no projeto, considerando os níveis de segurança das Tabelas 4 e 5, deve ser determinado conforme a Tabela 6. Os fatores de segurança listados na Tabela 6 são aplicáveis às avaliações de estabilidade interna e externa do terreno.

Tabela 6 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais \ Nível de segurança contra danos a vida humana	Alto	Médio	Baixo
	Alto	1,5	1,5
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,3

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: ABNT - NBR 11682 (2009).

2.6 Métodos de equilíbrio limite

As análises de estabilidade mais comuns atualmente são baseadas no método do equilíbrio limite. Segundo Salunkhe *et al.* (2017), essa abordagem considera o solo como um sistema de tensão bidimensional, no qual as tensões perpendiculares à seção da massa do solo são negligenciáveis.

De mesmo modo, considera-se que:

a) o solo apresenta comportamento de ruptura plástica, onde as deformações de cisalhamento em toda a superfície crítica são grandes o suficiente para mobilizar toda a resistência ao cisalhamento disponível

b) segue o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e os parâmetros de resistência c e ϕ são conhecidos e;

c) as condições de infiltração e o nível de água no solo são conhecidos e a poropressão correspondente pode ser estimada.

Entretanto, a aplicação de métodos baseados no equilíbrio limite para a análise de estabilidade de taludes compostos por solos residuais é limitada. De acordo com Leong *et al.* (2013), a avaliação da estabilidade de taludes em solos residuais por meio de métodos analíticos é bastante restrita devido à incerteza nos parâmetros de resistência do solo e nas condições de infiltração.

A fim de utilizar as análises determinísticas, particularmente os Métodos de Equilíbrio Limite, é crucial estabelecer um Fator de Segurança (FS). Assim sendo, este fator é determinado pela relação entre a resultante das forças que resistem ao escorregamento e a resultante das forças solicitantes ou que favorecem o movimento, conforme descrito na equação 01.

$$F_s = \frac{\text{Forças resistentes}}{\text{Forças solicitantes}} = \frac{\tau_F}{\tau_{mob}} \quad (\text{Equação 2})$$

De acordo com a equação acima, o talude está em equilíbrio quando o valor do Fator de Segurança (FS) é maior que 1. Por outro lado, quando o FS é menor que 1, ocorre a ruptura. Assim sendo, a ruptura é caracterizada pelo deslizamento de uma massa de solo ao longo de uma superfície definida. Essa ruptura pode acontecer por meio de diversos mecanismos e modos diferentes, tais como quedas de blocos, deslizamentos, tombamentos e corridas.

Destarte, os métodos de equilíbrio limite empregados nas análises de estabilidade de taludes têm como fundamento a determinação do equilíbrio de uma massa de solo ativa, tratada como um corpo rígido prestes a iniciar um movimento em massa. Esse movimento pode ser

delimitado por uma superfície de ruptura com forma circular, poligonal ou de qualquer outra geometria (MAKABAYI et al., 2021)

Em termos gerais, os métodos de equilíbrio limite buscam fundamento no método das fatias. Tal método analisa uma região de solo delimitada pela superfície de ruptura e a divide dividida em várias fatias verticais. Neste intento, as equações de equilíbrio são aplicadas a cada fatia, isoladamente.

Dito isto, ao analisar as equações de estática e resistência ao cisalhamento disponíveis, percebe-se que o problema é estaticamente indeterminado, ou seja, o número de incógnitas é maior do que o número de equações. Para resolver essa questão, foram propostas algumas simplificações que ajudam a reduzir o número de incógnitas. Essas simplificações são essencialmente as principais diferenças entre os métodos de análise de estabilidade pelo Métodos de Equilíbrio Limite (GERSCOVICH, 2012).

O método mais abrangente de equilíbrio limite foi criado por Morgenstern & Price (1965), tal procedimento leva em consideração todas as equações de equilíbrio e permite a utilização de qualquer superfície de ruptura. A fim de resolver o problema de maneira estática e não depender de relações constantes entre as forças e as fatias, como ocorre em outros métodos rigorosos, este método assume que a inclinação (θ) varia em função de uma determinada função.

$$T = \lambda f(x)E \quad (\text{Equação 3})$$

Ou

$$\text{tg}\theta = \frac{T}{E} \lambda f(x) \quad (\text{Equação 4})$$

A equação que calcula a força $E(x)$ entre as fatias pode ser obtida a partir da fórmula anterior, na qual λ é um parâmetro escalar determinado por meio do cálculo do fator de segurança e $f(x)$ exige uma avaliação prévia sobre a variação da inclinação das forças entre as fatias no talude. É importante lembrar que o equilíbrio das forças é mantido tanto na direção tangencial quanto na direção normal à base da fatia.

$$E(x) = \frac{1}{L+Kx} \left(E_i L + \frac{Nx^2}{2} + Px \right) \quad (\text{Equação 5})$$

Na qual:

$$L = \lambda k \left(\frac{tg\phi'}{FS} + A \right) \quad (\text{Equação 6})$$

$$L = 1 - \frac{Atg\phi'}{FS} + \lambda m \left(\frac{tg\phi'}{FS} \right) + A \quad (\text{Equação 7})$$

$$L = \frac{tg\phi'}{FS} (AWw + p - r(1 + A2)) + (-2Ww + pA) \quad (\text{Equação 8})$$

$$p = \frac{1}{FS} \{ (c - stg\phi')(1 + A2) + V_w Atg\phi' + qtg\phi' \} + (qA - Vw) \quad (\text{Equação 9})$$

Para o equilíbrio de momentos tem-se:

$$M(x) = E(yt - y) = M_{ew}(x) + \int_{x_0}^x (\lambda f - dydx) Edx \quad (\text{Equação 10})$$

$$M_{ew}(x) = \int_{x_0}^x \left(-P_w \frac{dy}{dx} \right) dx + (P_w(y - h)) \quad (\text{Equação 11})$$

Para aplicar o método de Morgenstern e Price, faz-se necessário realizar uma solução iterativa, na qual a distribuição de forças entre as fatias deve ser previamente definida e os valores para FS e λ devem ser assumidos, a fim de calcular E(x) e M(x) para cada fatia. Esse processo iterativo é repetido até que as condições de contorno sejam atendidas. A Figura 4 apresenta os esforços na fatia para esse método.

Na qual:

dW = Peso da fatia;

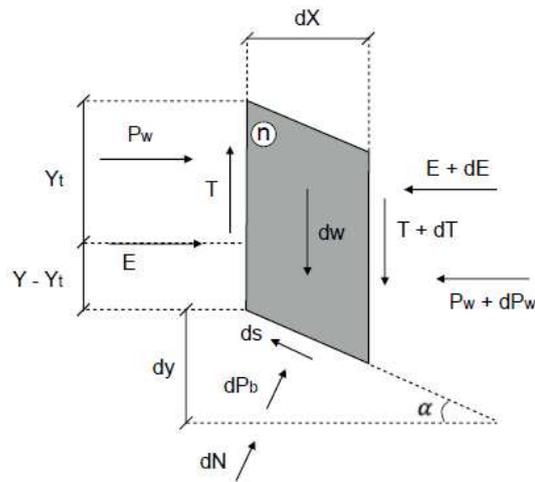
Pw = Poropressão no contorno entre fatias;

dP_b = Resultante da poropressão na base da fatia

E e T = Esforços entre fatias atuando em (y - yt);

ds = Resistência da base.

Figura 4 - Apresentação dos diferentes tipos de escorregamento.



Fonte: Esforços na fatia n - método de Morgenstern e Price (Gerscovich, 2012).

2.7 Parâmetros do solo

A aquisição dos parâmetros do solo, como o ângulo de atrito e a coesão, é essencial para o projeto e a construção de estruturas de engenharia civil, tais como fundações, estradas, barragens e pontes. Esses parâmetros são determinados através de ensaios de laboratório e de campo, que visam a caracterização das propriedades físicas e mecânicas do solo (MARINHO,1994).

Um dos ensaios mais comuns para a determinação dos parâmetros do solo é o ensaio de cisalhamento direto, que consiste em aplicar uma carga perpendicular à superfície do solo e medir a força necessária para cortá-lo. A partir desses dados, é possível calcular o ângulo de atrito e a coesão do solo, que indicam a resistência do material à deformação e à ruptura (GUSMÃO FILHO, 1986).

Além do ensaio de cisalhamento direto, outros ensaios são utilizados para a obtenção dos parâmetros do solo, como o ensaio de compressão simples, o ensaio de triaxial e o ensaio de palheta. Cada um desses ensaios apresenta vantagens e limitações, devendo ser selecionado de acordo com as características do solo e do objetivo em questão.

Assim sendo, para a obtenção dos parâmetros do solo através de ensaios de campo, são utilizados equipamentos como o cone de penetração, o penetrômetro dinâmico e o ensaio de placa. Esses ensaios são realizados *in situ* e permitem a caracterização das propriedades do solo em condições próximas às reais (LIMA,2008).

A aquisição dos parâmetros do solo é um processo complexo e essencial para o projeto e a construção de estruturas de engenharia civil. A escolha dos ensaios e dos equipamentos deve

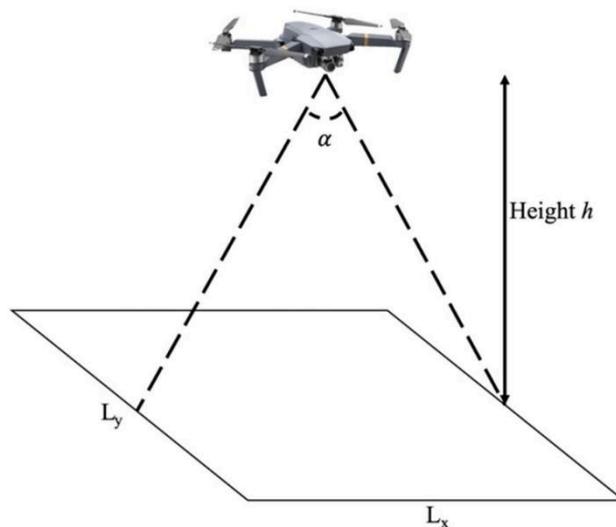
ser feita com cuidado e de acordo com as características do solo e do projeto em questão, para que os resultados obtidos sejam confiáveis e precisos. A revisão bibliográfica é uma etapa importante nesse processo, pois permite o conhecimento das técnicas e metodologias disponíveis na literatura científica e sua adequação às necessidades do projeto.

2.8 Drones e suas aplicações

Nos últimos anos, com o avanço da tecnologia relacionada às câmeras digitais, computadores e veículos aéreos não tripulados (VANTs), houve a simplificação na obtenção de imagens e seu posterior processamento. A partir da década de 90, com a modernização de câmeras fotográficas digitais, desenvolveu-se a fotogrametria digital, subordinada a computadores com capacidade de processamento mais elevada. Com esta tecnologia, as imagens digitais estão sendo em *softwares* específicos até os dias de hoje.

Segundo Thoeni *et al.* (2014), as principais fases da fotogrametria estão ligadas com invenções tecnológicas, como a fotografia, aviões e computadores. A Figura 5 mostra a área projetada na realização de voo para fotogrametria.

Figura 5 - Área projetada por uma câmera com o ângulo de visão α voando na altitude h (área do solo que é visível através da câmera em uma determinada posição e orientação).



Fonte: Lee & Choi, 2014.

A fotogrametria é uma técnica que permite a geração de modelos 3D, a partir de uma série de fotografias sobrepostas. O advento do conceito de "estrutura a partir do movimento" e a ampla disponibilidade dos VANTs melhoraram consideravelmente o uso dessa tecnologia. A

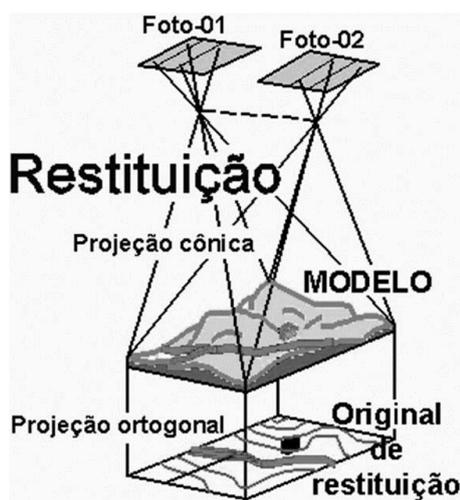
estrutura do movimento envolve várias etapas de processamento que permitem calcular um conjunto abrangente de pontos de superfície 3D, que são combinados com uma descrição da superfície em estilo fotorrealista, como uma malha. Durante a geração do modelo 3D, os desvios geométricos, como distorção da lente, são compensados devido à disponibilidade de informações redundantes (Bar *et al*, 2020).

Essa capacidade de auto calibração torna os algoritmos modernos de fotogrametria capazes de produzir modelos 3D precisos a partir de câmeras de baixa qualidade. Isso significa que até mesmo drones de baixo custo e prontos para uso podem ser utilizados para gerar modelos 3D com alta precisão suficiente.

2.9 Fotogrametria

De acordo com Heipke (1995), a fotogrametria digital é uma tecnologia utilizada para obter parâmetros geométricos de um objeto em um ambiente tridimensional a partir de imagens digitais planas. Na conjectura de Fernandes (2010), a reconstrução do espaço tridimensional é possível graças ao fenômeno da visão estereoscópica, que ocorre quando duas imagens bidimensionais são sobrepostas e capturadas a partir de pontos diferentes. Essa combinação de imagens é conhecida como par estereoscópico (Figura 6).

Figura 6 - Ilustração da visão estereoscópica.



Fonte: Mendonca, 2014.

De um modo geral, a fotogrametria pode ser entendida como a técnica científica de obtenção de informações precisas por meio de imagens adquiridas por sensores, e sua aplicação

na engenharia geotécnica pode ser rastreada desde o início da década de 1960. Conforme Viana (2015), a técnica tornou-se limitada e pouco disseminada devido ao processo de obtenção de dados ser oneroso e apresentar restrições.

De acordo com o estudo de Coelho e Brito (2007), a fotogrametria com drones tem várias vantagens em relação às técnicas tradicionais de geotécnica. Em primeiro lugar, ela permite a coleta de dados em áreas de difícil acesso, como encostas íngremes, sem a necessidade de equipamentos pesados ou perigosos para os trabalhadores. Em segundo lugar, a técnica é capaz de gerar informações de alta precisão e resolução, permitindo uma melhor caracterização do terreno e detecção de falhas e discontinuidades no solo.

Além disso, a fotogrametria com drones é uma técnica não invasiva, o que significa que não causa danos ao meio ambiente e à estrutura geológica da área estudada. A aplicação da fotogrametria com drones na geotecnia pode ser utilizada em diversas áreas, como a investigação geotécnica, o monitoramento de movimentos de massa (Bar *et al*, 2020).

A fotogrametria é uma técnica de coleta de dados por meio de imagens. Ela pode ser realizada por satélites, aviões e drones, sendo essa última opção a mais acessível e de fácil manuseio. Na geotecnia, a fotogrametria com drones tem sido amplamente utilizada como uma ferramenta de coleta de dados, que permite um levantamento rápido e eficiente do terreno, resultando em informações precisas e detalhadas (Snavely, 2008).

O uso da fotogrametria com drones na geotecnia tem como objetivo fornecer informações que ajudem a planejar, projetar e monitorar obras de engenharia civil. Com a utilização dessa técnica, é possível coletar informações como a topografia, o volume do terreno e a localização de elementos geológicos importantes. Essas informações são essenciais para a tomada de decisões em projetos de construção civil, tais como a construção de estradas, pontes e edifícios.

A fotogrametria com drones é vantajosa por permitir a coleta de dados em locais de difícil acesso, como encostas íngremes, de forma segura e econômica. Essa técnica oferece alta resolução espacial e temporal, possibilitando a coleta de dados precisos em curtos períodos. Sua aplicação na geotecnia tem se tornado cada vez mais comum, proporcionando informações detalhadas para projetos de construção civil, o que resulta em obras mais seguras e eficientes.

A ciência de obter informações 3D sobre objetos do mundo físico a partir de suas fotografias digitais é chamada de fotogrametria. Relações matemáticas para planejamento de voo e estimativa de parâmetros de voo para tirar fotos sobrepostas de uma área são discutidas na literatura (Suziedelyte, 2016).

A fotogrametria tem sido uma abordagem fundamental para gerar modelos 3D necessários a partir de imagens sobrepostas em muitas aplicações. Uma metodologia para gerar um ortomosaico de alta resolução e a utilização de pontos de controle.

Pontos de controle em um levantamento topográfico é uma técnica utilizada para obter informações precisas sobre as características físicas e geográficas de um terreno. Nos últimos anos, o uso de drones na realização de levantamentos topográficos tem se tornado cada vez mais comum. Os drones oferecem uma série de vantagens, como a rapidez na coleta de dados, a precisão das informações obtidas e a segurança dos operadores (DIAS, 2021).

Destarte, para garantir a eficácia do levantamento com drone, é necessário seguir uma série de procedimentos e demarcações que permitam a obtenção de dados precisos e confiáveis. Nesse sentido, a demarcação dos pontos de controle é um dos aspectos mais importantes do processo. Os pontos de controle são pontos físicos no terreno que servem como referência para o drone durante o voo.

A demarcação desses pontos deve ser feita com precisão e cuidado para que as informações coletadas pelo drone sejam confiáveis. Para isso, é necessário utilizar equipamentos de medição precisos, como receptores GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) e estações totais. Além disso, é importante que os pontos de controle sejam escolhidos de forma estratégica, de acordo com as necessidades específicas do levantamento.

Ao seguir essas orientações, é possível realizar um levantamento topográfico com drone de forma eficiente e precisa, garantindo informações confiáveis e úteis para uma ampla gama de aplicações, como planejamento urbano, construção civil, agricultura de precisão, monitoramento ambiental, entre outros.

2.10 Os modelos digitais (MDT e MDE)

A representação de dados topográficos, anteriormente baseada exclusivamente em curvas de nível, deu lugar a novas abordagens de interpretação da superfície do terreno, como os Modelos Digitais de Terreno (MDT) e os Modelos Digitais de Elevação (MDE). Segundo Felicísimo (1994), essas abordagens simplificam a realidade, retratando apenas alguns atributos do objeto ou sistema original.

Diferenciar os termos MDT e MDE é de extrema importância, uma vez que cada modelo possui um propósito específico, apesar de compartilharem estruturas semelhantes e de terem como objetivo criar uma representação numérica da altimetria de um terreno.

Conforme com Oliveira et al. (2012), o MDT tem como objetivo representar superfícies contínuas de maneira discreta, utilizando uma quantidade finita de dados. Essas superfícies são caracterizadas por uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre em uma região da superfície terrestre.

Os estudos de Oliveira et al. (2012) exemplificam o MDE como um método que representa todos os tipos de dados altimétricos da superfície, incluindo elementos como vegetação, edificações e feições antrópicas. Além disso, eles afirmam que o MDT é um método específico dentro do MDE, que retrata apenas os elementos topográficos do terreno, ou seja, o solo.

