

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ANÁLISE DE SISTEMAS DE FRATURAS EM MODELO 3D GERADO POR STRUCTURE-FROM-MOTION

Fernanda Aparecida Ferretti

Orientador: Carlos Henrique Grohmann de Carvalho

Co-orientadora: Camila Duelis Viana

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
TF- (2018/12)

São Paulo
2018

De acordo,

Fernanda Aparecida Ferretti



Carlos Henrique Grohmann
(Orientador)



Camila Duelis Viana
(Co-Orientadora)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Sueli, por todo o tipo de apoio que precisei durante a minha vida para chegar até aqui. Mãe, obrigada pelos seus exemplos de justiça e honestidade, os quais fui testemunha. Graças a você, poderei seguir a carreira que amo. Que eu exerça a minha profissão com a mesma dedicação que você dispensa aos enfermos, tornando suas vidas mais dignas nos momentos mais frágeis. Sua força fez meu sonho ser possível!

Agradeço à minha irmã, Flávia, por sempre me incentivar, por torcer pelo meu sucesso. Por toda a sua ajuda, desde a época de escola e pelo companheirismo. Que eu consiga me aproximar de suas qualidades, que eu trilhe meu caminho com a sua simpatia e humildade.

Agradeço ao meu irmão, Filipe, principalmente pelo incentivo nos momentos de desânimo. Por me lembrar que é preciso ser forte. Tê-lo por perto é um privilégio! Obrigada por sempre me ensinar um pouco sobre latim, grego, filosofia e religião em nossas conversas. O seu espírito observador nato é o espírito de um verdadeiro cientista!

Agradeço ao Rodrigo, por sempre incentivar a minha carreira, desde a época do pré-vestibular. Por me fazer acreditar no meu potencial. Por me emprestar ferramentas para acompanhar o curso. Você é um profissional extremamente inteligente, dedicado e competente. Obrigada por me mostrar esse mundo, por me ensinar o que é fazer ciência, pelo companheirismo. Você é admirável e inspirador!

Agradeço à família Regulação pela amizade, pelos votos de sucesso e pelo meu indispensável martelo.

Agradeço ao meu orientador Carlos Henrique Grohmann de Carvalho e à minha co-orientadora Camila Duelis Viana por terem aceitado me orientar e pela paciência.

Agradeço ao Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT-USP), em especial, à equipe de microscopia, pela compreensão da minha ausência em diversos momentos.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a Deus por nos conceder a natureza para desfrutá-la e inteligência para entendê-la.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a reconstrução tridimensional de uma frente de lavra inativa a partir da técnica de *Structure from Motion* e *Multi-View Stereo* (SfM-MVS) e a análise estrutural de suas descontinuidades. Com os resultados obtidos, foi possível realizar a análise cinemática do maciço rochoso.

Localizada no município de Campinas, a Pedreira Jardim Garcia é composta por rochas maficas intrusivas da Formação Serra Geral. Hoje, a área é utilizada para atividades recreativas da população local. O afloramento de orientação SSE-NNW consiste em uma exposição extremamente fraturada. Uma vez que as descontinuidades são parâmetros fundamentais para se avaliar a estabilidade de maciços rochosos, conhecer suas características físicas torna-se um trabalho indispensável para qualquer obra geotécnica. Muitas vezes, realizar um levantamento estrutural pelo método tradicional em locais de difícil acesso consome muito tempo, podendo até mesmo ser uma atividade perigosa. Nesse contexto, a fotogrametria digital surge como uma alternativa para auxiliar o mapeamento de estruturas de um afloramento através de um modelo tridimensional. A técnica SfM-MVS vem ganhando espaço em estudos geológicos, uma vez que se mostra eficiente e barata.

Os resultados obtidos foram utilizados para realizar uma análise cinemática que aponta diferentes riscos de escorregamento planar, ruptura em cunha e tombamento. O uso da técnica neste trabalho reforça que a aplicação de novas tecnologias facilita as atividades de campo em levantamentos geológicos-estruturais.

ABSTRACT

The goals of this work are the development of a three-dimensional model of an inactive quarry using Structure-from-Motion and Multi-View Stereo (SfM-MVS) and the structural analysis of its discontinuities. With the results, it was possible to perform the kinematic analysis of the rock mass.

Situated at outskirts of Campinas City, the Jardim Garcia quarry is composed of mafic intrusive rocks from Serra Geral Formation. The outcrop is located on the west side of the quarry, a 25 m high and 200 m long NNW-SSE rock wall, approximately. The outcrop with SSE-NNW orientation consists in a highly fractured exposition. Once the discontinuities are fundamental parameters to evaluate the stability of a rock mass, to know its physical characteristics is imperative to any geotechnical work. Usually, to perform a structural survey by traditional method in places of hard access takes lots of time, and can even be a dangerous activity. In this context, the digital photogrammetry comes as an alternative to aid the structural mapping of an outcrop through a three-dimensional model. The SfM-MVS technique has been gaining popularity for this, once it is efficient and cheap.