De acordo com Ferreira (2014), a demanda por esses modelos tem aumentado, especialmente para contribuir com estudos de planejamento urbano e ambiental. Ademais, Garcia & Zêzere (2012) reforçam a importância dos MDE na avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa, tanto diretamente por meio dos dados de altitude, como indiretamente, uma vez que certos fatores derivados da altitude podem contribuir para a ocorrência desses movimentos.

A Modelagem Digital de Elevação (MDE) é um método que consiste em representar os dados altimétricos da superfície terrestre, levando em consideração elementos como vegetação e construções humanas. Por outro lado, o Modelos Digital de Terreno (MDT) refere-se a um tipo específico de MDE, que retrata apenas os elementos topográficos do terreno, ou seja, o solo.

2.11 Modelagem Digital de Elevação

A estruturação e armazenamento dos Modelos Digitais de Elevação (MDE) variam de acordo com a metodologia utilizada. Historicamente, esses modelos foram divididos em dois grupos principais, dependendo da forma de representação dos dados: Vetorial e Raster (conforme descrito na Tabela 7). O modelo vetorial é baseado principalmente em pontos e linhas definidas por suas coordenadas, enquanto nos modelos Raster, os dados são analisados como a média de altitudes das unidades de superfície, que são diferentes de zero, dividindo uniformemente o terreno, sem sobreposição e cobrindo completamente a área (Felicísimo, 1994).

Tabela 7 - Resumo das estruturas utilizadas para o armazenamento de (MDE)

Vetorial	Contorno	Sequencial: linhas armazenadas como cotas de nível
		Analítica: linhas armazenadas como segmentos de Bézier, polinomiais etc.
	Perfil	Cadeias paralelas de linhas de cotas com altura variável.
	Triangulação	Rede de Triângulos Irregulares.
Raster	Matrizes	Regulares: cotas sobre uma malha quadrada de filas e colunas equidistantes.
		Escalonáveis: cotas sobre sub matrizes hierárquicas e de resolução variável
	Polígonos	Cotas atribuídas às células poligonais regulares (triângulos ou hexágonos)

Fonte: Adaptado de Felicísimo, 1994.

Durante o processo de amostragem, são obtidos dados que representam fenômenos, como curvas de nível e pontos tridimensionais, que são interpolados para a geração do modelo. Essa etapa é complexa, pois quaisquer erros que ocorram podem se propagar para as etapas subsequentes (Felgueiras & Câmara, 2001).

Ademais, Viviani (2005) enfatiza a importância da criação de um modelo digital em forma de grade para reproduzir com precisão uma superfície real no computador. Essa criação é realizada por meio da coleta de dados de uma rede de pontos. Existem várias metodologias para obter esses dados, incluindo pesquisa de campo, digitalização de mapas, fotogrametria utilizando informações de receptores GPS e satélites. Por sua vez, Felicísimo (1994) classifica esses métodos de acordo com o modo de aquisição das amostras, distinguindo entre métodos diretos e indiretos (conforme apresentado na Tabela 8).

Tabela 8 - Métodos de aquisição de dados para a construção de Modelos Digitais de Elevação.

	Altimetria	Fotogrametria
Diretos	GPS	Sistema de localização orbital
	Topografia	estações totais e níveis
Indiretos	Restituição	Origem digital: Imagens digitais captadas via satélite ou de sistemas aerotransportáveis.
		Origem analógica: pares de fotografias estereoscópicas
	Digitalização	Manual: por mesas digitalizadoras Automática: por scanners

Fonte: Adaptado de Felicísimo, 1994.

De acordo com Felgueiras & Câmara (2001), a modelagem se baseia na construção de estruturas de dados e na definição de superfícies de ajuste, com o objetivo de obter uma representação contínua do fenômeno estudado na área, permitindo a manipulação do modelo. Por fim, o processo de aplicação envolve a utilização do modelo e a extração de informações relevantes provenientes dele. Essas informações podem ser aplicadas de forma quantitativa, como cálculos topográficos, ou qualitativa, como a visualização de modelos em 3D.

Os modelos digitais de elevação são vastamente utilizados no estudo comparativo de grandes áreas para monitoramento de queimadas, ocupação urbana, áreas agrícolas, monitoramentos ambientais, entre outros. Já os resultados no monitoramento de pequenas áreas não são tão usuais, devido à baixa resolução dos satélites e a distância entre a área de estudo e os sensores que possibilitam baixo ângulo de visão e, conseqüentemente, erro alto no eixo z.

Com o surgimento do veículo aéreo não tripulado (VANT), a resolução dos modelos digitais melhorou e possibilitou a análise de áreas menores. Contudo, com maiores detalhes, a construção de séries temporais de modelos gerados com drones destinados ao monitoramento de uma área ainda é pouco comum (SOUZA, 2018).

2.12 Descrição geral do Município de Areia

O estudo foi conduzido no município de Areia, localizado na Paraíba, que se encontra na Mesorregião do Agreste Paraibano, inserido na Microregião do Brejo. Está situado a uma distância de 122,5 km da capital do estado, João Pessoa. A cidade está posicionada sobre a serra da Borborema (conforme Figuras 7 e 8).

Neste contexto, no século XX, o município passou por uma significativa transformação na sua morfologia tradicional devido à instalação da Usina Santa Maria. Essa instalação resultou na migração de moradores rurais para a cidade e na ocupação caótica das áreas urbanas, incluindo encostas, vales e margens de rios (Lira, 2022), um processo prejudicial que contribuiu para a ampliação dos riscos associados a deslizamentos de terra na região.

Figura 7 - Localização do Município de Areia

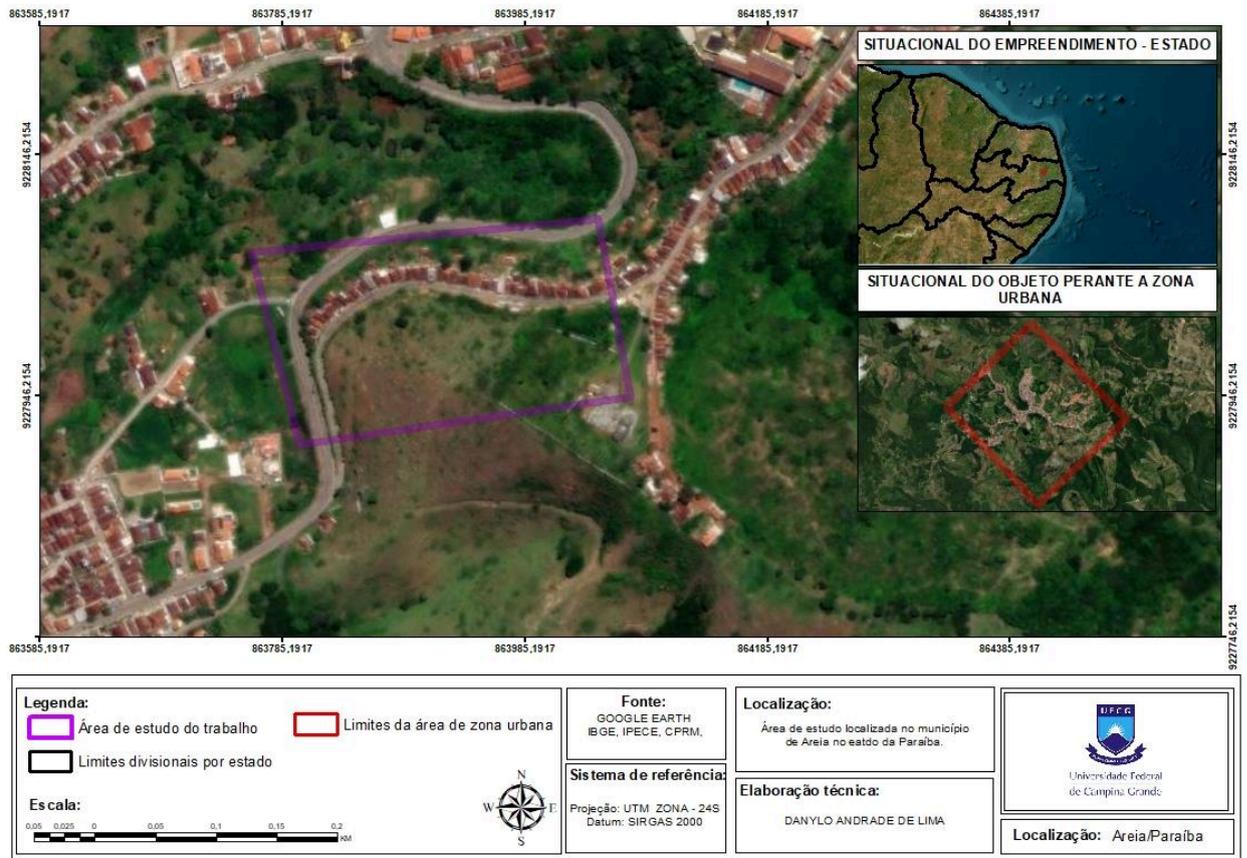


Fonte: LIRA, 2022.

A cidade possui uma localização geográfica cercada pelos municípios de Alagoa Grande, Alagoa Nova, Alagoinha, Pilões, Remígio, Serraria e Arara, ocupando uma área total de 269,130 km² com uma população é de 22.633 habitantes. De acordo com o último censo realizado em 2022. A densidade demográfica é estimada em 84,10 habitantes por quilômetro quadrado, conforme dados do IBGE em 2022.

De acordo com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2015) identificou quatro áreas de risco de deslizamentos de massa na área urbana do município de Areia-PB. O presente estudo teve como foco uma destas quatro áreas, que se trata do talude localizado na Rua João Lourenço (Figuras 9). Na área indicada, constata-se a presença de 41 residências ao longo da base talude, o que representa risco para as famílias que residem no local, em caso de um eventual movimento de massa.

Figura 8 - Mapa de situação talude da Rua João Lourenço



Fonte: Autor, 2023.

O município de Areia encontra-se dentro da unidade geoambiental conhecida como Planalto da Borborema. Essa região é caracterizada por apresentar maciços e colinas elevadas, com altitudes variando de 650 a 1.000 metros. Areia ocupa uma área em formato de arco que se estende do sul de Alagoas até o Rio Grande do Norte.

Figura 9 - Área onde ocorreu um movimento de massa na Rua João Lourenço

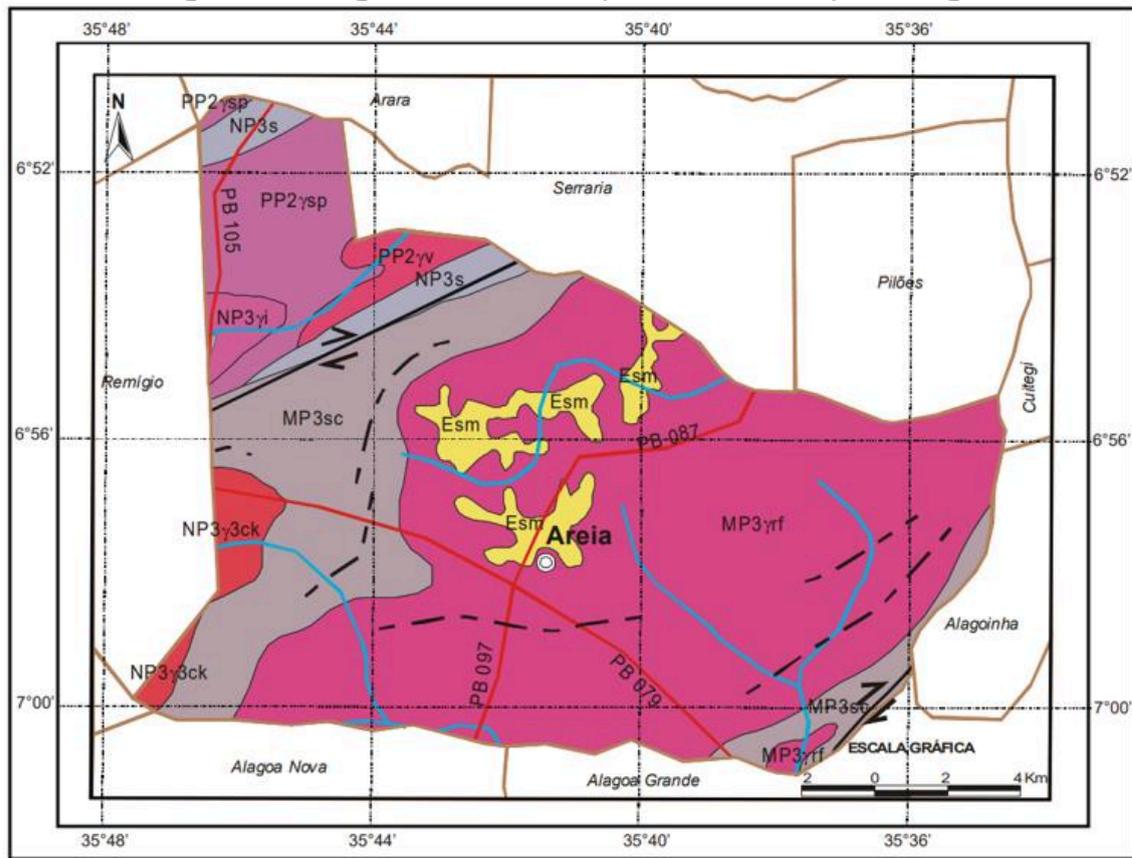


Fonte: Autor, 2023.

O relevo dessa região é geralmente complexo, com a presença de vales profundos e estreitos que foram esculpido pelo processo de erosão. Quanto à fertilidade do solo, ela é bastante diversificada, com uma certa predominância de níveis médios a altos segundo diagnóstico do município de Areia, feito pelo Ministério de Minas e Energia (2005). A Figura 10 apresenta o mapa geológico do município de Areia.

O clima é classificado como tropical chuvoso com um período de verão seco. A estação de chuvas tem início em janeiro/fevereiro e se estende até setembro, podendo se prolongar até outubro.

Figura 10 - Diagnóstico do município de Areia - Mapa Geológico



UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

Cenozóico

Esm Formação Serra dos Marins (sm): arenito médio a conglomerático

Neoproterozóico

NP3_γ3ck Suite calcialcalina de alto potássio Esperança (ck): monzonito a monzogranito (581 Ma U-Pb)

NP3_γi Granitóides indiscriminados: granito, granosiorito, monzogranito

NP3s Grupo Seridó (s): xisto, quartzito, mármore e rocha calcissilicática

Mesoproterozóico

MP3_γrf Suite granítica-migmatítica peraluminosa Recanto/Riacho do Forno: ortogneisse e migmatito granodiorítico a monzogranítico (1037 Ma U-Pb)

MP3sc Complexo São Caetano: gnaiss, megaurvaca, metavulcânica félsica a intermediária, metavulcânica (1089 Ma U-Pb)

Paleoproterozóico

PP2_γsp Complexo Santa Cruz: augen-gnaiss granítico, leuco-ortogneisse quartzo monzonítico a granítico (2069 Ma U-Pb)

PP2_γv Suite Várzea Alegre: ortogneisse tonalítico-granodiorítico e migmatito (2098 Ma U-Pb)

CONVENÇÕES GEOLÓGICAS

- Contato geológico
- Falha ou Zona de Cisalhamento Transcorrente Dextral
- Lineamentos estruturais (Traços de Superfícies)

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

- Sede Municipal
- Rodovias
- Limites Intermunicipais
- Rios e riachos

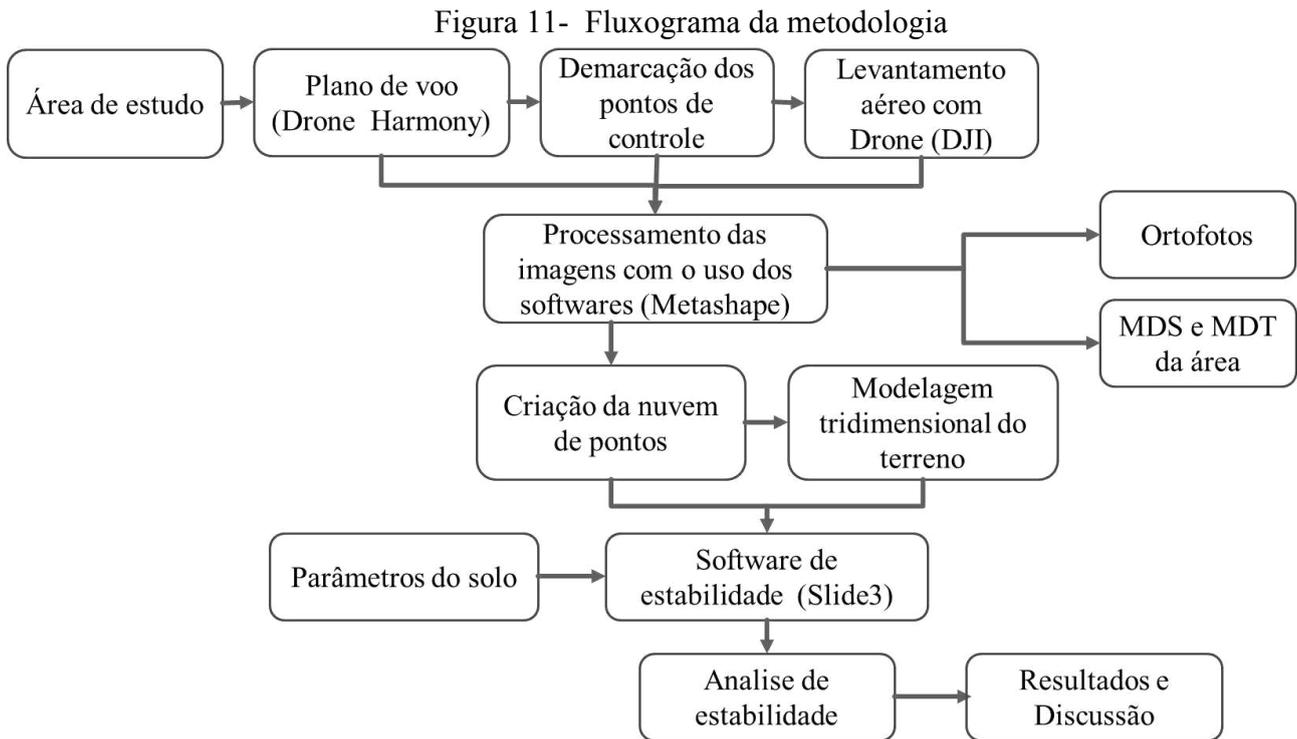
Fonte: Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea do estado de Paraíba Diagnóstico do município de Areia, 2005.

É importante ressaltar que a prevenção e mitigação de deslizamentos de terra dependem não apenas da atuação do poder público, mas, também, da conscientização e colaboração da população, evitando a ocupação de áreas de risco e adotando práticas de manejo e uso do solo adequadas às características locais.

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa foi dividida em três etapas: (1) delimitação da área de estudo e aquisição das imagens; (2) modelagem tridimensional dos taludes em estudo e; (3) Análise de estabilidade da área.

Na Figura 11 apresenta-se o fluxograma das etapas para o desenvolvimento da presente pesquisa.



Fonte: Autor, 2023.

3.1 Área de estudo

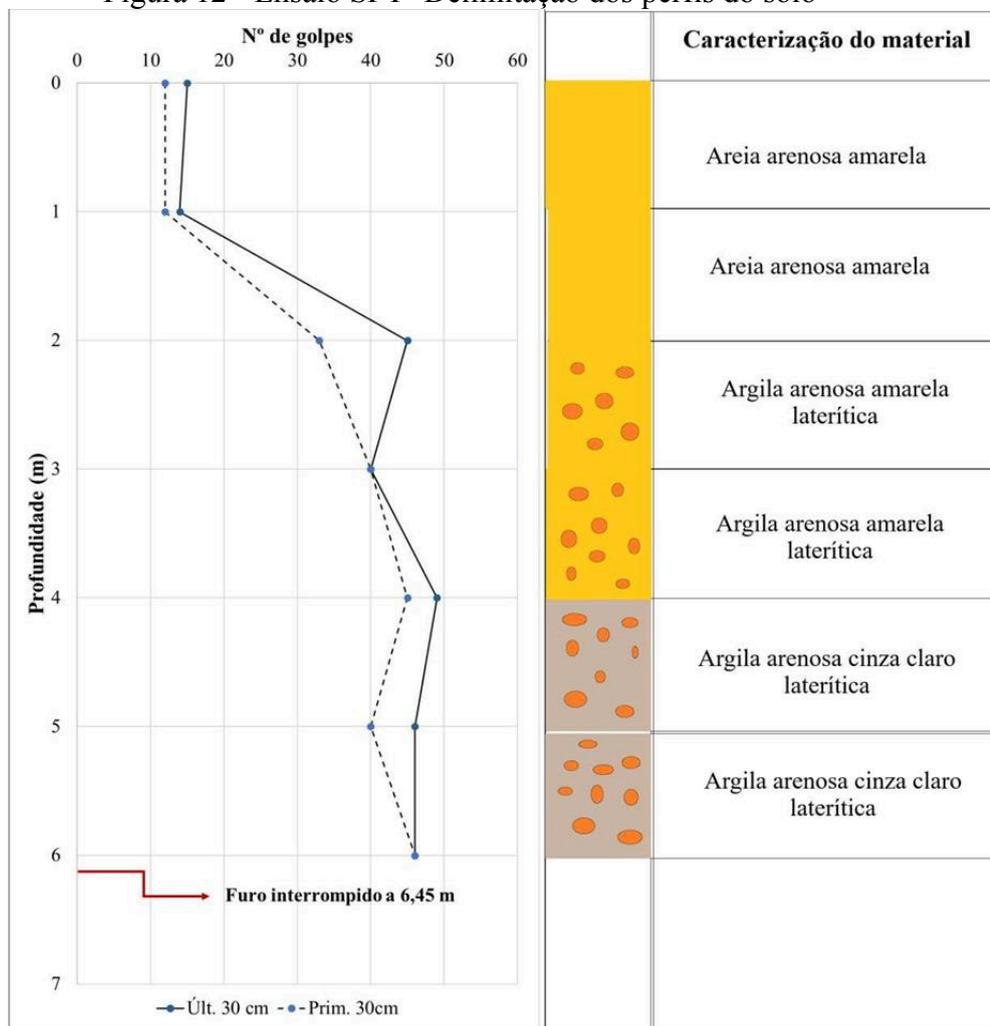
3.1.1 Delimitação da área e planejamento de voo

A delimitação da área de estudo é um processo fundamental em qualquer pesquisa ou estudo, pois permite definir os limites geográficos e temáticos do trabalho a ser realizado. No caso da cidade de Areia, localizada no estado da Paraíba, a delimitação da área de estudo foi realizada a partir do relatório da CPRM de 2015 e com base no trabalho de Sousa, (2020) e Lira, (2022) identificando o talude da rua João Lourenco como uma área suscetível a movimentos de massa.

Os furos de sondagem são utilizado delimitar as camadas e as propriedades dos materiais que compõem a encosta do talude, visando obter uma representação mais fiel do que existe no

campo. Para isso, foi utilizado o resultado de sondagem SPT realizado nos trabalhos de Souza (2020) e Lira (2022), como mostrado na Figura 12 a fim de determinar o perfil de solo do talude.

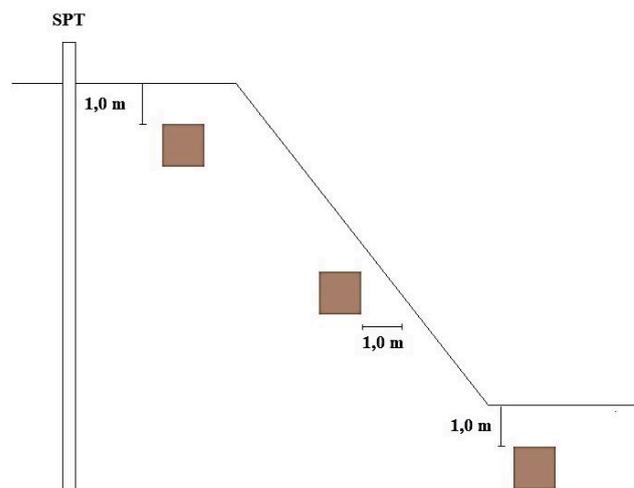
Figura 12 - Ensaio SPT -Delimitação dos perfis do solo



Fonte: LIRA, 2022.

Nos trabalhos de Souza (2020) e Lira (2022), foram realizados ensaios para caracterização geotécnica da área, para isso foram coletadas amostras de solo que representassem toda a extensão do talude. As amostras foram obtidas do topo, do centro e da base do talude em estudo. As amostras do topo foram retiradas a uma profundidade de 1 metro a partir da superfície, as amostras do centro foram coletadas exatamente na metade do talude e a cerca de 0,5 metros da parede do talude, e as amostras da base foram obtidas diretamente na base do talude. A Figura 13 ilustra de maneira geral o processo de coleta das amostras.

Figura 13 - Esquema de coleta e furo de sondagem



Fonte: Souza, (2020).

Com o intuito de facilitar a compreensão, os solos em análise serão categorizados usando as seguintes denominações, baseadas no nome da rua e na localização da amostra coletada, a letra final na sigla indica a seção do talude de onde a amostra foi coletada (Topo, Centro ou Base).

JLB: João Lourenço Base

JLC: João Lourenço Centro

JLT: João Lourenço Topo

A Tabela 9 apresenta os valores dos parâmetros do ensaio de cisalhamento direto para exemplificar o pior do cenário possível, considerando o solo submerso como mostrado na Tabela 10 temos os parâmetros de resistência dos solos JLB, JLC e JLT. Os parâmetros (c' e ϕ') foram calculados com base ensaio triaxial CIU, também foram utilizados os respectivos parâmetros foram obtidos pelas análises realizadas por Souza, (2020) e Lira, (2022).

Tabela 9 - Parâmetros Intercepto coesivo e ângulo de atrito dos solos no ensaio Cisalhamento direto

Solo		Ângulo de atrito ϕ (°)	Intercepto. Coesivo c' (kPa)	γ (kN/m ³)
JLT	Inundado	31,2	0	13,54
JLC	Inundado	32,4	0	15,13
JLB	Inundado	32,9	0	14,53

Fonte: Adaptado de Lira, 2022.

Tabela 10 - Parâmetros de resistência dos solos JLT, JLC e JLB no ensaio CIU

Solo	Ângulo de atrito $\phi(^{\circ})$	Intercepto. Coesivo c' (kPa)	γ (kN/m ³)
JLT	35,19	11	13,54
JLC	28,57	17	15,13
JLB	24,27	20	14,53

Fonte: Adaptado de Lira, 2022.

A Rua João Lourenço, com extensão de 427m, assim como outras áreas de Areia-PB, é suscetível a deslizamentos de terra devido à sua localização em uma região montanhosa e ao histórico de precipitações pluviométricas intensas na região.

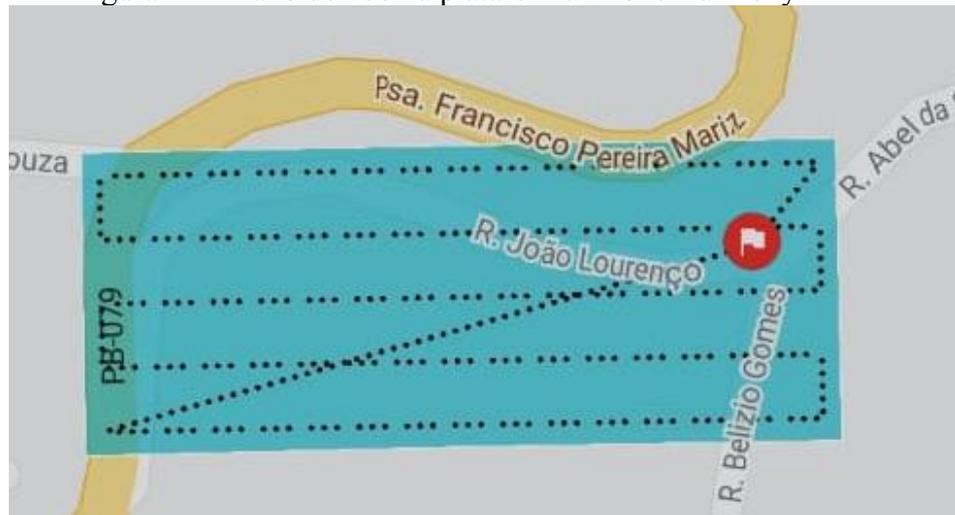
O planejamento de voo consistiu em determinar os parâmetros do levantamento como o traçado de voo, altitude, velocidade, sobreposição frontal e lateral e número de fotos da área para levantamento. Além disso, é imprescindível garantir a autonomia de bateria do drone, bem como identificar qualquer obstáculo que possa vir a ser um problema para o voo com drone para aquisição das fotografias, que são fundamentais para garantir a qualidade e eficiência do resultado.

Para o mapeamento foi utilizada a plataforma de voou autônomo *Drone Harmony* que auxilia na aquisição das imagens. Na Figura 14 está representado o plano de voo para aquisição das fotos, as quais foram processadas por software de fotogrametria para gerar modelos tridimensionais. Neste trabalho foi utilizado o software *Metashape*. A partir dos modelos gerados foi possível realizar as análises das declividades, volumes e dados da cobertura vegetal e morfologia das áreas em estudo.

Após a definição de todos os parâmetros necessários, foi estabelecido o planejamento do voo, conforme ilustrado na Figura 14. O trajeto do voo foi definido com uma velocidade de 15km/h e uma altitude de voo de 60m.

Além disso, foi necessário determinar o número de fotos que seriam capturadas durante o levantamento, uma vez que isso tem impacto direto na qualidade dos resultados obtidos e no tempo de execução do processo.

Figura 14 - Plano de voo na plataforma Drone Harmony



Fonte: Plataforma Drone Harmony, 2023.

3.1.2 Demarcação dos pontos de controle

A metodologia de demarcação dos pontos de controle para levantamento com drone é um processo fundamental para se atingir uma boa acurácia e a qualidade dos dados coletados. Os pontos de controle são marcos físicos ou referenciais geográficos que servem como base para a georreferenciação das imagens capturadas pelo drone. Para realizar essa demarcação, foram empregados equipamentos como receptores do sistema global de navegação por satélite GNSS (Global Navigation Satellite System) de alta precisão, com a técnica do RTK (Real-Time Kinematic).

Para alcançar resultados mais consistentes, é indicado o uso de 20 a 30 pontos de controle para cada km² da área de estudo. Assim, deve-se calcular o número de pontos de controle, sendo crucial que esses pontos de controle devam ser feitos com um GPS RTK para atingir a precisão necessária (Figura 15).

Figura 15 - Demarcação dos pontos de controle.



Fonte: Autor, 2023.

Em primeiro plano, é realizada uma análise da área de interesse, levando em consideração os requisitos do projeto e a densidade ideal de pontos de controle. Em seguida, são selecionados os pontos que serão demarcados. Neste estudo, foram utilizados 5 pontos de controle distribuídos ao longo da base do talude. Levando em conta a distribuição espacial e a acessibilidade para a marcação. Foram escolhidos alvos com cores distintas para facilitar a visualização nas imagens aéreas. Após a demarcação dos pontos de controle, faz-se necessário coletar as respectivas coordenadas com o uso de um GPS de alta precisão. Neste trabalho foram utilizados Equipamentos BASE: GNSS SOUTH S86S e ROVER: CHC U900X como mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Base GPS RTK, GNSS South S86S



Fonte: Autor, 2023.

Foram estabelecidos pontos de controle ao longo da base do talude na área de estudo, os quais foram aferidos pela empresa Geosuperfície Serviços Topográficos & Projetos Agrícolas Solânea – Paraíba, com o auxílio de GNSS RTK, conforme apresentado no relatório de pontos da Tabela 8. Esses pontos de controle possuem coordenadas georreferenciadas, que são utilizadas para aumentar a acurácia dos resultados obtidos e permitir a correta localização das imagens utilizadas na análise.

Tabela 11 - Relatório com as coordenadas dos pontos de controle obtidos pelo levantamento com RTK GNSS

Sumário de pontos				
Pontos	Malha Norte (m)	Malha Este (m)	Elevação (m)	Tempo de rastreo
P01	9228448,788	201037,335	596,120	4h06m
P02	9228435,540	200981,825	590,127	0h30m
P03	9228443,257	200936,668	584,791	0h30m
P04	9228451,117	200855,839	575,596	0h30m
P05	9228438,282	200811,108	568,427	0h30m

Observações GPS					
Pontos	dN (m)	dE (m)	dZ (m)	Horz.RMS (m)	Vert.RMS (m)
P01-P02	-13,248	-55,510	-5,993	0,008	0,016
P01-P03	-5,531	-100,667	-11,329	0,006	0,012
P01-P04	2,328	-181,496	-20,524	0,004	0,005
P01-P05	-10,506	-226,227	-27,693	0,008	0,011

Fonte: Geosuperfície Serviços Topográficos, 2023.

A Tabela 8 fornece as coordenadas geográficas dos pontos de controle em coordenadas UTM, bem como o tempo de rastreamento associado a cada ponto. Além disso, na seção de Observações GPS, é possível identificar os erros verticais e horizontais atribuídos a cada um dos pontos. Essas informações são importantes para avaliar a qualidade e a precisão dos dados obtidos por meio do GPS.

3.1.3 Levantamento aéreo

Para realizar o levantamento, inicialmente se fez necessário verificar as regulamentações locais e restrições de voo de drones na área. O próximo passo foi realizar a inspeção pré-voo: antes de cada voo, foi feita uma verificação cuidadosa do drone, da bateria, dos sistemas de comunicação, dos sensores e de outros componentes, para ter certeza de seu efetivo estado de funcionamento.

Para este levantamento, foi utilizada a técnica de voo autônomo para aquisição das imagens a partir do plano de voo feito anteriormente na plataforma do *Drone Harmony*. O drone usado neste trabalho foi o Mavic Mini 2 da DJI, que possui um sensor CMOS de 1/2,3 pol de 12 MP com um gimbal motorizado de 3 eixos acoplada ao drone. Este drone é o um dos modelos de entrada da DJI e possui suporte para as aferramentos e aplicações de levantamento. (Figura 17).

Figura 17 - Drone DJI Mavic Mini 2.



Fonte: Autor, 2023.

Após a conclusão de todos os preparativos prévios ao voo, foi realizado o procedimento de calibração dos eixos de referência da aeronave. Em seguida, o drone foi decolado para capturar as imagens das áreas de interesse. As fotografias foram obtidas em posições específicas de latitude, longitude e altitude, conforme mostrado na Figura 18, com o objetivo de garantir uma sobreposição de imagens de 85%, conforme planejado anteriormente. Todas as imagens foram armazenadas em um cartão de memória que estava acoplado ao drone.

Figura 18 – Dados das imagens do levantamento



Fonte: Autor, 2023.

3.1.4 Processamento dos dados

Após a aquisição das imagens, essas foram carregadas num software de modelagem tridimensional chamado *Agisoft Metashape*, com a finalidade de gerar o modelo 3D da área de estudo. O processo envolve fazer fotografias sobrepostas de objetos, estrutura ou área de estudo e convertê-las em modelos digitais 3D.

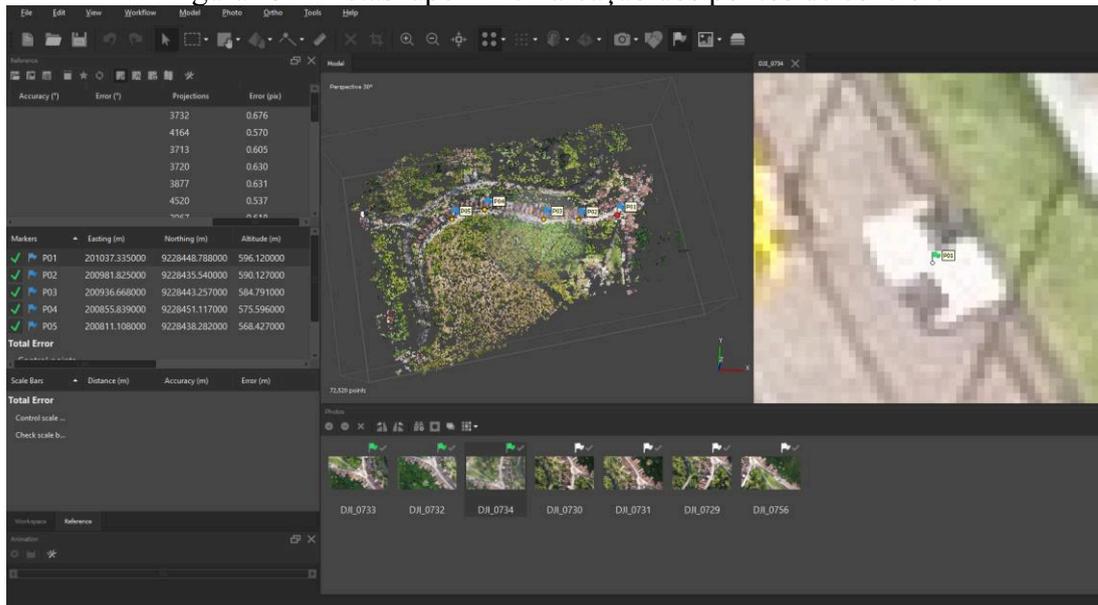
As imagens foram importadas para o software *Metashape*, uma ferramenta especializada em processamento de imagens e reconstrução 3D. A primeira etapa consiste na calibração das imagens, na qual os parâmetros intrínsecos e extrínsecos do sensor e das imagens são estimados. Isso inclui a determinação da distância focal, distorções ópticas, resolução e orientação espacial das imagens em relação ao sistema de coordenadas. Por isso, é imprescindível a conversão do sistema de coordenadas.