The obtained results were employed to perform a kinematic analysis that shows different risks of plane, wedge and toppling failures. The use of the technique in this work reinforces that the employment of new technologies helps the field work in geological survey.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo. A Pedreira Jardim Garcia (destacada pelo polígono) localiza-se no município de Campinas (SP), na altura do km 98 da Rodovia Anhanguera (SP-330), a leste da Rodovia Bandeirantes (SP-348). O Ribeirão do Piçarrão corre na porção sul do afloramento (gerado por QGIS 2.8.2 com imagens do Google Earth, Datum WGS 84 Zona 23S).	2
Figura 2. Mapa geológico do município de Campinas, SP. O polígono destaca a região onde a área de estudo está localizada. Em verde, região de diabásios dos períodos Jurássico-Cretáceo. Em azul, abaixo do ribeirão do Piçarrão, ritmitos do Subgrupo Itararé dos períodos Carbonífero-Permiano (Modificado de Fernandes et al. 1993).	6
Figura 3. Exemplo para cálculo de espaçamento real entre famílias de descontinuidades (ISRM, 1978).	10
Figura 4. Perfis de rugosidade e seus intervalos correspondentes de JRC (Barton & Choubey, 1977).	11
Figura 5. Figura esquemática exibindo as propriedades geométricas primárias de descontinuidades em rocha (Hudson & Harrison, 1997)	12
Figura 6. Efeito das propriedades da juntas na estabilidade de taludes: (a) juntas persistentes J1 mergulham para fora da face do talude gerando uma potencial instabilidade ao formar blocos deslizantes; (b) juntas com baixa persistência e pouco espaçadas geram um emaranhado de pequenos blocos; (c) juntas persistentes J2 mergulhando para dentro da face gerando um potencial tombamento de placas (Traduzido de Wyllie & Mah, 2005).	16
Figura 7. Principais tipos de blocos em taludes e suas prováveis condições da geologia estrutural causadoras: (a) plano de descontinuidade em rocha contendo juntas persistentes mergulhando para fora do talude e direção paralela à face; (b) bloco em cunha em duas descontinuidades que se interceptam; (c) bloco de tombamento em rocha dura contendo descontinuidades com mergulho íngreme na face do talude; e (d) ruptura circular em rocha de preenchimento, muito fraca ou rocha com fraturas muito próximas com orientação aleatória das descontinuidades (Traduzido de Wyllie & Mah, 2005).	17
Figura 8. Análise cinemática de blocos rochosos em taludes: (a) conjunto de descontinuidades no talude; (b) zonas críticas em estereograma de igual área (modificado de Wyllie and Mah, 2005).	17
Figura 9. Combinação entre análise cinemática e estabilidade utilizando o conceito de cone de atrito: (a) cone de atrito em relação ao bloco sobre um plano inclinado (i.e. $\phi > \psi_p$); e (b) projeção estereográfica do cone de atrito sobreposto às zonas críticas (modificado de Wyllie and Mah, 2005).	19
Figura 10. Fluxograma geral das etapas de Structure from Motion (Furukawa & Hernandez, 2015)	20

Figura 11. Resultado após uso de SfM. A projeção de um ponto Pj do objeto 3D na imagem da câmera no tempo/posição k resulta no ponto 2D rastreado pj,k.(Kurz, et al., 2011).....	21
Figura 12. Fluxograma geral das etapas de SfM-MVS. No sentido horário: imagens de entrada, imagens posicionadas, geometria 3D reconstruída, geometria 3D texturizada (Furukawa & Hernandez, 2015).....	21
<i>Figura 13. Equipamentos utilizados para a coleta de dados para georreferenciamento do maciço rochoso. Acima à esquerda, dGPS modelo Spectra Precison SP60; à direita, estação total modelo Topcon GPT 3200NW. Abaixo, drone modelo DJI Phantom 4Pro com câmera acoplada utilizado para a aquisição das imagens fotográficas do afloramento.....</i>	26
Figura 14. Pontos de controle irradiados a partir da estação total. Coordenadas UTM Datum WGS 84 Zona 23S (Grohmann et al., 2018).	27
Figura 15. Parâmetros de configuração do algoritmo RANSAC Shape Detection.	28
Figura 16 Modelo 3D da frente de lavra inativa da pedreira Garcia gerado pelo PhotoScan.	29
Figura 17 Modelo 3D da frente de lavra Pedreira Garcia reconstruído a partir de um conjunto de fotografias. A visualização em perspectiva facilita o reconhecimento das três dimensões.	29
Figura 18. Planos de fratura selecionados através do MeshLab. A frente de lavra oeste foi dividida em três setores (linhas em ciano) levando em consideração a predominância das atitudes observadas visualmente.....	30
Figura 19. Alguns planos de fraturas encontrados pelo algoritmo RANSAC Shape Detection, através do CloudCompare. A imagem exibe apenas alguns planos para facilitar a visualização do afloramento.....	30
Figura 20. Setor Vermelho (acima). À esquerda (abaixo), detalhe de dois planos selecionados através do MeshLab. À direita (abaixo), planos encontrados pelo CloudCompare que facilitam a visualização da sua intersecção.	31
Figura 21. Setor Amarelo (acima). À esquerda (abaixo), detalhe de dois planos selecionados através do MeshLab. No centro (abaixo), pontos da nuvem densa utilizados para encontrar planos. À direita (abaixo), planos encontrados pelo CloudCompare que facilitam a visualização de sua intersecção.	32
Figura 22. Projeções estereográficas geradas pelo OpenStereo planos de fraturas selecionados manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita) dos três setores do afloramento.....	33
Figura 23. Projeções estereográficas geradas pelo OpenStereo dos planos de fraturas selecionados manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita) dos três setores do afloramento.....	34

Figura 24. Projeções estereográficas geradas pelo OpenStereo dos planos de fraturas selecionados manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita) dos três setores do afloramento.....	35
Figura 25. Projeções estereográficas geradas pelo OpenStereo dos planos de fraturas selecionados manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita) dos três setores do afloramento.....	36
Figura 26. Visão em perspectiva do setor Azul. A imagem exibe os planos selecionados através do MeshLab (em azul).....	37
Figura 27. Visão em perspectiva das fraturas que compõe a atitude média do talude (em branco) do setor Azul, cuja medida é 081/86.	37
Figura 28. Visão em perspectiva do setor Vermelho. A imagem exibe os planos selecionados através do MeshLab (em vermelho). ..	38
Figura 29. Visão em perspectiva das fraturas que compõe a atitude média do talude (em rosa) do setor Vermelho, cuja medida é 066/88.	38
Figura 30. Visão em perspectiva do setor Amarelo. A imagem exibe os planos selecionados através do MeshLab (em amarelo). ..	39
Figura 31. Visão em perspectiva das fraturas que compõe a atitude média do talude (em mostarda) do setor Amarelo, cuja medida é 076/87.....	39
Figura 32. Análise cinemática do setor Azul das fraturas selecionadas manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita). A projeção exibe o talude (verde), o cone de atrito (roxo) para um ângulo de 35°, o daylight envelope e os limites laterais (ambos em preto). ..	41
Figura 33. Análise cinemática do setor Vermelho das fraturas selecionadas manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita). A projeção exibe o talude (verde), o cone de atrito (roxo) para um ângulo de 35°, o daylight envelope e os limites laterais (ambos em preto). ..	41
Figura 34. Análise cinemática do setor Amarelo das fraturas selecionadas manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita). A projeção exibe o talude (verde), o cone de atrito (roxo) para um ângulo de 35°, o daylight envelope e os limites laterais (ambos em preto). ..	42
Figura 35. Estereogramas da análise cinemática do setor Azul indicando ruptura em cunha (à esquerda) e tombamento de blocos (à direita). A seta indica a direção do deslizamento.	43
Figura 36. Estereogramas da análise cinemática do setor V indicando ruptura em cunha (à esquerda) e tombamento de blocos (à direita). A seta indica a direção do deslizamento.	44
Figura 37. Visão geral do afloramento.....	51
Figura 38. Equipamentos utilizados para a coleta de dados para georreferenciamento do maciço rochoso. À esquerda, dGPS modelo Spectra Precison SP60. À direita, estação total modelo Topcon GPT 3200NW.....	51