Os equipamentos da DJI, em sua grande maioria, têm como configuração padrão o sistema de coordenadas WGS 84. Assim, após carregar as imagens, se faz a conversão para o sistema Sirgas 2000 UTM, zona 25, para compatibilizar as informações com os dados do RTK.

Após a aquisição das imagens e a devida referenciação do sistema de coordenadas, a etapa seguinte consiste na identificação dos pontos de controle, por meio da ferramenta de inserção manual. Esses pontos de controle são selecionados e inseridos manualmente em todas as imagens do levantamento, analisando-se os marcadores identificados em campo e visíveis nas imagens aéreas. Esse processo é essencial para o levantamento, uma vez que permite a correção de possíveis distorções e erros nos dados coletados.

A identificação dos pontos de controle é realizada de forma minuciosa em todas as imagens, assegurando uma base sólida para a posterior análise e processamento dos dados obtidos (Figura 19).

Figura 19 - Metashape – Demarcação dos pontos de controle

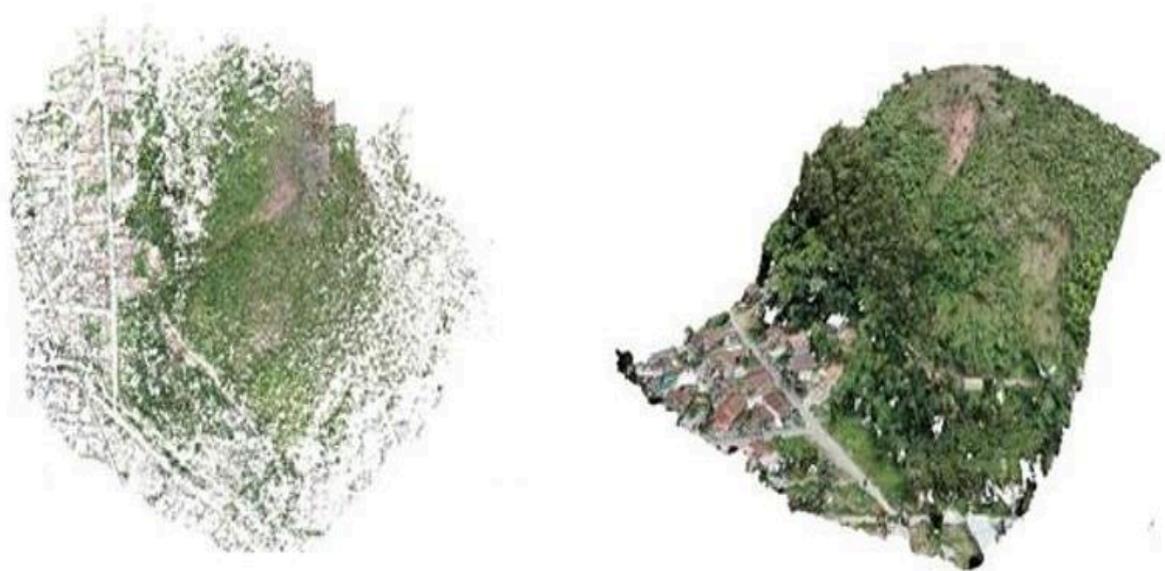


Fonte: Autor, 2023.

Após a demarcação dos pontos de controle, procede-se ao processamento da nuvem esparsa, verificando o alinhamento dos pontos, limpeza dos pontos desalinhados e realizando uma avaliação inicial da nuvem de pontos. Após essa verificação da nuvem esparsa, é feito o processamento da nuvem densa de pontos, que envolve a aplicação de uma metodologia de triangulação para densificar a nuvem.

Como mostrado na Figura 20, apresenta-se um exemplo de nuvem espaçadas e nuvem densa de pontos.

Figura 20 – Ilustração: nuvem espaçadas e nuvem densa de pontos



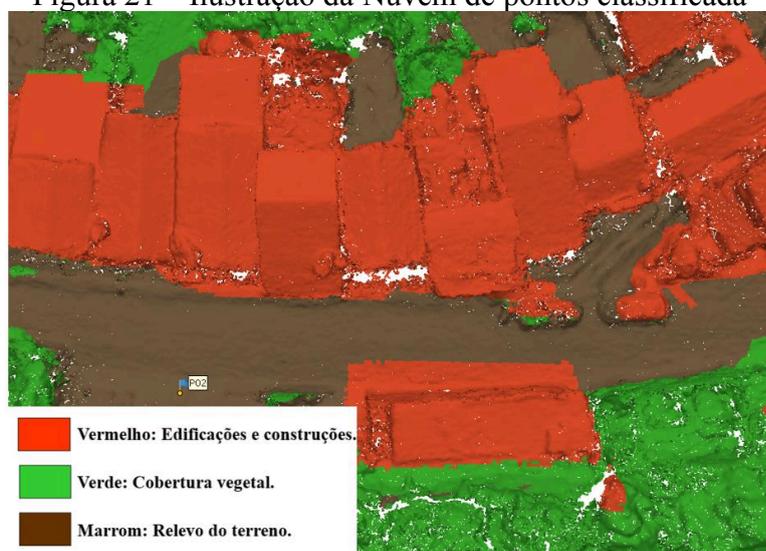
Fonte: Mapa, <https://mapa.ag/blog/nuvem-de-pontos-o-que-e-como-obter-e-onde-usar/-2020>

3.1.5 Aquisição dos modelos

Por meio dessa nuvem densa de pontos, é possível realizar a classificação dos pontos de acordo com sua origem nas imagens. Neste trabalho, foram realizadas classificações relacionadas às construções e edificações civis, bem como à vegetação presente no terreno (Figura 21).

A ferramenta de classificação semiautomática opera de acordo com o seguinte processo: inicialmente, é realizada uma varredura automática dos pontos gerados em sua totalidade, o que permite uma classificação geral das diferentes áreas, como terreno natural e outras classes. Com base nessas classificações iniciais. Em seguida, o usuário assume a tarefa de classificação manual, revisando a classificação inicial e realizando ajustes específicos. Nessa etapa, ocorre a classificação precisa da vegetação e das edificações, levando em consideração características visuais e conhecimento do ambiente. Essa abordagem manual proporciona uma maior precisão na classificação dessas categorias, considerando nuances e detalhes que podem não ser capturados pela classificação automática.

Figura 21 – Ilustração da Nuvem de pontos classificada



Fonte: Autor, 2023.

A partir dessa classificação, é possível gerar o Modelo Digital de Terreno (MDT) e o Modelo Digital de Elevação (MDE). Esses modelos são fundamentais para a análise e representação do terreno, permitindo a visualização e extração de informações relevantes, como a topografia, as altitudes e a cobertura vegetal. O MDT representa a superfície do terreno, enquanto o MDE inclui objetos e estruturas presentes no terreno, como edifícios e vegetação.

Esses modelos são amplamente utilizados em estudos geotécnicos, planejamento urbano, análise ambiental e outras aplicações relacionadas à caracterização do terreno.

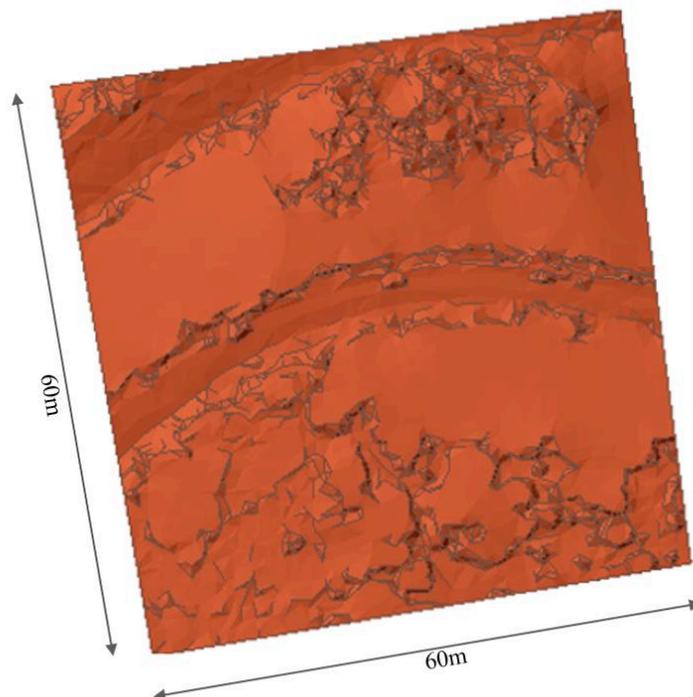
3.2 Análise de estabilidade

3.2.1 Compatibilização da superfície de estudo

O levantamento da área completa apresenta-se com cerca de 52.000 m². Para a análise de estabilidade, foi selecionado um recorte específico da área de estudo. O recorte escolhido contempla a área onde foi se dispunha de dados geotécnicos dos trabalhos de Sousa (2020) e Lira (2022). Essa área é próxima ao ponto de controle 4.

Assim sendo, neste estudo foi adotada uma distância de 30 metros para cada lado do ponto de sondagem para a delimitação da área de estudo. Essa escolha foi baseada em uma revisão bibliográfica que considerou trabalhos anteriores (LIRA, 2022) e sua abordagem em relação à definição da área de referência para as camadas do SPT. Na Figura 22, observa-se o recorte da área para análise de estabilidade.

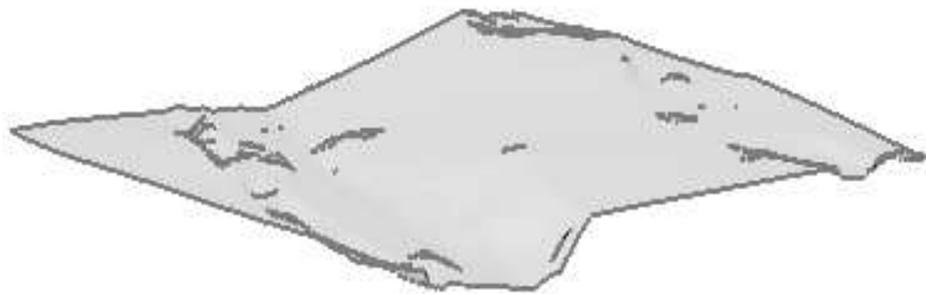
Figura 22 - Delimitação da área para análise de estabilidade



Fonte: Autor, 2023.

Após a delimitação da área de estudo e a triangulação do Modelo Digital do Terreno (MDT), realiza-se a importação dos dados no *software* de análise de estabilidade. Nesse processo, foi necessária uma triangulação prévia, que envolve a simplificação da geometria formada a partir do *software* de fotogrametria. Essa simplificação tem como objetivo corrigir eventuais falhas ou defeitos presentes na modelagem fotogramétrica, garantindo uma representação mais confiável do terreno. Na Figura 23 observa-se a superfície do MDT importada para o software de estabilidade *Slide 3*.

Figura 23 - Superfície topográfica da área de estudo



Fonte: Autor, 2023.

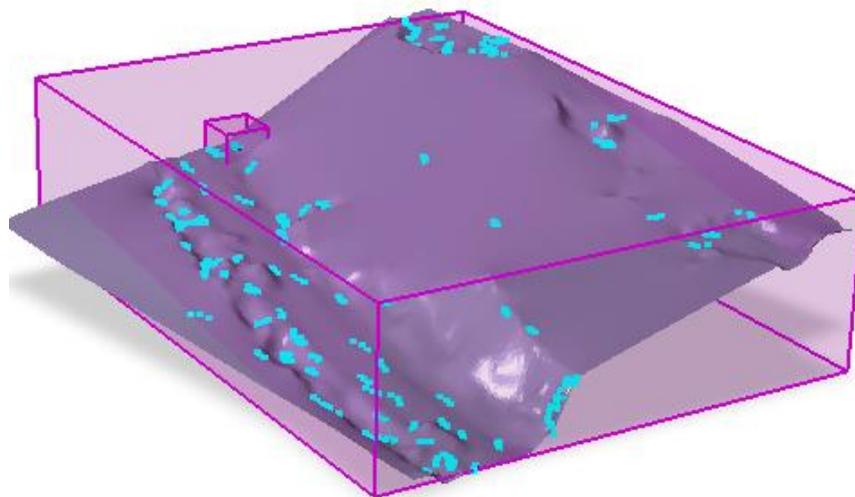
Além disso, essa simplificação também contribuiu para otimizar o desempenho computacional do software de análise de estabilidade, reduzindo a complexidade dos cálculos e permitindo uma análise mais eficiente dos cenários de estabilidade.

3.2.2 Análise de estabilidade

A importação dos dados no *software* de análise de estabilidade permitiu realizar uma avaliação detalhada da estabilidade do terreno, considerando fatores como a geometria, os materiais presentes e as condições de contorno.

A simplificação da geometria do terreno proporciona uma representação mais adequada para os cálculos e simulações realizadas, facilitando a identificação de áreas de instabilidade e a tomada de decisões para mitigação de riscos, ou reparação de qualquer falha ou defeito existente na modelagem fotogramétrica. Na Figura 24 observa-se a simplificação da superfície e o reparo de qualquer eventual falha na superfície.

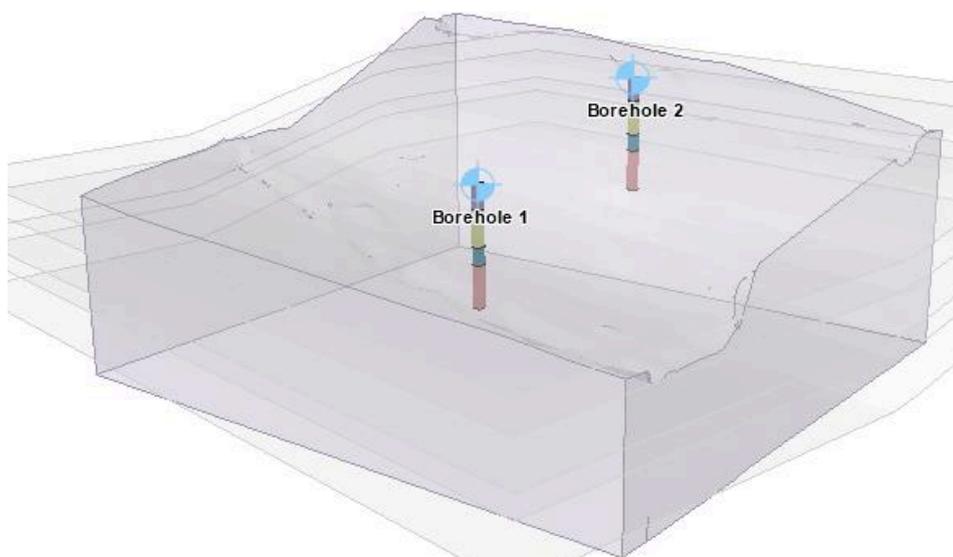
Figura 24 - Simplificação e o reparo da superfície



Fonte: Autor, 2023.

Após a simplificação e correção da geometria, os furos de sondagem são alocados para delimitar as camadas e as propriedades dos materiais que compõem a encosta do talude, visando obter uma representação do perfil do subsolo no talude. Para isso, foram utilizadas as sondagens SPT realizadas nos trabalhos de Souza (2020) e Lira (2022), como mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Inserção dos furos para delimitação dos perfis do solo

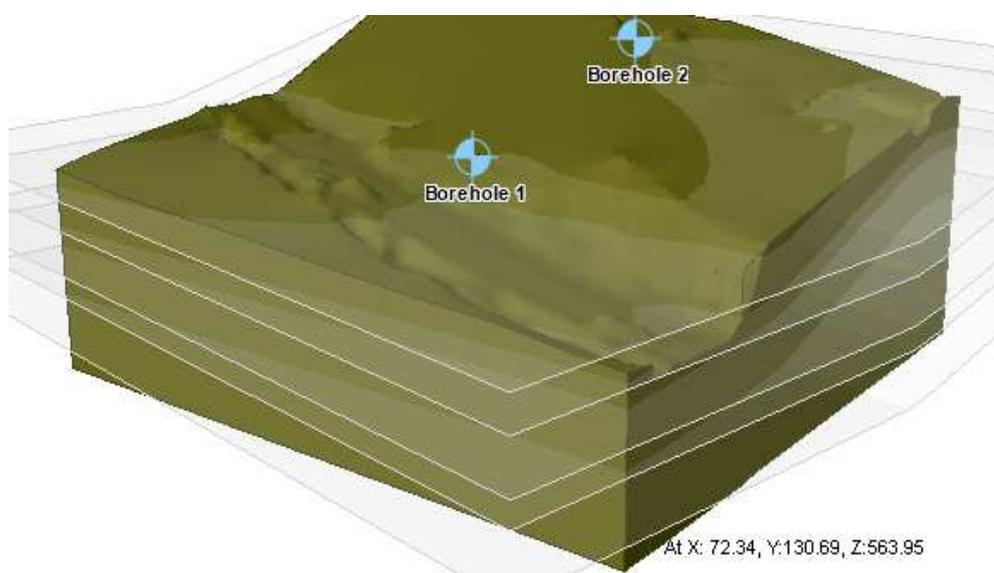


Fonte: Autor, 2023.

É importante destacar que o mesmo furo foi replicado a 20 m, na parte superior do talude, para criar as camadas de solo inclinadas de acordo com a geometria do talude, visando aprimorar a representatividade do modelo geométrico.

Para criar um objeto tridimensional a partir de uma superfície específica, foi necessário realizar a extrusão dessa superfície. Essa extrusão foi realizada por meio do recorte da área de estudo e, para delimitar as diferentes camadas do solo, utilizou-se uma ferramenta conhecida como furos artesanais.

Figura 26 - Planos de delimitação das camadas de solo no modelo 3D (a) e em corte (b).



(a)

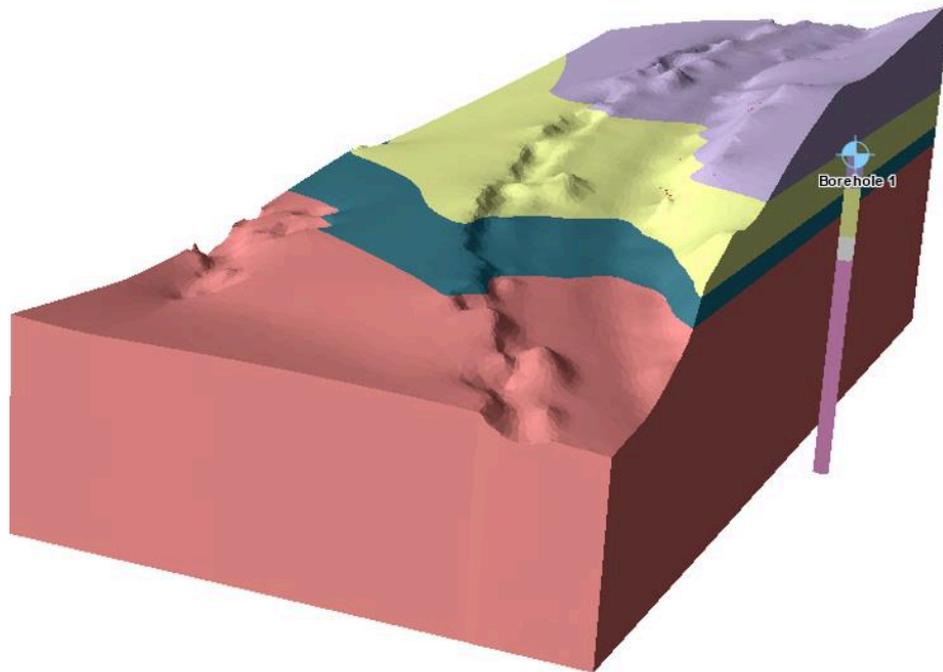


(b)

Fonte: Autor, 2023.

Os furos artesanais são parte da técnica desenvolvida para ser utilizada no software Slide3 que envolve a simulação de furos para criar representações virtuais das camadas do solo. Essa técnica permite visualizar e analisar as diferentes camadas presentes no subsolo, auxiliando na compreensão da estrutura geológica e na interpretação de dados geotécnicos, na Figura 27 ilustra-se como se dá a delimitação das camadas do solo.

Figura 27 - Delimitação das camadas de solo no modelo



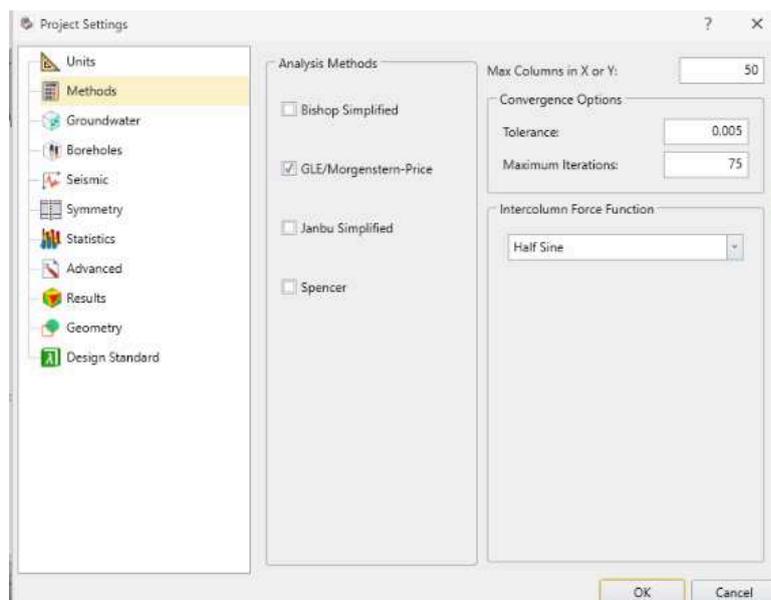
Fonte: Autor, 2023.

Após a delimitação das camadas através da interpolação dos furos de sondagem, é realizada a subdivisão delas, gerando as camadas de material. Nessa etapa, atribui-se a cada camada suas características de ângulo de atrito, coesão e peso específico. Uma vez concluída essa etapa de criação das camadas com suas respectivas propriedades, é possível prosseguir para o cálculo da análise de estabilidade determinística, utilizando o método de Morgenstern & Price.

Para esta pesquisa, foram utilizados dois cenários visando avaliar as condições mais desfavoráveis. Um deles envolveu o cenário dos parâmetros do solo obtidos pelo cisalhamento direto, levando em consideração a condição submersa do solo, enquanto o outro se baseou nos parâmetros do solo obtidos por meio do ensaio triaxial, que retrata melhor suas propriedades de campo.

Estes parâmetros foram obtidos a partir dos ensaios de ensaio de cisalhamento direto e o triaxial realizados por Lira, 2022. E mostrados nas Tabelas 5 e 6. Tendo o corpo de prova indeformado e saturados, baseados na norma ASTM D4767-11, com corpos de prova cilíndricos ($\varnothing = 50\text{mm}$ e $h = 100\text{mm}$). A Figura 28 ilustra a ferramenta de análise e seus diversos métodos de estabilidade de taludes.

Figura 28 - Ferramenta de análise e seus diversos métodos de estabilidade de taludes.



Fonte: Autor, 2023.

Após a definição dos materiais e camadas, torna-se possível a realização da análise de estabilidade utilizando o método Morgenstern & Price para identificar as áreas de menor fator de segurança.

Embora as sondagens realizadas nos trabalhos de Sousa (2020) e Lira (2022) não tenham registrado a presença do nível freático, as análises foram feitas segundo dois cenários. O Cenário 1, o nível freático ficou situado um metro abaixo da superfície do terreno. Por outro lado, o Cenário 2 admitiu o nível freático abaixo da última camada identificada na sondagem a 6,45m abaixo da superfície.

O cenário 2 se refere à situação mais próxima da realidade encontrada nas sondagens, com o nível freático profundo, sem afetar a estabilidade do talude. O Cenário 1, representa uma simulação da elevação do nível freático até próximo da superfície e permite a avaliação do efeito da água subterrânea na estabilidade do talude.

3.2.3 Coeficientes de segurança

Obter o coeficiente de segurança para taludes é um procedimento que envolve vários passos importantes. Primeiro, é necessário coletar os parâmetros relevantes intrínsecos às camadas, a forma da superfície que compõe o talude, a inclinação, a coesão do solo, o ângulo de atrito interno e o peso específico do solo. Em seguida, usando esses parâmetros, é possível calcular a força resultante de resistência ao cisalhamento do solo.

Após obter a força resultante de resistência, é necessário considerar os esforços atuantes no talude. Isso inclui o peso próprio do solo, a sobrecarga aplicada e quaisquer outras cargas relevantes. Com base nesses esforços, é possível calcular a força resultante atuante na superfície de ruptura do talude. Por fim, comparando a força resultante de resistência ao cisalhamento com a força resultante atuante, pode-se calcular o coeficiente de segurança. Um fator de segurança igual a 1,0 indica que essas duas forças são iguais e que o talude é instável. Se a força de resistência for maior que a força resultante, o talude será considerado estável. Quanto maior for o fator de segurança, mais estável será um talude contra a ocorrência de deslizamentos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados os resultados referentes ao processamento das imagens com fotogrametria e modelagem tridimensional e as análises de estabilidade de encostas. Além de resultados dos trabalhos realizados em campo e no escritório, também contém informações sobre a geometria dos taludes, áreas de instabilidade e fator de segurança.

4.1 Levantamento aéreo

As imagens coletadas são no formato JPG com dimensões 4000x2250 *pixels* e resolução de 72dpi com representação de cores sRGB, utilizando um sensor CMOS de 1/2,3 pol e 12 Mega Pixels. Foram obtidas um total de 84 imagens totalizando uma área de aproximadamente 52 mil metros quadrados, exemplificados na Figura 29.



Fonte: Autor, 2023.

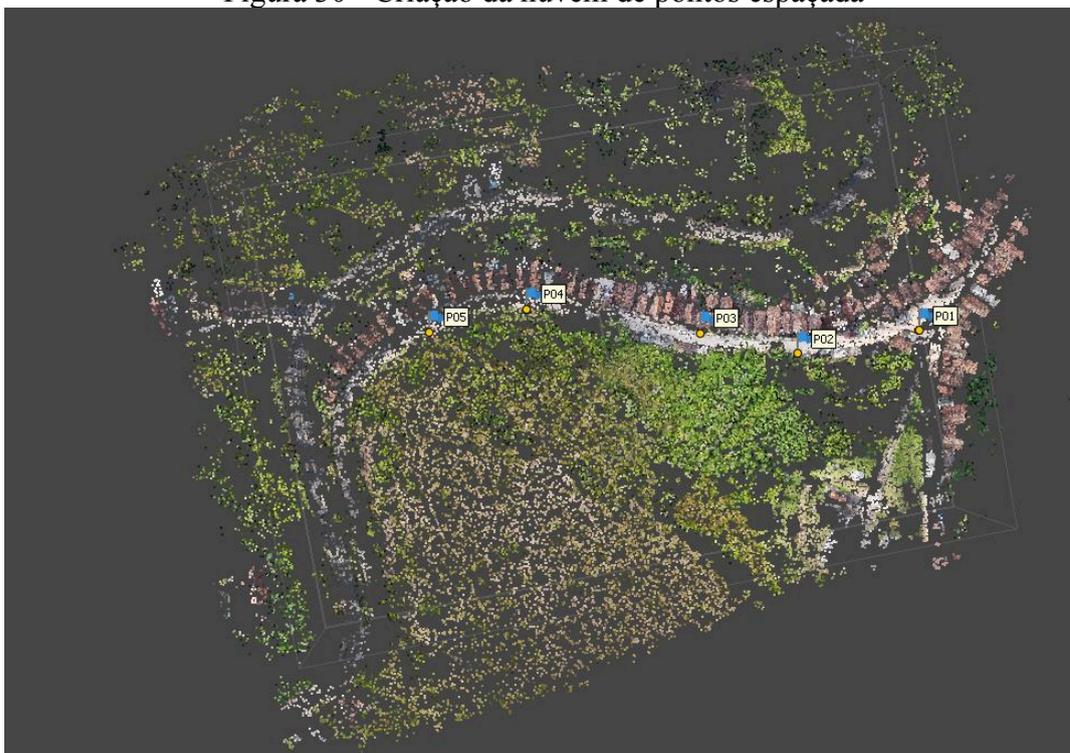
4.2 Nuvem de pontos

A partir das imagens obtidas no levantamento, utilizou-se uma técnica de fotogrametria para a geração da nuvem de pontos espaçada composta por 72.625 pontos. Tais pontos foram utilizados para a devida correção de erros e alinhamento preciso das diferentes imagens capturadas. Desta forma, foi possível obter uma representação coesa e consistente do ambiente

estudado. Essa etapa foi essencial para garantir a acurácia dos resultados e fornecer uma base sólida para as etapas subsequentes da modelagem tridimensional.

Na Figura 30, observa-se a nuvem de pontos espaçada, gerada por um processo de fotogrametria das imagens feitas no levantamento na Rua João Lourenço, no município de Areia-PB.

Figura 30 - Criação da nuvem de pontos espaçada



Fonte: Autor, 2023.

A partir da nuvem de pontos espessada e corrigida, é possível obter uma nuvem densa, por meio do algoritmo de densificação, como ilustrado na Figura 30. Na Figura 31(a), temos a representação da nuvem densa composta por cerca de 31.990.000 pontos, enquanto na Figura 31(b), temos um recorte que destaca a densidade dos pontos obtidos no levantamento.

A Figura 31(b) apresenta variações significativas na densidade dos pontos, evidenciando áreas com alta concentração de informações e regiões mais dispersas. Essas variações na densidade podem desempenhar um papel importante para análises posteriores, como a determinação dos parâmetros mais eficientes para o voo, tais como trajetórias, altitude e velocidade. Essas informações são valiosas para a otimização do desempenho e eficácia das operações aéreas.

Figura 31 - Criação da nuvem de pontos densa (a) - densidade dos pontos obtidos (b)



(a)



(b)

Fonte: Autor, 2023.

Segundo Ismail (2022), a qualidade da nuvem de pontos adquirida por drones depende significativamente da câmera usada, do número e qualidade das imagens, da forma de aquisição de dados, dos pontos de controle de solo selecionados e do alinhamento vertical e horizontal do ponto e da Nuvem 3D. Portanto, esses resultados devem ser interpretados com cautela.

Por meio do uso de uma ferramenta de classificação semiautomática presente no software de fotogrametria, é possível classificar a nuvem de pontos obtidos a partir do

levantamento topográfico em três principais grupos. Esses grupos são representados pelas cores verde, vermelho e marrom.

No grupo verde, são classificadas as áreas que correspondem à cobertura vegetal presente no local do levantamento. O grupo vermelho representa as edificações e construções presentes na área, permitindo identificar de desta forma a localização dessas estruturas. Já o grupo marrom representa o relevo do terreno natural, permitindo visualizar e analisar as variações de altitude e declividade do terreno como na Figura 32.

Figura 32 - Nuvem de pontos classificada



Fonte: Autor, 2023.

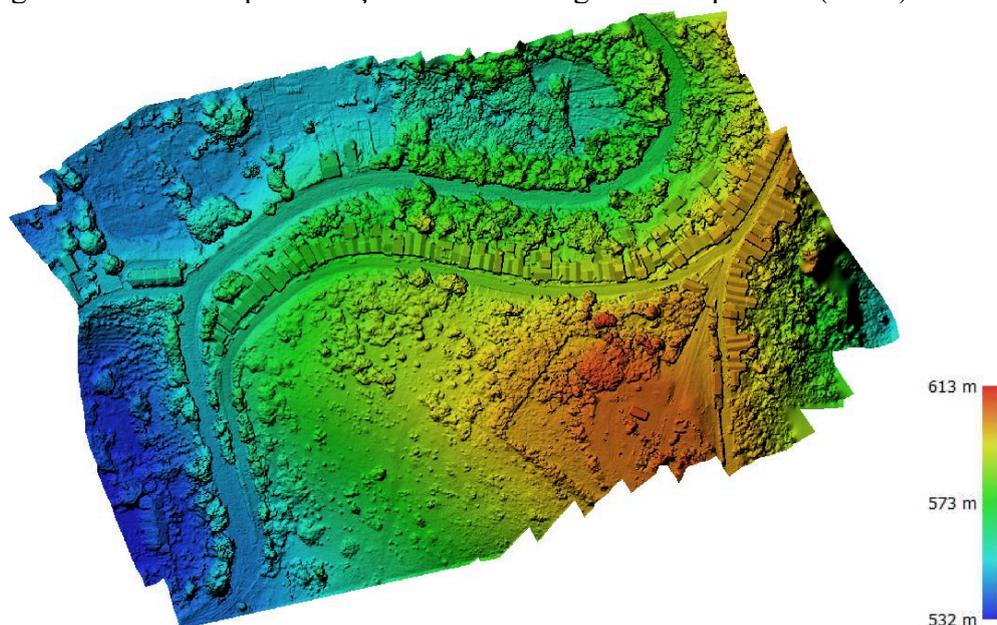
4.3 Modelos digitais

- Modelo digital de superfície (MDS)

Com os resultados das imagens é possível realizar a análises das áreas com maiores inclinações e baixa cobertura vegetal que podem indicar possíveis suscetibilidade de deslizamento de solo, também foi possível gerar o Modelo Digital de Superfície (MDS) mostrado na Figura 33.

De acordo com Mukhlisin (2023), a fotogrametria se destaca pela sua capacidade de realizar levantamentos em pequenos intervalos de tempo, proporcionando alta resolução e acurácia nos resultados obtidos.

Figura 33 - Metashape - Criação o Modelo Digital de Superfície (MDS)



Fonte: Autor, 2023.

- Modelo digital de terreno (MDT)

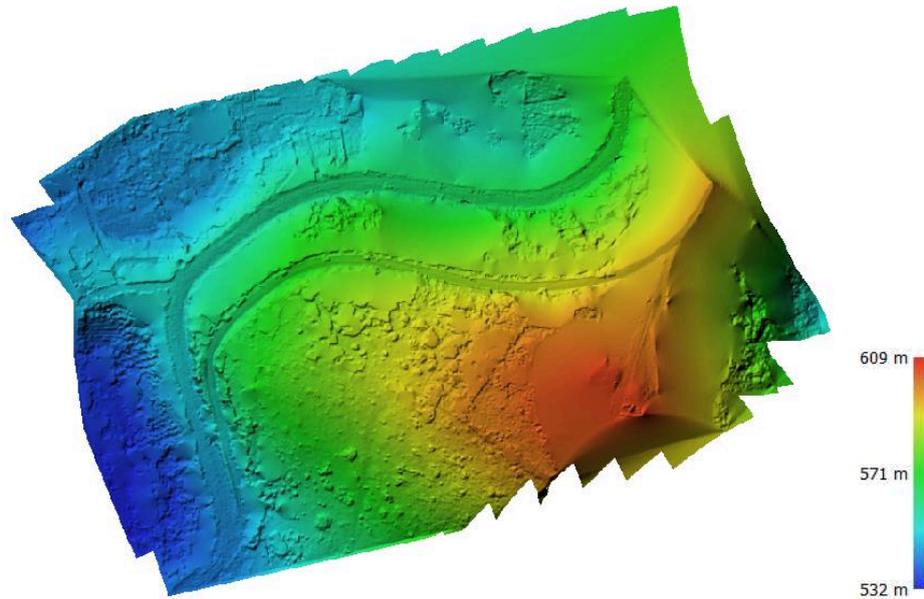
A partir do levantamento foi possível gerar o Modelo Digital do Terreno (MDT) com uso do software de fotogrametria foi possível aplicar um filtro na nuvem de pontos, selecionando apenas aqueles classificados como terreno. Esses pontos foram utilizados para realizar uma interpolação, gerando uma superfície que representa o Modelo Digital de Terreno - MDT (Figura 34). Essa abordagem leva em consideração apenas os parâmetros reais do terreno, proporcionando um resultado mais confiáveis quando comparado a levantamentos feitos por imagens de satélite usando GIS (Geographic Information System) e mais eficientes do que levantamentos topográficos convencionais.

O Agisoft se destaca como uma das melhores opções para análises quantitativas baseadas em pontos, medição de distâncias e análises qualitativas devido à versatilidade das formas de processamento (Rani e Rusli, 2018), é importante salientar que durante o processo, é possível filtrar as imagens, inclusive as áreas sombreadas de acordo com as necessidades de cada levantamento.

Por meio dessas poderosas ferramentas, foi possível adquirir informações cruciais sobre o terreno para investigar parâmetros relacionados a movimentos de massa, tais como o deslocamento do solo, a declividade, a direção e a área da superfície afetada por deslizamentos

anteriores (Mukhlisin, 2023). Na Figura 34 observa-se o Modelo Digital do Terreno (MDT) da área em estudo.

Figura 34- Criação Modelo Digital do Terreno (MDT)

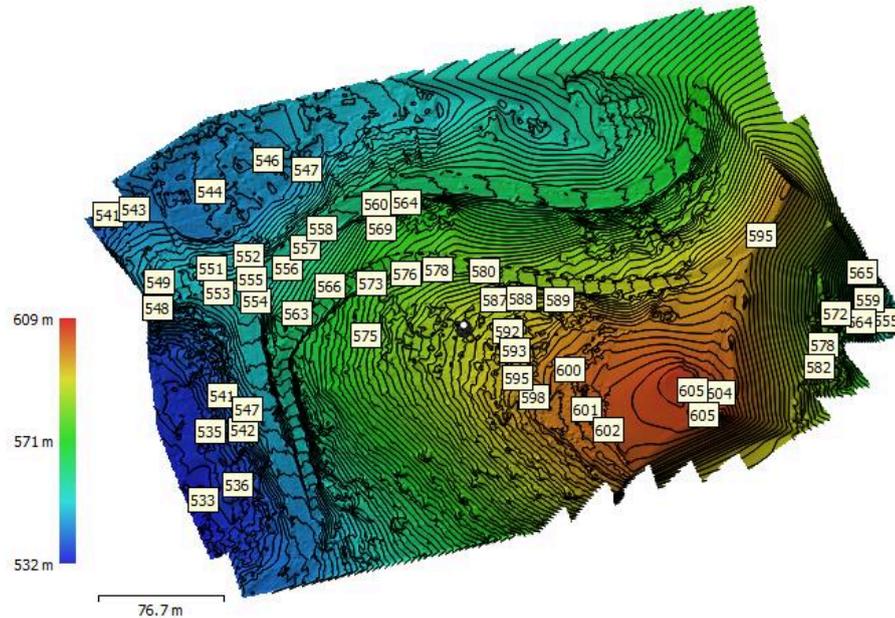


Fonte: Autor, 2023.