Figura 39. Drone modelo DJI Phantom 4Pro com câmera acoplada utilizado para a aquisição das imagens fotográficas do afloramento.....	52
Figura 40. Resultado da missão do drone com o objetivo de obter 80% de sobreposição entre as imagens. Os retângulos azuis representam as fotografias obtidas em cada parada e alinhadas no software PhotoScan. Notar posição da câmera (fotografias).....	53
Figura 41. Resultado da geração de nuvem esparsa de pontos pelo software PhotoScan...53	
Figura 42. Resultado da geração de nuvem densa de pontos pelo software PhotoScan. Apesar das cores serem parecidas com a original, os pixels ainda não contêm os valores reais da textura, que será inserida na etapa final.....	53
Figura 43. Visão geral do mesh gerado a partir da nuvem densa de pontos da área de estudo.	54
Figura 44. Detalhe do mesh gerado a partir da nuvem densa de pontos da frente de lavra da Pedreira Garcia. Notar polígonos triangulares.	54
Figura 45. Modelo 3D da frente de lavra Pedreira Garcia reconstruído a partir de um conjunto de fotografias. A visualização em perspectiva facilita o reconhecimento das três dimensões.	54
Figura 46. Localização da câmera e sobreposição de imagem. Imagem obtida pelo relatório gerado pelo PhotoScan.....	61
Figura 47. Informações sobre a câmera obtidas pelo relatório gerado pelo PhotoScan.....	61
Figura 48. Parâmetros de processamento obtidos pelo relatório gerado pelo PhotoScan. ...62	

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais sistemas de classificação de maciços rochosos (Coşar, 2004).....	13
Tabela 2 Classificação da qualidade da rocha a partir do valor, em porcentagem, do RQD (Traduzido de Deere & Deere, 1989).....	15
Tabela 3. Resumo da quantidade de planos obtidos.	33
Tabela 4. Resumo das atitudes médias das famílias de fraturas encontradas por diferentes algoritmos.	36
Tabela 5. Resumo da atitude média dos taludes.	40
Tabela 6. Resumo de valores para ângulo de atrito do basalto.....	40

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Localização Da Área De Estudo	2
2	METAS E OBJETIVOS	3
3	TRABALHOS PRÉVIOS	4
3.1	Geologia Regional	4
3.1.1	Bacia do Paraná	4
3.1.2	Formação Serra Geral.....	5
3.2	Geologia Local.....	5
3.3	Caracterização de Material Rochoso	8
3.4	Caracterização de Descontinuidades em Maciços Rochosos	8
3.5	Classificação de Maciços Rochosos	12
3.6	Análise Cinemática.....	15
3.7	Structure from Motion – Multi-View Stereo	20
3.8	Estado da Arte de Análise de Afloramentos Digitais	22
4	MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1	Agisoft PhotoScan	23
4.2	MeshLab	24
4.3	CloudCompare.....	24
4.4	OpenStereo.....	24
4.5	Atividades	25
5	RESULTADOS OBTIDOS	29
6	INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	43
7	CONCLUSÕES	46
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
	APÊNDICE A – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A COLETA DE DADOS DE CAMPO	51
	APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS PELO PHOTOSCAN	53

**APÊNDICE C – DADOS DE COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE
CALCULADOS E DADOS DE ATITUDES CALCULADOS PELO ALGORITMO PLY2ATTI..**

.....55

ANEXO A – RELATÓRIO DE EXECUÇÃO DO PHOTOSCAN.....61

Parâmetros de Processamento.....62

1 INTRODUÇÃO

O estudo da geologia estrutural é fundamental em diversas áreas aplicadas como a geotecnia. A caracterização de maciços rochosos se faz necessária do ponto de vista da segurança e sucesso na execução das obras, bem como o seu descomissionamento. Características como a geometria, dimensão, direção e sentido de estruturas geológicas são analisadas com a finalidade de estabelecer uma relação com o meio e determinar a sua influência na movimentação dos maciços.

A utilização de tecnologias na resolução de problemas geológicos/geotécnicos vem ganhando cada vez mais espaço no levantamento de dados de campo. A praticidade, o baixo custo e a alta capacidade de armazenamento e processamento de dados são alguns pontos que chamam a atenção para o uso de *hardware* e *software* inovadores.

A combinação entre métodos clássicos e a tecnologia digital - em especial, técnicas de reconstrução de modelo em três dimensões a partir de imagens, como *Structure from Motion* (SfM) – mostra-se conveniente uma vez que os produtos gerados se tornam mais precisos devido os diferentes meios de aquisição e tratamento dos dados geológicos. Sendo assim, o presente trabalho visa a análise estrutural de descontinuidades em um maciço rochoso baseada em *Structure from Motion*.

Foi escolhida a Pedreira Jardim Garcia como área de estudo para que a técnica de SfM pudesse ser aplicada. A frente de lavra inativa conta com um extenso paredão de rocha basáltica, de orientação SSE-NNW e com 25 metros de altura por 200 metros de extensão, aproximadamente. A aquisição de dados estruturais em pedreiras pode se tornar uma atividade lenta e perigosa devido ao grande número de dados a serem coletados e ao difícil acesso de áreas com grandes dimensões e/ou instáveis. Consequentemente, a fotogrametria digital, em especial SfM, apresenta-se como uma alternativa rápida e segura para a identificação dessas estruturas (Viana *et al.*, 2016). Além disso, o baixo custo na aquisição dos dados tridimensionais, a oportunidade de utilização por usuários sem especialização e a baixa necessidade de supervisão são pontos favoráveis na escolha da técnica.