4.4 Levantamento planialtimétrico

Através do modelo digital do terreno e das informações obtidas foi possível utilizar a ferramenta de criação de contornos para delimitar as curvas de nível na área de estudo. Essas curvas têm espaçamento de 1 metro e são exibidas com a mesma precisão do modelo de pontos, aproximadamente 2,5 centímetros de acurácia. Isso pode ser observado na Figura 35.

Figura 35 - Curvas de nível geradas área de estudo



Fonte: Autor, 2023.

4.5 Imagem de alta resolução - ortomosaico

Na fotogrametria, o processo de aquisição de imagens de alta resolução (Ortomosaico) demanda o uso de câmeras de alta qualidade, capazes de capturar detalhes finos. As imagens são feitas em posições estrategicamente planejadas para obter uma cobertura completa da área de interesse. Na Figura 36 apresenta o resultado da ortofoto retificada com Ground Sample Distance (GSD) de resolução 2.83 cm/pix.

A utilização de VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) é fundamental para realizar levantamentos de imagens aéreas com alta precisão do ortomosaico. Recentemente, os produtos ortofoto provenientes dos resultados da fotogrametria, têm se tornado o padrão nos métodos de mapeamento e pesquisa em países desenvolvidos, visto que a ortofoto determina a representação e a informação da imagem (Muneza et al., 2015).

Figura 36 – Ortomosaico a de alta resolução



Fonte: Autor, 2023.

4.6 Modelo tridimensional da área

A Figura 37 apresenta o modelo tridimensional texturizado a partir das imagens, tornando possível identificar as áreas com erosão acentuada, o tipo de vegetação que recobre a encosta, a inclinação, a volumetria e distâncias com acurácia. Segundo Rani e Rusli, (2018) o levantamento com drones provou ser rápido e de baixo custo para mapear e monitorar uma superfície terrestre, especificamente para mitigar desastres como deslizamentos de terra.

Figura 37 - Criação modelo texturizado



Fonte: Autor, 2023.

Após a definição dos pontos de controle e da geração do modelo tridimensional, é possível calcular o erro com base nos pontos conhecidos. Nas Tabelas 12, 13 e 14 pode-se observar o relatório de reporte do erro (Acurácia) gerado pela plataforma da *Metashape*.

De acordo com Ismail (2022), a realização de levantamentos de dados a partir da utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) de modo a gerar nuvens de pontos 3D é considerada uma alternativa ao levantamento geológico convencional, na análise de estabilidade de taludes rochosos. Além disso, o procedimento fotogramétrico digital acelera as etapas de aquisição de dados e reduz diversos inconvenientes associados aos métodos tradicionais de mapeamento.

Tabela 12 - Relatório de processamento. Pontos de Controle: RMSE. X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Count	Xerror (cm)	Yerror (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
3	2.00274	1.5844	0.729381	2.55368	2.6558

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 13 - Pontos de Controle: X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P01	-1.77707	1.25925	-1.16886	2.47183	0.192 (11)
P03	2.75826	-2.17904	0.324423	3.53008	0.208 (22)
P05	-1.1256	1.09407	-0.35284	1.60887	0.451 (11)
Total	2.00274	1.5844	0.729381	2.6558	0.286

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 14 - Pontos de Controle, Check points. X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
P02	3.46102	0.767306	-2.3717	2.7743	0.191 (16)
P04	2.35219	0.242405	4.9592	4.0228	0.247 (11)
Total	2.90650	0.568999	3,6605	3,6642	0.216

Fonte: Autor, 2023.

Para realizar o voo autônomo e coletar as imagens para geração da nuvem de pontos, foram necessários cerca de 40 minutos de planejamento de voo e mais 30 minutos de levantamento em campo, esse tempo se mostrou consideravelmente mais rápido do que os métodos convencionais, como o levantamento por GNSS RTK, como demonstrado na Tabela

11, pode-se observar que foram necessárias cerca de 6 horas, apenas para coletar 5 pontos, ressaltando assim a capacidade e eficiência do levantamento feito por meio de drones, corroborando com os resultados de McQuillan (2018) que avaliou diferentes métodos.

O levantamento realizado com drone alcançou a acurácia de 3,66 centímetros de erro, de acordo com Bar (2020) esses valores mostraram-se suficientes para gerar os modelos de superfície de encostas, sem quaisquer perdas na qualidade dos obtido, quando comparados aos resultados obtidos do levantamento feito com o GNSS RTK que apresentou cerca 1,6 centímetros, podemos observar que a diferença é pouco significativa, ainda mais se levando em consideração o tempo de processamento, execução e o custos de levantamento.

4.7 Análise de estabilidade

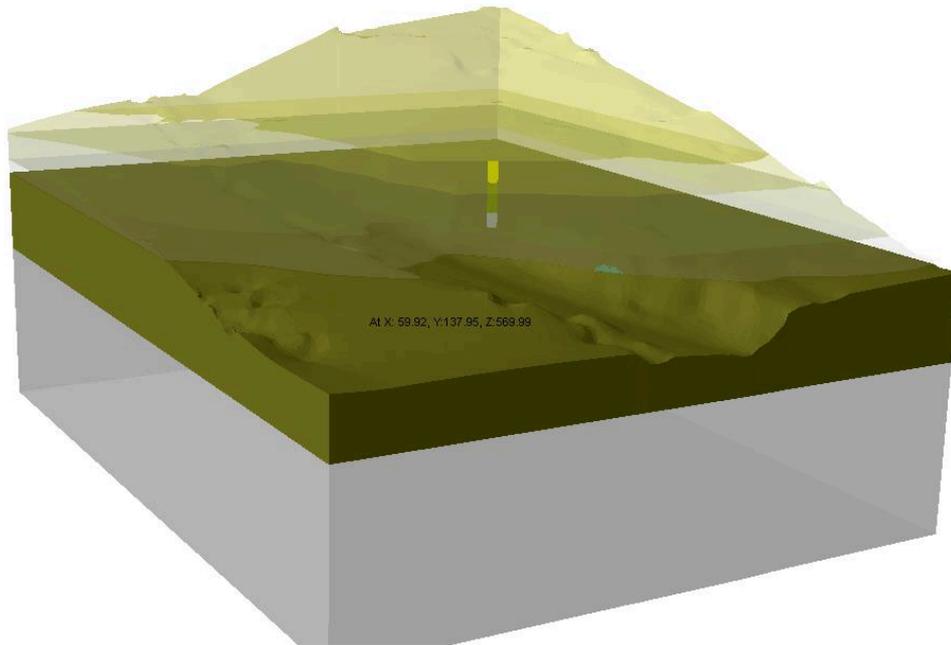
Com base nas informações disponíveis sobre as propriedades geotécnicas do talude, a análise de estabilidade foi realizada em um recorte do modelo correspondendo a certo 3.600 m² que foi obtido da Rua João Lourenço. A partir da modelagem tridimensional gerada com os dados da fotogrametria e dos parâmetros de resistência do solo obtidos na bibliografia, foi possível realizar a análise de estabilidade na área de estudo. Isto posto, essa análise foi fundamental para compreender e avaliar a estabilidade da encosta presente no local, levando em consideração as características geotécnicas do solo e as informações geométricas fornecidas pelo modelo 3D.

Através desse processo, foi possível identificar potenciais riscos geotécnicos, como deslizamentos de terra ou instabilidades estruturais, e tomar medidas preventivas ou corretivas adequadas. A análise de estabilidade é essencial para garantir a segurança das estruturas e a integridade da área de estudo, permitindo uma tomada de decisão embasada e minimizando possíveis impactos negativos.

4.7.1 Superfícies analisadas

A modelagem tridimensional do terreno em conjunto com a ferramenta *Slide3* foi empregada na geração de uma representação tridimensional do talude estudado (Figura 38), a partir do MDT processado. Essa abordagem permitiu uma visualização mais realista e facilitou a análise das características topográficas da área de estudo podendo analisar várias superfícies de deslizamento de forma precisa.

Figura 38 - Modelagem da superfície analisada



Fonte: Autor, 2023.

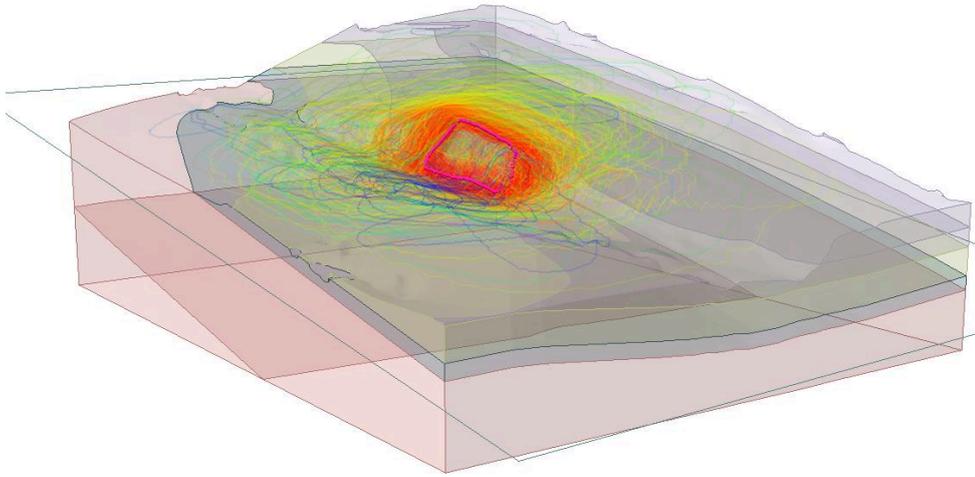
4.7.2 Mapa de superfície analisadas

Foram analisados dois cenários distintos. No Cenário 1, as análises consideraram condições menos favoráveis, como o lençol freático elevado e parâmetros de interceptação coesiva igual a zero. Por outro lado, no Cenário 2, as características foram mais representativas das condições reais encontradas no campo durante a coleta e os ensaios de sondagem. Isso possibilitou a realização de análises em diversas condições do solo.

Após a modelagem e determinação das camadas e dos parâmetros do solo foi gerado o mapa com as superfícies analisadas para delimitação das áreas mais suscetíveis a movimento de massa para os dois cenários estudados. No primeiro cenário foram analisadas 642 superfícies de deslizamento e no segundo cenário foram analisadas 806 superfícies. Gerando os mapas ilustrados nas Figura 39 e 40.

Figura 39 - Mapa da superfícies analisadas – Cenário 1

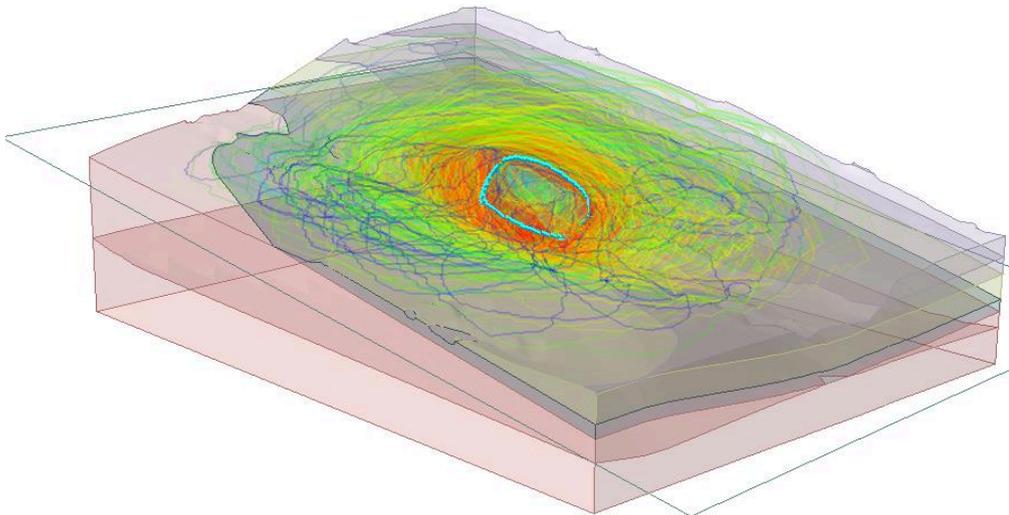
FS: 1.115



Fonte: Autor, 2023.

Figura 40 - Mapa da superfícies analisadas – Cenário 2

FS: 1.891



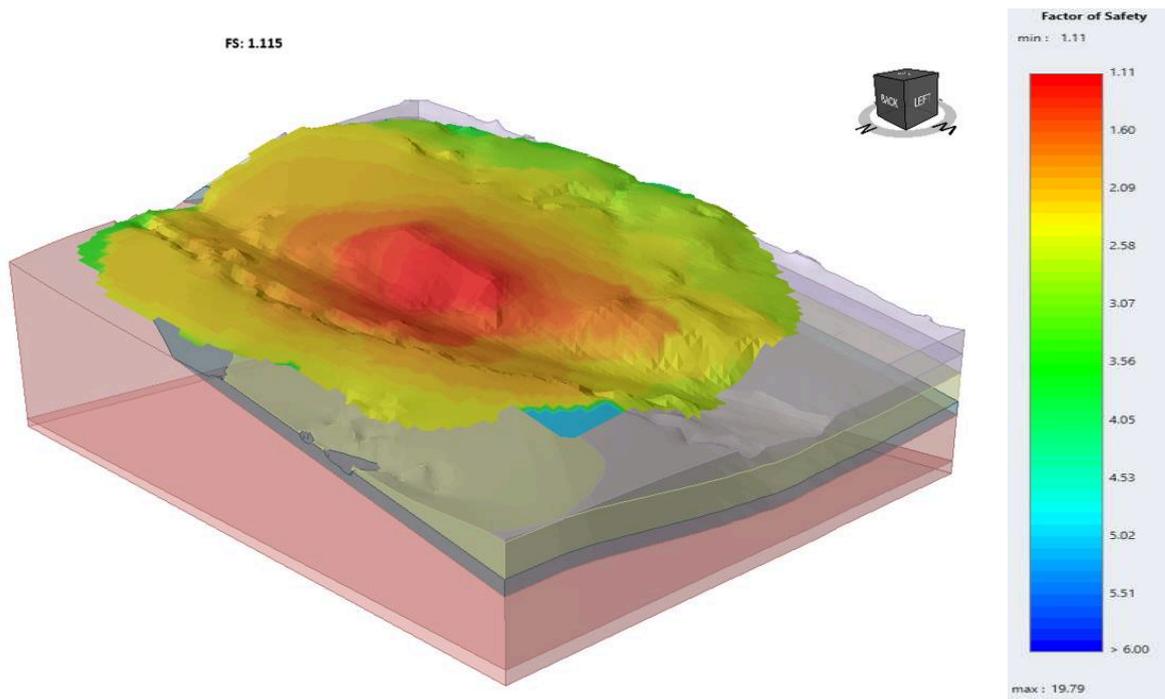
Fonte: Autor, 2023.

4.7.3 Delimitação da área com menores coeficientes de segurança

Com o uso da ferramenta *Slide3* e baseando-se na modelagem tridimensional feita no software *Metashape* foi realizada a análise de estabilidade da área de estudo considerando as propriedades dos solos em dois cenários nas condições do ensaio cisalhamento direto triaxial realizado por Lira (2022) para simular o pior cenário da área de estudo. Chegou-se assim nos mapas dos coeficientes de segurança mostrados abaixo. Especificar os cenários

Nas Figuras 41 e 42 são apresentados os Mapas de segurança do talude. nas quais é possível observar na legenda localizada à esquerda os fatores de segurança (FS). Pela análise do Cenário 1 constata-se que o menor fator de segurança registrado foi de 1.11, já no Cenário 2 o FS foi de 1.89.

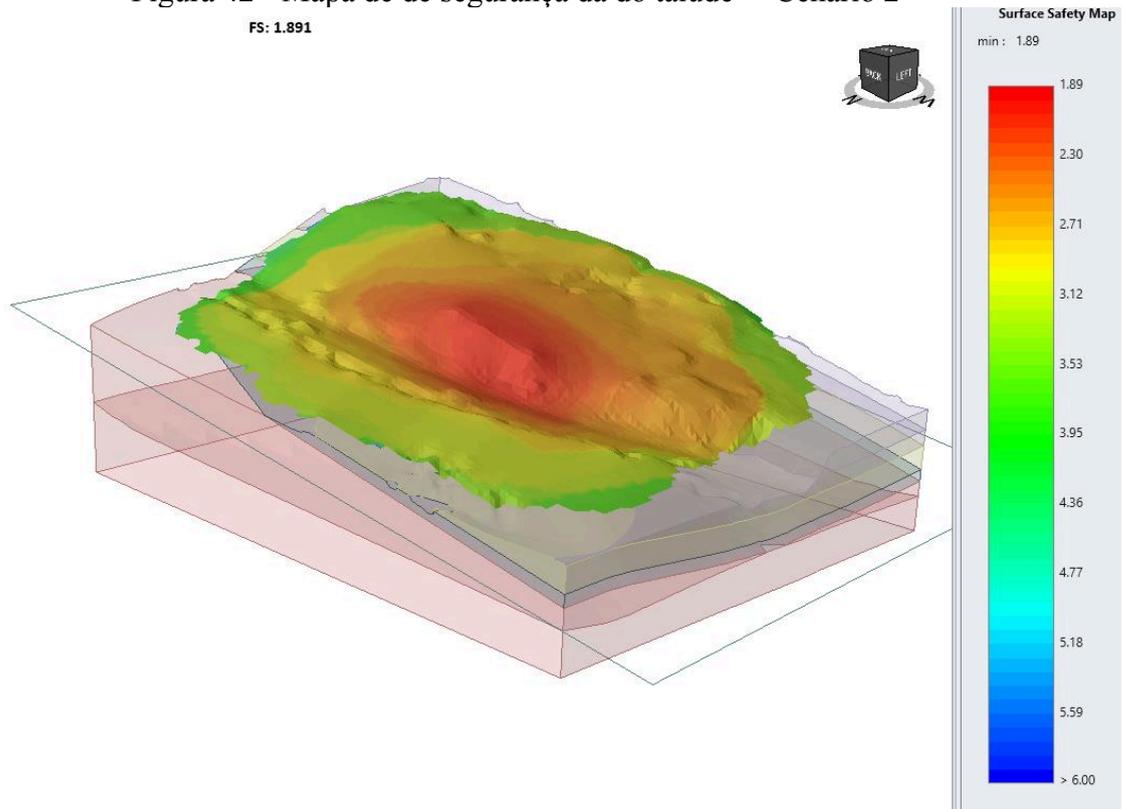
Figura 41 - Mapa de de segurança da do talude – Cenário 1



Fonte: Autor, 2023.

Figura 42 - Mapa de de segurança da do talude – Cenário 2

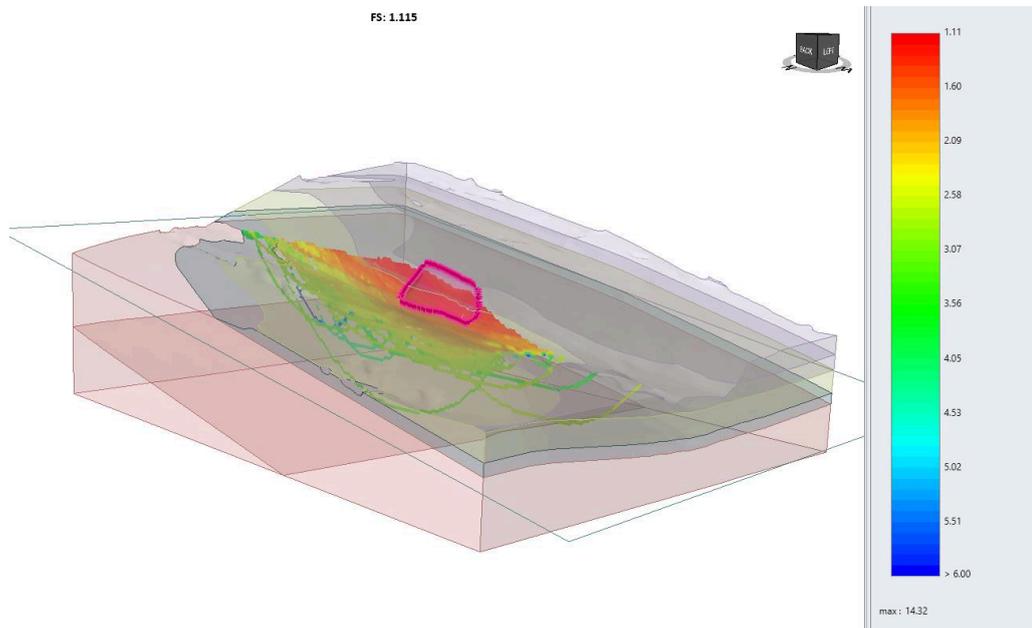
FS: 1.891



Fonte: Autor, 2023.

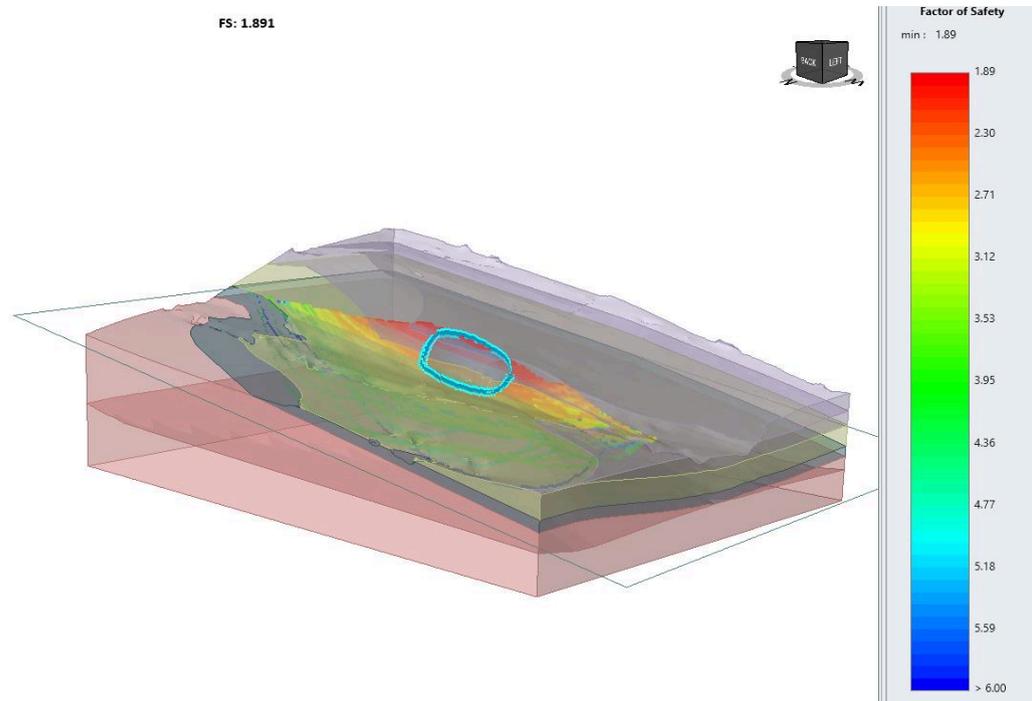
A transição da modelagem 2D para a modelagem 3D tem proporcionado uma melhor integração com o planejamento das obras, além de aumentar a velocidade e qualidade dos projetos propostos para os taludes. Essa abordagem também possibilita a geração e análise automática de seções transversais 2D, as quais podem ser comparadas diretamente com análises históricas. Nas Figuras 43 e 44 encontram-se os resultados das simulações para os cenários em estudo

Figura 43 - Região suscetível a movimento de massa – Cenário 1



Fonte: Autor, 2023

Figura 44 - Região suscetível a movimento de massa – Cenário 2



Fonte: Autor, 2023.

Observa-se que no contexto da região analisada, considerando a Tabela 4 da NBR 11682/2009 que o nível de segurança contra perdas de vida humanas deve ser “alta”. No que se refere aos prejuízos materiais e ambientais, a Tabela 5 a classificação que melhor se encaixa é “médio”. A partir desses critérios, ao inseri-los na Tabela 6, verifica-se que o fator de segurança mínimo para a área de estudo deve ser 1,5.

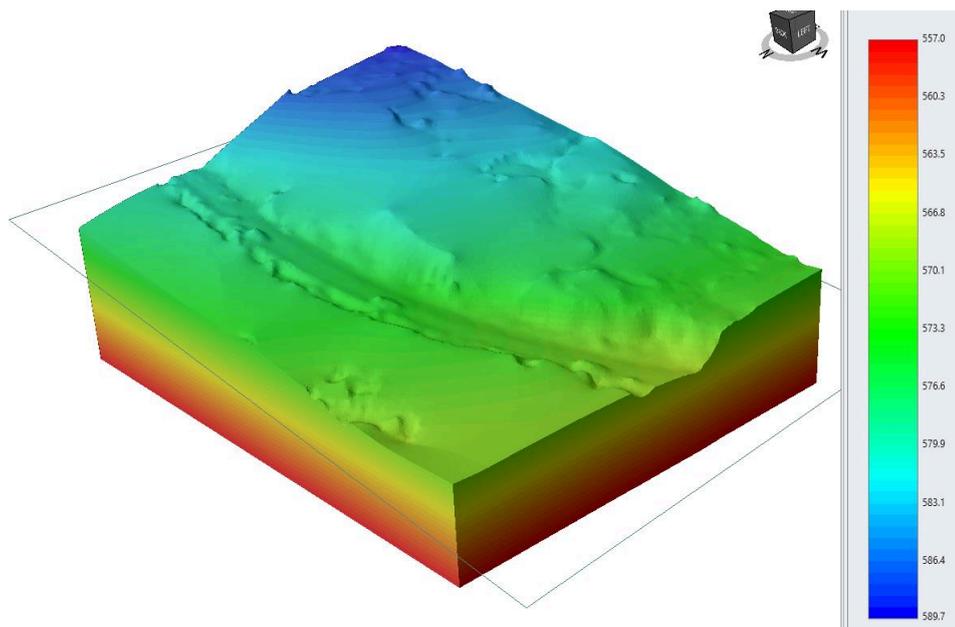
Em suma, a análise aprofundada da estabilidade de taludes revelou variações cruciais na avaliação de riscos. No primeiro cenário, quando as condições do solo se mostraram mais adversas, aliadas a um nível freático elevado, a constatação de um fator de segurança (FS) em torno de 1,11 (Figura 43), abaixo dos parâmetros normativos, evidenciou a fragilidade da estabilidade nesse contexto desfavorável.

Por outro lado, no segundo cenário, onde foram consideradas as condições semelhantes ao estado real da encosta (no período analisado), sem considerar influências antrópicas, foi possível constatar que a encosta analisada se mostrou estável. Nesse contexto, o fator de segurança (FS) calculado foi de 1,89 (Figura 44), o que sustenta a confiabilidade da estabilidade da encosta de acordo com a Tabela 6 da NBR 11682/2009.

Comparando os dois cenários, fica claro que a variação nas condições do solo e a consideração dos agentes antrópicos desempenham um papel significativo na avaliação da estabilidade. Os resultados reforçam a importância de considerar diferentes fatores ao determinar medidas de segurança em encostas.

Além disso, é possível realizar uma análise das declividades e cotas superficiais utilizando o modelo digital de elevação obtido através do software de análise de estabilidade *Slide 3*, conforme ilustrado na Figura 45. Isso permite obter informações detalhadas sobre as características topográficas da área em estudo.

Figura 45 - Modelo de elevação para análise de estabilidade



Fonte: Autor, 2023.

Segundo Bar (2020) e sua equipe de engenharia geotécnica que desde meados de 2019 tem utilizado drones e softwares 3D para análise de estabilidade de taludes, contataram que os modelos 3D fornecem uma compreensão significativa das possíveis extensões laterais dos mecanismos de falha, permitindo que orientações adequadas sejam fornecidas para intervenções em encostas em termos de gerenciamento de riscos geotécnicos, sem a necessidade de adotar projetos de taludes excessivamente conservadores.

O trabalho realizado por Lira (2022) utilizando Modelagem Digital de Elevação (MDE) do projeto TOPODATA obteve um valor mínimo de fator de segurança (FS) de 1.54 para o cenário mais crítico de chuvas recorrentes no talude da Rua João Lourenço. Em comparação com o presente estudo, é importante destacar que o menor valor de FS registrado foi de 1.11 para o mesmo cenário desfavorável. Essa diferença pode ser explicada por diversas variáveis, incluindo as diferenças nas superfícies analisadas, bem como métodos de análise de estabilidade.

Com esse estudo observou-se a influência da geometria do talude e dos métodos de ensaio na determinação dos parâmetros geotécnicos do solo sobre a análise de estabilidade e, conseqüentemente, sobre o Fator de Segurança (FS) na área de estudo. É fundamental destacar que a geometria do talude, abrangendo suas dimensões e configuração desempenha um papel crucial na avaliação da estabilidade. Além disso, os parâmetros geotécnicos, incluindo o ângulo de atrito e intercepto coesivo, são essenciais para a caracterização do comportamento do solo. Pode-se observar variações nesses parâmetros que podem impactar significativamente os resultados da análise de estabilidade, fornecendo insights valiosos para o entendimento e a mitigação dos riscos geotécnicos associados à área de estudo.

5. CONCLUSÕES

Os resultados do levantamento aerofotogramétrico da região estudada mostraram-se promissores. Através da aquisição das imagens aéreas e da subsequente criação da nuvem de pontos densa, obteve-se uma representação minuciosa da área em estudo. De acordo com o relatório de processamento do software, o levantamento demonstrou boa precisão na formação da nuvem de pontos, apresentando alta densidade de pontos e uma resolução espacial (GSD) de 2,83 cm/pixel. Essa abordagem possibilitou uma visualização abrangente das características geométricas do terreno.

A metodologia de levantamento aplicada neste trabalho demonstrou ser uma ferramenta eficiente para aquisição de dados, requerendo menos tempo em campo para a coleta de imagens, proporcionou uma ampla gama de informações, incluindo modelos detalhados como MDS, MDT e imagens de alta definição, em comparação com os métodos tradicionais de levantamento topográfico. Além disso, essa abordagem serve como base para a criação de topografias e curvas de nível apresentando um erro máximo de 3,66 cm.

A análise tridimensional de estabilidade de taludes mostrou resultados eficazes ao abordar a geometria e interações entre as seções em várias direções. Isso aprimorou a compreensão dos processos geotécnicos. A integração da fotogrametria forneceu dados sobre a geometria do talude, contribuindo de forma significativa para a avaliação da estabilidade.

Ao conduzir as análises de estabilidade em um contexto tridimensional, utilizando o modelo gerado, constatou-se que os resultados alcançados são próximos com aqueles obtidos em estudos anteriores realizados na mesma área de estudo. Ao contemplar os dois cenários para o talude da Rua João Lourenço, encontrou os valores do fator de segurança mínimos 1.11 e 1.89, para os cenários 1 e 2, respectivamente.

A comparação dos cenários destaca a relevância da variação nas condições do solo para avaliar a estabilidade. Os resultados enfatizam a necessidade de abordar todas as influências relevantes, integrando-as para uma análise confiável. A variação nas características geotécnicas e hidrológicas pode levar a resultados distintos.

Em suma, os resultados desta pesquisa revelaram que o uso da fotogrametria e análise tridimensional de estabilidade de taludes permitiu uma verificação rápida e eficiente oferecendo uma relação custo-benefício favorável quando comparado com resultados obtidos utilizando metodologias convencionais, contribuindo para planejamentos mais seguros e sustentáveis de projetos geotécnicos.

REFERÊNCIAS

ALAMEDA-HERNÁNDEZ P.; Hamdouni R. E.; IRIGARAY C., CHACON J. Weak foliated rock slope stability analysis with ultra-close-range terrestrial digital photogrammetry. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, Heidelberg, Jul. 2017.

ALEOTTI, Pietro; CHOWDHURY, Robin. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, v. 58, p. 21-44, 1999.

ANTUNES, F. DOS S. *et al.* Solos: Subsídio para estudos de geologia de engenharia. **Anuario do Instituto de Geociências**, v. 38, n. 1, p. 180–198, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2009). NBR 11682: **Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro, 2009.

AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização Geológico-Geotécnica Voltada à Estabilização de Encostas: uma Proposta Metodológica**. 1ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (1º COBRAE), Anais, ABMS/ABGE, v. 2, 721-733, 1992.

BAR, N *et al* (2020). Rapid and robust slope failure appraisal using aerial photogrammetry and 3D slope stability models. **International Journal of Mining Science and Technology**. doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.013.

BLIGHT, G. E. (1997) Case histories of shear strength-controlled aspects of residual soils, **Mechanical of residual soils**, 1:221-237.

BRASIL. **Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC Nº 12.608**, de 10 de abril de 2012.; Dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112608.htm: 30 set. 2022.

Centre for Research on the Epidemiology of Disaster – CRED. EM-DAT. **The International Disaster**. Database, 2020. Disponível em: <https://www.emdat.be/history>. Acesso em: 01 fev. 2023.

COELHO, L.; BRITO, J. N. *Fotogrametria digital*. [S. l.]: EDITORA DA UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. 196 p., 2007. ISBN 978-85- 7511-114-7.

CPRM. **Ação emergencial para delimitação de áreas em alto e muito alto risco a inundações e movimentos de massa: Areia, PB** Out-2015, Disponível em:< <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/19743>>: 12 Abr. 2023.

Diagnóstico do município de areia. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea estado de Paraíba**, Recife, Setembro de 2005 Disponível em:< https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/15823/1/Rel_Areia.pdf>: 12 Abr. 2023.

DIAS, Máira Sebastião *et al.* "Capela Da Fazenda Veneza: Análise Comparativa Da Precisão De Nuvens De Pontos Obtidas Por Diferentes Ferramentas E Técnicas De Fotogrametria."

Gestão & Tecnologia De Projetos 16.3 (2021): **Gestão & Tecnologia De Projetos**, 2021, Vol.16 (3).

FAPEU, (2020). Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. [Organização Rafael Schadeck], Gestão de risco de desastres no Brasil: panorama atual e tendências / Banco Mundial. Global Facility for Disaster Reduction and Recovery. Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária. – Florianópolis: 2020. 110 p: il. color.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem Numérica De Terreno. In: Introdução À Ciência da Geoinformação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**: [s. n.], 2001. cap. 7, p. 1-38.

FELICISIMO, A. **Introducción a los modelos digitales del terreno**. Modelos Digitales del Terreno, Universidad de Extremadura - Oviedo, p. 1-118, 1994.

FERNANDES, F. S. Aplicação de fotogrametria terrestre digital na análise de descontinuidades em maciços rochosos: exame comparativo com técnicas tradicionais. 2010. 117 f. Dissertação - Curso de Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2010.

FERREIRA, A. M. R. Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado: VANT, para uso em aerolevantamentos. Orientador: Prof. Dr. Giuliano Sant'Anna Marotta. 2014. Dissertação (Mestrado em geociências.) Universidade de Brasília, Brasília, p. 92, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/17305>. Acesso em: 30 abr. 2020.

GAMEIRO, Samuel. RIFFEL, Eduardo Samuel. OLIVEIRA, Guilherme Garcia. GUASSELLI, Laurindo Antonio. Artificial neural networks applied to landslide susceptibility: The effect of sampling areas on model capacity for generalization and extrapolation, **Applied Geography**. Volume 137. ISSN 0143-6228, 2021.

GARCIA, R.A.C; ZÊZERE, J.L. **The Influence of Dem Properties In Landslide Susceptibility Assessment At A Regional Scale**. XII Reunión Nacional de Geomorfología, Santander, Sesión IV. Métodos y técnicas en Geomorfología - RISKam - Centro de Estudos Geográficos. IGOT - Instituto Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa (Portugal)., p. 247-250, 2012.

GARIANO, S. L.; GUZZETTI, F. Landslides in a changing climate. **Earth- Science Reviews**, v. 162, p. 227–252. 2016.

GERSCOVICH, Denise. Estabilidade de taludes. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GIANI, G.P. Rock Slope Stability Analysis. Rotterdam: Brookfield, 361 p. 1992.

GUSMÃO FILHO, J. A.; JUCÁ, J. F. T.; SILVA, J. M. J. Mecanismos dos movimentos dos morros de Olinda. CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, VIII., 1986, Porto Alegre. Anais do VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica [...]. São Paulo: ABMS, 1986. v.

HEIPKE, C. State-of-the art digital photogrammetric workstations. *Photogrammetric & Remote Sensing*, vol.61, No 1, Ottawa, Canada, 1995, 49-56.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. “Areia-PB”. Portal IBGE Cidades. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/areia.html> >. Acesso em: 15 de março. 2023.

ISMAIL, Afiqah; *et al*, Application of combined terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle digital photogrammetry method in high rock slope stability analysis: A case study, **Measurement**, Volume 19. ,2022.

LATO, M. J. VÖGE, M. (2012). Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.06.003.