Foram obtidas fotografias do afloramento com o auxílio de um *drone* que serviram de base para a geração do modelo 3D do afloramento no *PhotoScan*. No *MeshLab*, os planos de fratura foram selecionados e suas atitudes calculadas pelo algoritmo *ply2atti*. A atitude média dos taludes foi encontrada através do *CloudCompare*. A partir das projeções estereográficas geradas pelo *OpenStereo*, foi realizada uma análise cinematográfica.

1.1 Localização Da Área De Estudo

A Pedreira Jardim Garcia está localizada no município de Campinas, no Estado de São Paulo. O acesso ao afloramento se dá pela Rodovia Anhanguera SP-330/BR-050, km 98, às margens do Ribeirão do Piçarrão, conforme Figura 1. A área da pedreira é formada por três frentes de lavra inativas. Os trabalhos foram realizados na frente oeste que conta com um extenso paredão de rocha basáltica com 25 metros de altura por 200 metros de extensão, aproximadamente. Atualmente, a propriedade privada é mantida pela prefeitura municipal como área recreativa para a população onde é comum a prática esportiva de caminhada, escalada e aeromodelismo.

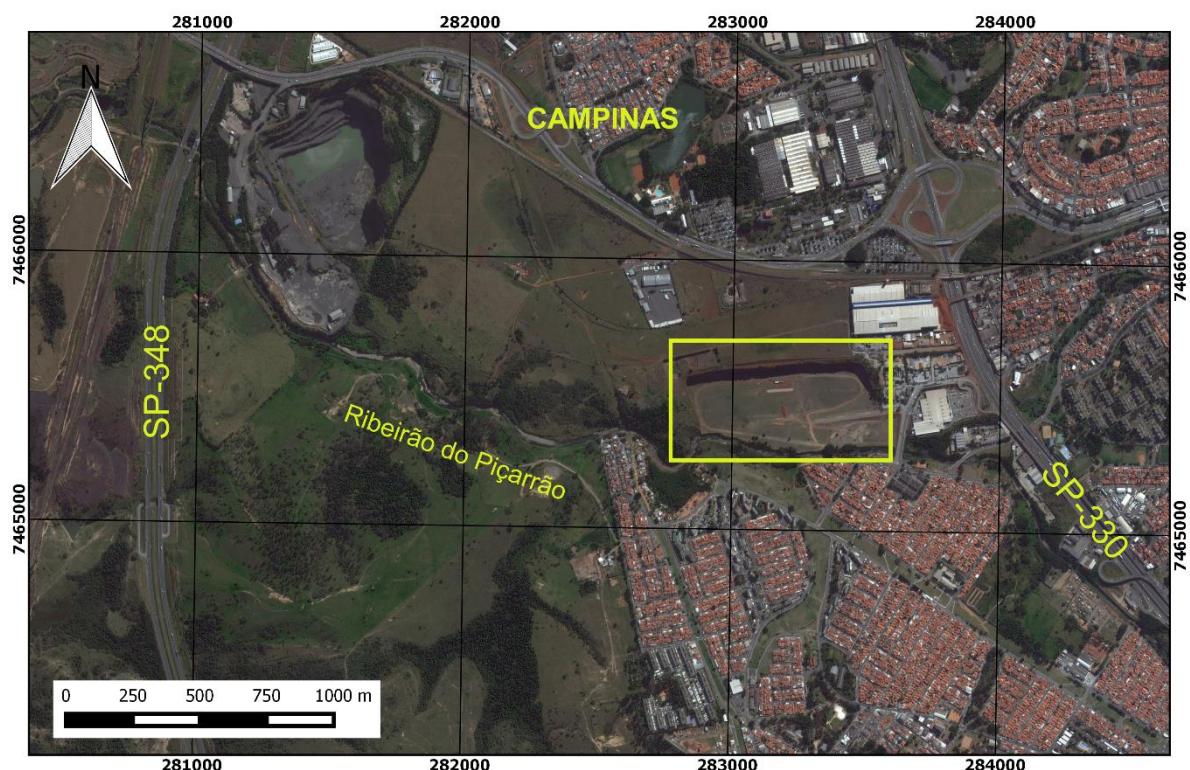


Figura 1. Localização da área de estudo. A Pedreira Jardim Garcia (destacada pelo polígono) localiza-se no município de Campinas (SP), na altura do km 98 da Rodovia Anhanguera (SP-330), a leste da Rodovia Bandeirantes (SP-348). O Ribeirão do Piçarrão corre na porção sul do afloramento (gerado por QGIS 2.8.2 com imagens do Google Earth, Datum WGS 84 Zona 23S).

2 METAS E OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a reconstrução tridimensional de uma frente de lavra inativa a partir da técnica de *Structure from Motion* e a análise estrutural de suas descontinuidades. Com os resultados obtidos, foi possível realizar a análise cinemática do maciço rochoso. Para alcançar esse objetivo foram realizadas diversas etapas envolvendo trabalho de campo e de escritório.

As etapas planejadas para a aquisição e tratamento de dados de campo estão descritas abaixo.

- Etapa de campo:
 - Obter imagens do afloramento com câmera fotográfica digital acoplada em *drone*;
 - Coletar pontos de controle utilizando estação total e GPS diferencial.
- Tratamento de dados:
 - Organizar os dados coletados em campo;
 - Utilizar o software *Agisoft PhotoScan* para realizar a restituição fotogramétrica;
 - Utilizar o software *MeshLab* para selecionar as descontinuidades a partir do modelo 3D gerado;
 - Utilizar o software *CloudCompare* para encontrar a altitude média dos taludes;
 - Calcular as medidas de altitudes pelo algoritmo *ply2atti* dos planos selecionados;
 - Utilizar o software *OpenStereo* para realizar a projeção e análise estrutural das descontinuidades.
- Análise dos resultados obtidos
 - Identificar famílias de descontinuidades;
 - Realizar a análise cinemática, distinguindo os diferentes tipos de ruptura possíveis.

3 TRABALHOS PRÉVIOS

3.1 Geologia Regional

3.1.1 Bacia do Paraná

Localizada na Plataforma Sul Americana, a Bacia do Paraná é classificada como uma bacia intracratônica e compreende uma área de 1.700.000 km² na região centro-leste da América do Sul entre o Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai. Seus sedimentos chegam a 4000 metros de espessura e sua estratigrafia é subdividida em cinco sequências principais as quais se desenvolveram desde o Meso-Ordoviciano até o final do Cretáceo (Machado *et al.*, 2005). Milani *et al.* (2004) divide a Bacia do Paraná em seis supersequências: Rio Avaí, Paraná, Gondwana I, Gondwana II, Gondwana III e Bauru. A deposição dos sedimentos se inicia com sequências típicas de ciclos transgressivos-regressivos e termina com arenitos conglomeráticos polimíticos recobrindo um extenso derrame de lava denominado Formação Serra Geral.

As três primeiras supersequências correspondem a ciclos transgressivo-regressivos enquanto as três últimas correspondem a pacotes de sedimentação continental, além de rochas ígneas associadas. Durante o Gondwana III, iniciou-se o processo da quebra do supercontinente Gondwana, evento que pode ser relacionado ao hotspot Tristão da Cunha. Durante essa supersequência, ocorreu um grande evento magmático, que resultou em uma extensa área coberta de derrames basálticos (Milani *et al.*, 2007).

O embasamento da Bacia do Paraná passava por um estágio de cratonização durante o período Cambro-Ordoviciano, cuja movimentação vertical impedia os sedimentos de preencherem a bacia. Durante o Siluriano, a sedimentação se desenvolveu sob aulacógenos de orientação preferencial NW-SE e posteriormente, com a formação do Arco de Assunção, zonas de fraquezas do embasamento foram reativadas permitindo a deposição devoniana nessas áreas. No Devoniano Médio ocorreu o primeiro evento sedimentar de caráter basinal representado pelo Grupo Paraná, representados pelas formações Furnas e Ponta Grossa. Neste momento, a sedimentação era controlada pelos movimentos da aglutinação de placas que formariam o supercontinente Pangea ao final do Carbonífero. Nessa época, ocorreram soerguimentos no interior da placa que geraram falhamentos no Grupo Paraná. No Permo-Triássico, o levantamento dos Andes Meridionais associado a movimentação tectônica positiva do assoalho da bacia geram condições extremas de deposição, e que agravadas pelas mudanças climáticas, deram origem às formações Piramboia e Botucatu. Ao final do Mesozoico, o período Jurássico-Cretáceo foi marcado por intenso vulcanismo que se

aproveitou das fraturas dos antigos aulacógenos constituindo enxames de diques de diabásio (Fulfaro, 1982). Os eventos acarretaram na formação de diversos corpos magmáticos como sills e diques que ocuparam zonas de fraqueza reativadas, além de arcos e lineamentos por todas as bacias da Plataforma (De Almeida, 1986).

3.1.2 *Formação Serra Geral*

As intrusões e derrames de lavas da Formação Serra Geral são relacionadas a um vulcanismo de fase rifte de idade neojurássica e eocretácea pré-aptiana. Seu desenvolvimento pode ter sido condicionado à presença do hotspot de Tristão da Cunha, durante o evento de separação do supercontinente Gondwana, e consequente abertura do oceano Atlântico Sul. Do ponto de vista químico, os basaltos são predominantemente toleíticos, com variações marcantes (Almeida *et al.*, 1996), podendo ser divididos entre domínios com alto e baixo teor de Ti (Rossetti *et al.*, 2018). Segundo Frank *et al.* (2009), os derrames basálticos recobriram uma área de cerca de 917 mil km² dos sedimentos da Bacia do Paraná, ocupando um volume de, no mínimo, 600 mil km³. Suas lavas formam pilhas entre 700 e 1750 metros de espessura (Piccirillo & Melfi, 1988).

3.2 Geologia Local

O município de Campinas está localizado no estado de São Paulo, dentro do compartimento geomorfológico ocidental, a Depressão Periférica. As porções leste e sudeste do município são majoritariamente compostas por gnaisses xistosos, gnaisses bandados, granitos gnáissicos, granitoides e milonitos proterozoicos. A porção sul e parte da porção oeste afloram rochas da Bacia do Paraná, como o Subgrupo Itararé com seus arenitos, ritimitos e diamictitos dos períodos Carbonífero-Permiano. Já na porção oeste e noroeste, afloram diabásios, predominantemente na forma de sills, dos períodos Jurássico-Cretáceo. Aluviões do período Quaternário cortam todo o município. A Figura 2 mostra o mapa geológico do município de Campinas e a região onde os trabalhos estão sendo realizados.