LEE, S.; CHOI, Y. Topographic Survey at Small-Scale Open-Pit Mines using a Popular Rotary-Wing Unmanned Aerial Vehicle (Drone). **J. Korean Soc. Rock Mech.** 2015, 25, p. 462–469. 2014.

LEONG, E.C.; RAHARDJO, H.; ORTIGAO, J.A.R.; REZAUR, R.B. (2013) Slopes. In: BLIGHT, G. E.; LEONG, E. C. Handbook of Tropical Residual Soils Engineering. Boca Raton: CRC Press, 2013. cap. 7, p. 213-278.

LI, Y., & MO, P. (2019). **A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review**. *Geomorphology*. doi:10.1016/j.geomorph.2019.04.020.

LI, Y., & MO, P. (2019). A unified landslide classification system for loess slopes: A critical review. **Geomorphology**. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.04.020.

LIMA, M.G. **A história do intemperismo na Província Borborema Oriental, Nordeste do Brasil: implicações paleoclimáticas e tectônicas**. Tese de Doutorado - Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte. 2008.

LIRA, Bruna Silveira. **Influência da infiltração de água da chuva na ruptura de taludes de solos residuais no município de areia-pb**– Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB. 2022.

LONG, Y. HUANG, Q. WU, F. YI, H. GUAN, S. SHA, P. (2021) Automatic identification of irregular rock blocks from 3D point cloud data of rock surface. In **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**.

McQuillan, A, Canbulat, I, Oh, J, Gale, S & Yacoub, T 2018. Geotechnical review of an open cut coal mine slope using 3D LEM and new empirical run out chart predictions. Proceedings of the 2018. **International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering**, BCO Congressos, Barcelona.

MAKABAYI, B., Musinguzi, M., Otukei, J.R., 2021. Estimation of ground vertical displacement in landslide prone areas using PS-InSAR. A case study of bududa, Uganda. *Int. J. Geosci.* 12, 347–380.

MANUNTA, P., BRUGIONI, M., CASAGLI, N., Colombo, D., DEFLORIO, AM, FARINA, P., ... & STROZZI, T. (2003, dezembro). Slam, um serviço de monitoramento de deslizamento de terra baseado em dados EO. Em Proc. Oficina FRINGE, Frascati, Itália (pp. 1-5). 2003.

MARINHO, F. A. M. **Medição de sucção com o método do papel filtro**. In: X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Foz do Iguaçu, PR, 1994, v.2, p. 515-522.

MARTINS, V. T. S.; BOGGIANI, P. C.; BACCI, D. LA C. Percepção de risco como metodologia de prevenção, ensino e pesquisa: a experiência do grupo “Armando o Barranco”. In: GUNTHER, W. R.; CICCOTTI, L.; RODRIGUES, A. C. **Desastres: Múltiplas Abordagens**. São Paulo: Elsevier, 2017. p. 243-257.

MARTINS, V. T. S.; BOGGIANI, P. C.; BACCI, D. LA C. Percepção de risco como metodologia de prevenção, ensino e pesquisa: a experiência do grupo “Armando o Barranco”. In: GUNTHER, W. R.; CICCOTTI, L.; RODRIGUES, A. C. **Desastres: Múltiplas Abordagens**. São Paulo: Elsevier, 2017. p. 243-257.

MENDONCA, Marcela. Definição de fotogrametria objetivo da fotogrametria Disponível em:<<https://slideplayer.com.br/slide/1652001/>>: Acesso em 15/03/2023.

MORGENSTERN, N. R. & PRICE, V. E. (1965) The analysis of the stability of general slip surface. *Geotechnique*, v.15, p. 289-290.

Mukhlisin, M. Windri, H. Astuti. Kusumawardani, R. Eni Dwi Wardihani, Bambang Supriyo, **Rapid and low-cost ground displacement mapping using UAV photogrammetry**, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Volume 130,2023,103367, ISSN 1474-7065, <https://doi.org/10.1016/j.pce.103367>. 2023.

Muneza, J.M., Koeva, M.N., Gerke, M., Nex, F., Gevaert, C. **A photogrammetric. approach for map updating using UAV in Rwanda approach for map updating**. *GeoTechRwanda* 1–8. December. 2015

NADIM, F., KJEKSTAD, O., PEDUZZI, P., HEROLD, C., & JAEDICKE, C. **Global landslide and avalanche hotspots**. *Landslides*, 3, 159-173. 2006.

NOGUEIRA, F. R. **Gestão dos Riscos nos Municípios**. In: BRASIL. CARVALHO, C. S. e GALVÃO, T. (orgs.). *Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais*. Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006, p. 26-45.

NOGUEIRA, F; PASSARELLI, S. H; VARALLO, L; The use of the geotechnical charter of suitability for urbanization: Debate on the licensing of the Centro Logístico Campo Grande, Santo André, SP. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v.6, n.9, p.73741-73762sep. ISSN 2525-876, 2020.

NUNES, L. H., **Urbanização e desastres naturais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

OLIVEIRA, A. M. S., BRITO, S. N. A. (1998) **Geologia de Engenharia**, 1. ed. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia e Engenharia, Brasil, 586 p.

Politécnica, n 167, 41 p, 1952.

Rani, M. F. A. Rusli, N. **The accuracy assessment of agisoft photoscan and Pix4D mapper software in orthophoto production** - universiti Teknologi Malaysia Institutional Repository.

In: The 1st Proceeding of Geomatic Research Innovation & Competition (GRIC2017), pp. 1–4. (2018).

ROMANA M. “A geomechanics classification for slopes: Slope Mass Rating”. In HUDSON J. (ed). *Comprehensive Rock Engineering*. S.I. Pergamon, 1993 v.3, p. 575 600.

SALUNKHE, D. P.; CHVAN, G.; BARTAKKE, R. N.; KOTHAVALE, P. R. (2017) An Overview on Methods for Slope Stability Analysis, **International Journal of Engineering Research & Technology**, 6(3):528-535. <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV6IS030496>.

SALVINI, R., VANNESCHI, C., COGGAN, J. S., E MASTROROCCO, G. Evaluation of the use of UAV photogrammetry for rock discontinuity roughness characterization. **Rock Mechanics and Rock Engineering**., 53(8), p. 3699-3720, 2020.

SANTOS JR, O. F. **Mecanismos de ruptura de taludes em solos residuais**. In: 3º Simpósio de Geotecnia do Nordeste, Fortaleza, 2013.

SHAMEKHI, E. (2014). **Probabilistic assessment of rock slope stability using response surfaces determined from finite element models of geometric realizations**. University of British Columbia, DOI: 10.14288/1.0074360.

SILVA, E. M. **Análise de estabilidade de taludes em solos de alteração de rochas metamórficas do quadrilátero ferrífero**. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Pós-graduação de engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2006, 143 p.

SNAVELY, N., SEITZ, S. M., & SZELISKI, R. (2008). Modeling the world from internet photo collections. **International Journal of Computer Vision**, 80(2), 189-210. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>.

SOUSA, M. N. M. (2020). Caracterização química, mineralógica e geotécnica de solos do município de Areia - PB. **Dissertação**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB.

SOUZA G. (2018). **Análise Da Influência Das ConFigurações Dos Pontos De Apoio E Do Voo Na Acurácia De Ortofotomosaicos Elaborados a Partir De Dados De VANT**. **Dissertação**, UFRGS. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/179640>.

SUZIEDELYTE V. J.; PUZIENE, R.; STANIONIS, A.; TUMELIENE, E. Unmanned Aerial Vehicles for Photogrammetry: Analysis of Orthophoto Images over the Territory of Lithuania. **Int. J. Aersp. Eng.** 2016.

TERZAGHI, K. **Mecanismo dos escorregamentos de terra**. São Paulo: revista

THOENI K, GIACOMINI A, MURTAGH R, KNIEST E. A comparison of multi-view 3D reconstruction of a rock wall using several cameras and a laser scanner. In: *International Archives of the Photogrammetry*. **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. v.40, n.5, p 573–580.

TOMINAGA, Lídia Keiko; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosangela do.. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. **Instituto Geológico**. São Paulo. 3 ed. 196 p. 2015.

VARNES, D. J. (1978). Landslides, analysis and control. Special Report 176, National Academy of Sciences, Cap. II.

VARNES, D.J. (1978). *Slope movement types and processes*. Landslides: Analysis and Control. Special Report 176, Transportation Research Board, Washington, pp. 11-33.

VARNES, David J. LANDSLIDE hazard zonation: **a review of principles and practice**. N. 3. 1984.

VIANA, C. D. Análise estrutural de descontinuidades baseadas em técnicas de structure from motion: Aplicação em mina a céu aberto. 2015. 111 f. **Dissertação** (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica - Instituto de Geociências): Universidade de São Paulo, São Paulo SP, 2015.

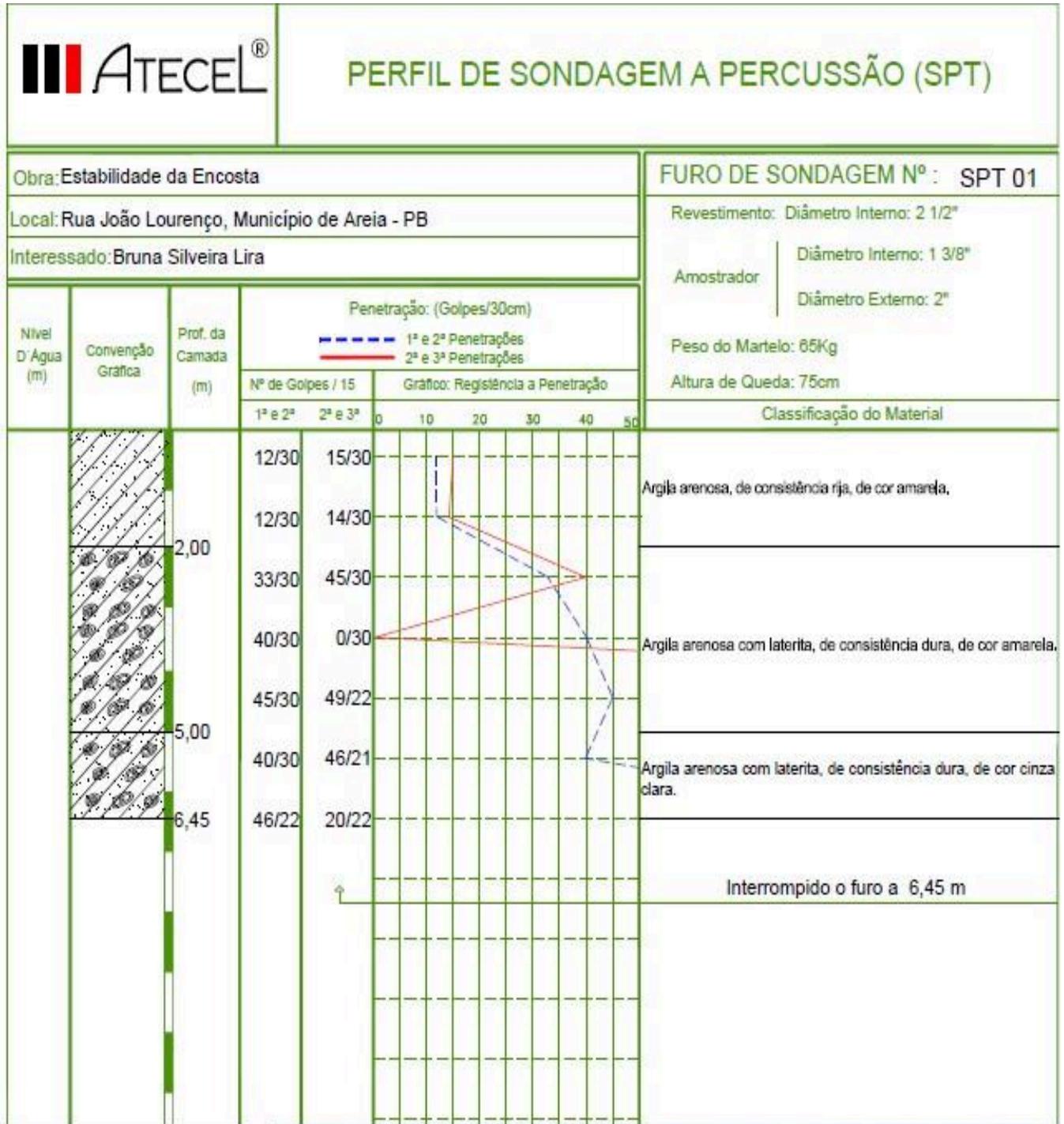
VIVIANI, E.; MANZATO, G. G. **Geração de modelos digitais de superfície por meio de plataformas computacionais com estrutura vetorial e raster**. Ciencia y Engenharia/ Science and Engineering Journal, v. 14, n. 2, p. 27-33, 2005.

WESTEN, C, J. CASTELLANOS, E. KURIAKOSE, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. **Engineering Geology**. doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010.

WINES, D. (2016). A comparison of slope stability analyses in two and three dimensions. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, 116(5), 399-406. <https://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n5a5>.

ANEXOS

A 1 - Perfil de sondagem do Talude da Rua João Lourenço



A 2 - Relatório de processamento de dados GNSS - AREIA – PB.



PROJETO: PONTOS DE CONTROLE – AEROFOTOGRAMETRIA – DANYLO ANDRADE

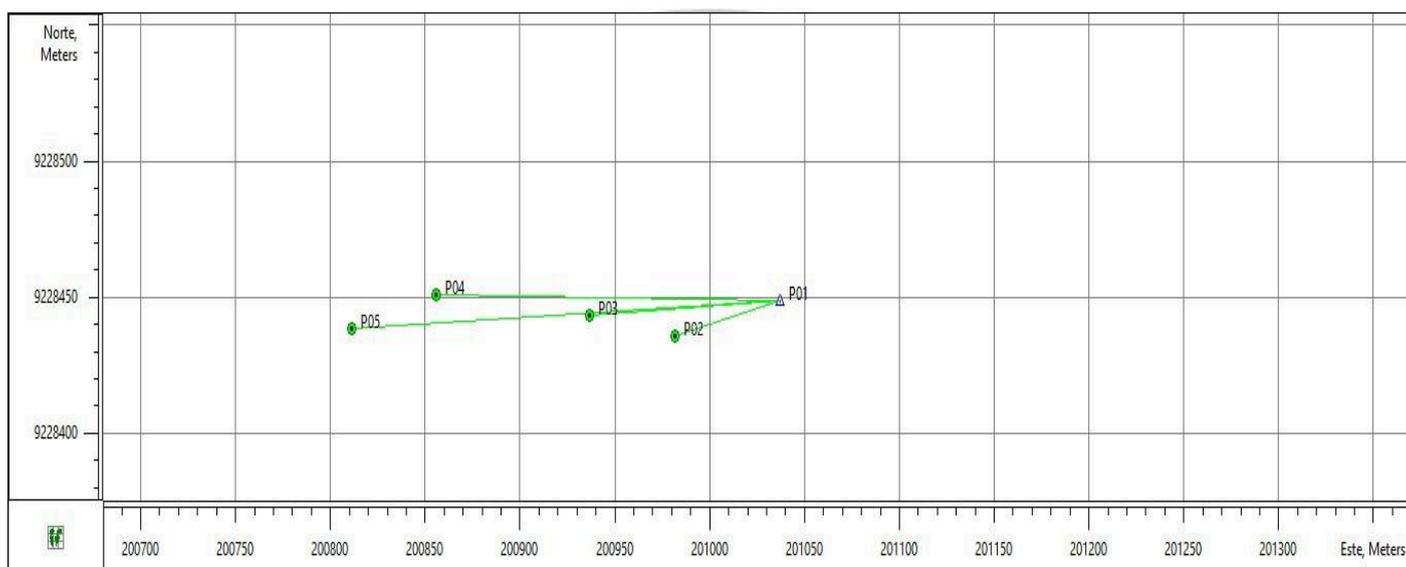
DATA E HORA: 19/09/2022 - 08:00:00 as 12:00:00.

SISTEMA DE COORDENADAS: UTM - FUSO 25 - ZONA M.

DATUM: SIRGAS2000

UNIDADES LINEAR: Metros

SOFTWARE: TOPCON TOOLS – VERSÃO 8.2.3



Sumário de pontos				
Pontos	Malha Norte (m)	Malha Este (m)	Elevação (m)	Tempo de rastreo
P01	9228448,788	201037,335	596,120	4h06m
P02	9228435,540	200981,825	590,127	0h30m
P03	9228443,257	200936,668	584,791	0h30m
P04	9228451,117	200855,839	575,596	0h30m
P05	9228438,282	200811,108	568,427	0h30m

Observações GPS					
Pontos	dN (m)	dE (m)	dZ (m)	Horz RMS (m)	Vert RMS (m)
P01-P02	-13,248	-55,510	-5,993	0,008	0,016
P01-P03	-5,531	-100,667	-11,329	0,006	0,012
P01-P04	2,328	-181,496	-20,524	0,004	0,005
P01-P05	-10,506	-226,227	-27,693	0,008	0,011

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS

GNSS S86S – BASE

- O novo receptor GNSS S86S é capaz de efetuar levantamentos estáticos e cinemáticos;
- Rastreia sinais das constelações GPS L1 C/A, L2E, L2C, L5, GLONASS L1 C/A, L1P, L2 C/A, L2P, SBAS, C/A, L5;
- O receptor permite a operação com ou sem controladora, através do display que mostra as seguintes informações: PDOP, SV, Intervalo de gravação, Coordenadas e Nível da bateria;
- Possibilidade de configurar o Intervalo de gravação e Máscara de elevação sem necessidade de software, diretamente no LCD do receptor;
- A antena que acompanha o sistema é L1/L2 e possui plano terra incorporado, no qual minimiza erros de multicaminho.
- Resistente a poeira e água (IP67);
- Resistente a queda de até 3 metros de altura;
- A antena suporta temperaturas em operação entre -45° C e +60° C;



ESPECIFICAÇÕES

GNSS	
Número de canais	72
GPS	L1 C/A, L1C, L2 C/A, L2E, L5
GLONASS	L1 C/A, L1P, L2 C/A, L2P, L3
Tempo de inicialização	< 10 segundos
Precisão	
Precisão estático Horizontal	± 2.5 mm + 1 ppm
Precisão estático Vertical	± 5 mm + 1 ppm
Capacidade de armazenamento	
Memória	4 GB
Interface de entrada e saída	
01 Porta de transferência de dados de 7 pinos (Serial/USB)	
01 Porta de alimentação de 2 pinos (110/220V)	
Elétrica e consumo	
Bateria	8.800 mAh
Voltagem	7.2 V
Consumo	2 W
Dimensões	165 mm x 168 mm x 122 mm
Peso	1.8 kg com bateria
Operação	
Tela	Resolução 128 x 64 Pixels, 1.54 polegadas
Teclado	Duas teclas funcionais
Led's indicadores	4
Ambiente de trabalho	
Resistente a poeira e água	IP67
Resistente ao choque	2,5 metros de altura (concreto)
Temperatura de trabalho	-45°C~60°C
Temperatura de armazenamento	-55°C~85°C