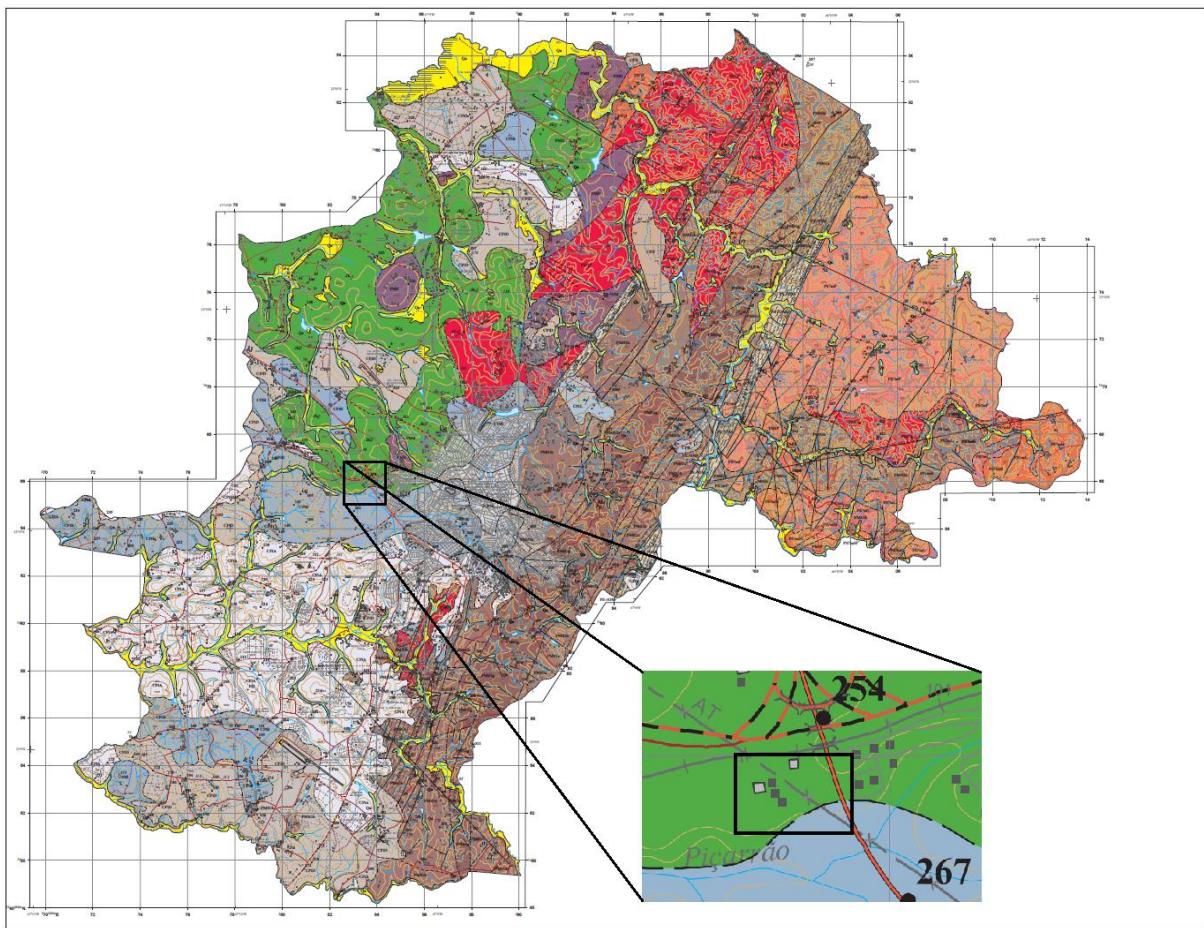


Figura 2. Mapa geológico do município de Campinas, SP. O polígono destaca a região onde a área de estudo está localizada. Em verde, região de diabásios dos períodos Jurássico-Cretáceo. Em azul, abaixo do ribeirão do Piçarrão, ritmitos do Subgrupo Itararé dos períodos Carbonífero-Permiano (Modificado de Fernandes et al. 1993).

Duas zonas de cisalhamento ocorrem praticamente paralelas entre si na porção NNE do município de Campinas e cortam rochas proterozóicas: a zona de cisalhamento Campinas (ZCC) e a zona de cisalhamento Valinhos (ZCV) que possuem direção NE-SW.

Os diabásios da região possuem granulação fina a média e estrutura maciça. Veios de gabbro de altitude sub-horizontal em meio a diabásio de textura fina sugerem a formação de fraturas com a mesma orientação concomitante ao evento magmático gerador dessas rochas (Fernandes, 1997).

Foram identificados cinco eventos tectônicos cenozoicos geradores de falhas transcorrentes, e subordinadamente, falhas extensionais e compressivas que afetaram as rochas da Bacia do Paraná, na região de Campinas e seu entorno. Cada evento gerou diferentes estruturas nos distintos tipos litológicos. Nos diabásios, foi observada grande quantidade de fraturas das quais a maioria apresenta mergulhos subverticais, além de falhas com estrias. Fraturas conjugadas com mergulho de alto ângulo, acima de 70°, também são observadas nos depósitos cenozoicos. Ambas estruturas são muito persistentes, na ordem

de metros a decâmetros e suas superfícies são muito planas e pouco rugosas. Os espaçamentos variam da ordem de centímetro a metros. Nas rochas do embasamento, espaçamento, dimensão e distribuição das descontinuidades variam de acordo com as características mineralógicas e texturais de cada litotipo. Deformações do tipo rúptil-dúctil afetam apenas os gnaisses, mesmo quando ocorrem diabásios associados, indicando se tratar de um evento pré-Cretáceo (Fernandes, 1997).

Fernandes (1997) relaciona falhas de grande relevo observadas no Grupo Itararé a eventos tectônicos concomitantes com a colocação de corpos de diabásio durante o EoCretáceo, uma vez que a orientação dessas estruturas se assemelha à direção de estruturas maiores no Arco de Ponto Grossa, com orientação NE-SW e NW-SE no litoral paulista.

Dos regimes transcorrentes pelo qual os diabásios foram submetidos, o denominado T₀1NE foi identificado como sendo o mais antigo. Ele teria ocorrido ao término do magmatismo Serra Geral, pois não são encontradas estruturas relacionadas em depósitos cenozoicos (Fernandes, 1997). A autora relaciona este regime à Zona de Transferência do Rio de Janeiro, de direção EW e caráter sinistral, bem como às transcorrências EW sinistrais ocorridas entre o Paleógeno e o Neógeno. O evento seria o responsável pela geração de fraturas conjugadas com orientação N-S a N15E dextrais e E-W a N70E sinistrais nos diabásios, falhas com a mesma direção nas rochas pré-Cambrianas e falhas sinistrais EW a N70E, dextrais NS a N20E, além de fraturas de baixo ângulo nas rochas do Grupo Itararé.

Fernandes (1997) descreve os quatro eventos tectônicos posteriores ocorridos entre os períodos Neogênico e Quaternário que foram responsáveis pela geração de estruturas rúptis nas diversas litotipos. O evento neogênico T₀1EW gerou falhas sinistrais na direção N45-65W e dextrais N45-65, além de fraturas conjugadas com direções entre N70W e N85E. Durante o Quaternário, outros três eventos se desenvolveram. O evento T₀1NW são representadas por falhas transcorrentes dextrais EW a N75W, ou EW a N80E, associadas às falhas transcorrentes sinistrais N10-25W a NS-N05E. Estrias com diferentes cimentos e orientações sugerem rotação dos esforços principais sob condições de pulsos de atividade tectônica. Também são relacionadas fraturas conjugadas e fraturas NW com estrutura de tração. Falhas transcorrentes dextrais N35-50W e sinistrais N30-50E, fraturas conjugadas e fraturas EW de baixo ângulo foram geradas pelo evento denominado T₀1NS. O evento T₀1NNE é interpretado como uma reativação dos planos de falhas gerados nos eventos anteriores, pois as estruturais apresentam sentido contrário de movimento. Falhas EW que anteriormente eram dextrais no evento T₀1NW, apresentam sentido sinistral. Observa-se

fraturas conjugadas N40W, com baixo ânulo de mergulho truncando falhas EW e NS do evento Tσ1NW.

Todos os cinco eventos tectônicos identificados por Fernandes (1997) afetaram as rochas gnáissicas e graníticas do embasamento, o Grupo Itararé e os depósitos cenozoicos, com geração de falhas sinistrais e dextrais e fraturas em maior ou menor proporção.

3.3 Caracterização de Material Rochoso

A caracterização de um material rochoso se dá pela descrição e medição de suas propriedades litológicas. Suas propriedades podem ser observadas em amostras de mão, as quais podem passar por testes de laboratório (NRCS, 2012). Nesta seção, abordaremos as propriedades relativas às rochas ígneas e sua importância em um projeto geotécnico.

A identificação da unidade da rocha descrita em mapas (e.g. Basalto Serra Geral) auxilia o início dos trabalhos. O tipo de rocha é baseado em sua origem, estrutura, composição e tamanho do grão. Apesar de parecer simples, o tipo de rocha pode indicar processos que atuaram na rocha durante e após a sua formação, contribuindo para o estudo das estruturas presentes. A dureza de uma rocha depende do seu tipo e pode ser alterada por intemperismo físico ou químico. Ela se dá pela resistência à deformação permanente, como indentação ou abrasão e é importante pois pode prover estimativas razoáveis quanto à força do material rochoso visando uma classificação frente a uma escavação. A resistência à deformação por forças externas sobre uma rocha é denominada força. Cada tipo de rocha possui um valor de força que depende da mineralogia, textura, laminação, etc, e que pode ser alterado devido a presença de descontinuidades. A cor é uma propriedade que muitas vezes se torna subjetiva pois depende do observador, mas que sugere o estado de intemperismo da rocha. Colorações peculiares como tons de vermelho, amarelo, laranja e marrom indicam lixiviação de Fe⁺² (NRCS, 2012).

As propriedades físicas descritas também podem ser verificadas em escala de afloramento. Porém, é importante lembrar que algumas propriedades como a força terão valores diferentes, uma vez que, seu valor *in situ* (maciço rochoso) será menor do que em uma amostra de laboratório, que se comportará como um material intacto (NRCS, 2012).

3.4 Caracterização de Descontinuidades em Maciços Rochosos

No campo da geologia utilizam-se muitos termos que, vez ou outra, podem dificultar a compreensão de qual fenômeno ou característica está sendo estudada. Sendo assim, faz-se necessário uma descrição dos termos aqui utilizados para melhor compreensão do objeto de

estudo abordado neste trabalho. As descrições abaixo são traduções diretas do manual de sugestões da *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1978).

Descontinuidade: termo geral para qualquer descontinuidade mecânica em um maciço rochoso com zero ou pouca resistência à tração. É o termo coletivo para a maioria dos tipos de juntas, fracos planos de acamamento, fracos planos de xistosidade, zonas de fraqueza e falhas.

Junta: quebra de origem geológica na continuidade de um corpo de rocha ao longo da qual não há deslocamento visível. Um grupo de juntas paralelas é chamada de família e um conjunto de famílias que se intersectam formam um sistema de juntas.

Falha: fratura ou zona de fratura ao longo da qual há deslocamento reconhecível, em escala de alguns centímetros a alguns quilômetros. As paredes são frequentemente estriadas e polidas (espelho de falha) resultado do deslocamento cisalhante.

Um conjunto de descontinuidades com mesma orientação preferencial é denominada família. O número de famílias influencia a quantidade de interações possíveis na formação de blocos e no seu tamanho, assim como no espaçamento e a persistência em um maciço rochoso (ISRM, 1978).

Uma vez que a segurança e o sucesso das obras de engenharia dependem de uma boa análise estrutural, é fundamental que alguns parâmetros das descontinuidades sejam cuidadosamente observados e suficientemente descritos.

O grau de detalhamento de um levantamento de descontinuidades varia de acordo com cada projeto de engenharia. É possível realizar dois tipos de abordagem no levantamento: uma subjetiva, onde apenas as descontinuidades aparentemente mais importantes são descritas; e a objetiva, onde todas as descontinuidades são descritas. Apesar dessa última abordagem ser mais detalhada, ela é muito demorada devido ao grande número de dados. Independentemente do tipo de abordagem, a *International Society for Rock Mechanics* sugere uma mesma metodologia de descrição quantitativa dos parâmetros das descontinuidades. Além da litologia, os parâmetros a serem descritos são: orientação, espaçamento, persistência, rugosidade, abertura, preenchimento, número de famílias e tamanho do bloco (ISRM, 1978).

Na orientação, mede-se rumo do mergulho e o mergulho de um plano de uma descontinuidade e é desejável que se faça o maior número de medidas possíveis. A representação das orientações do afloramento pode ser feita através de blocos diagramas, diagrama em roseta ou em projeções esféricas (ISRM, 1978).

O espaçamento entre duas descontinuidades adjacentes de uma mesma família determinará o tamanho de blocos individuais e influencia fortemente a permeabilidade e as condições de infiltração do maciço (ISRM, 1978). Segundo Priest e Hudson (1981), o espaçamento médio (x) e a frequência (λ) de descontinuidades são dados pelas seguintes equações:

$$x = \frac{L}{N}$$

$$\lambda = \frac{N}{L} = \frac{1}{x}$$

onde, N é o número total de descontinuidades que interceptam a linha de amostragem, cujo comprimento da linha é dado por L .

O espaçamento médio não leva em consideração a orientação da linha de amostragem, sendo assim, pode-se calcular o espaçamento real (S) através da equação:

$$S = d_m \operatorname{sen}\alpha$$

onde, d_m é o espaçamento médio da família medida ao longo da linha de amostragem e α é o ângulo entre a linha de amostragem e a família amostrada. A Figura 3 exibe um exemplo de como é feito o cálculo do espaçamento real entre descontinuidades de uma mesma família.

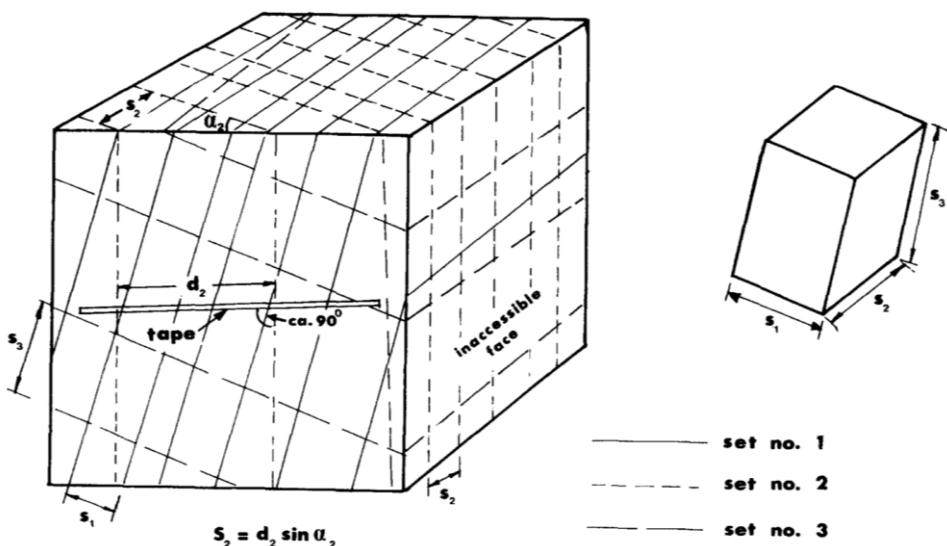


Figura 3. Exemplo para cálculo de espaçamento real entre famílias de descontinuidades (ISRM, 1978).

A persistência refere-se à exposição da descontinuidade na superfície do maciço e pode determinar o grau de ocorrência/ geração de uma superfície de falha (ISRM, 1978).

A rugosidade indica o quanto ondulado é o plano da descontinuidade e implica diretamente na possibilidade de deslocamento de um bloco por cisalhamento (ISRM, 1978). Esse parâmetro pode ser determinado numericamente através do coeficiente de rugosidade da junta (JRC) onde são realizados testes de inclinação sobre a superfície da descontinuidade, ou de modo simplificado através de comparação visual dos perfis de referência (Barton & Choubey, 1977), conforme exibido na Figura 4.

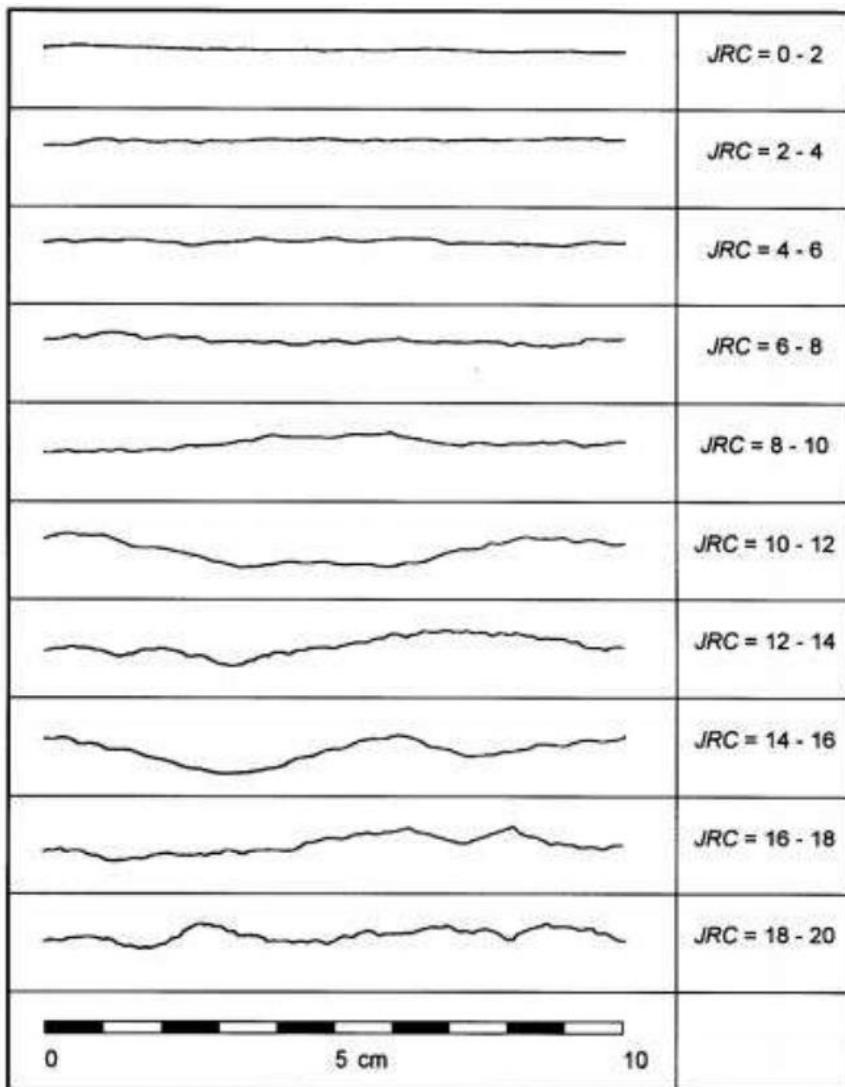


Figura 4. Perfis de rugosidade e seus intervalos correspondentes de JRC (Barton & Choubey, 1977).

A resistência à compressão é medida na parede da rocha e pode ser alterada devido ao resultado do intemperismo físico e químico. Esse parâmetro influencia as condições de deformação do maciço e pode ser facilmente medido através de um ensaio de compressão utilizando-se um martelo de Schmidt (ISRM, 1978).

A abertura e o preenchimento podem estar ligados. A abertura refere-se à distância perpendicular entre duas paredes de um maciço derivada de uma descontinuidade. Essa

abertura pode ou não estar preenchida por água. Outros tipos de preenchimentos são argila, silte, quartzo, calcita, etc (ISRM, 1978).

A permeabilidade é uma característica que afeta gravemente a estabilidade do maciço uma vez que a água exerce uma pressão sobre os planos das descontinuidades (ISRM, 1978).

A Figura 5 exibe de forma esquemática as principais propriedades geométricas das descontinuidades em rocha.

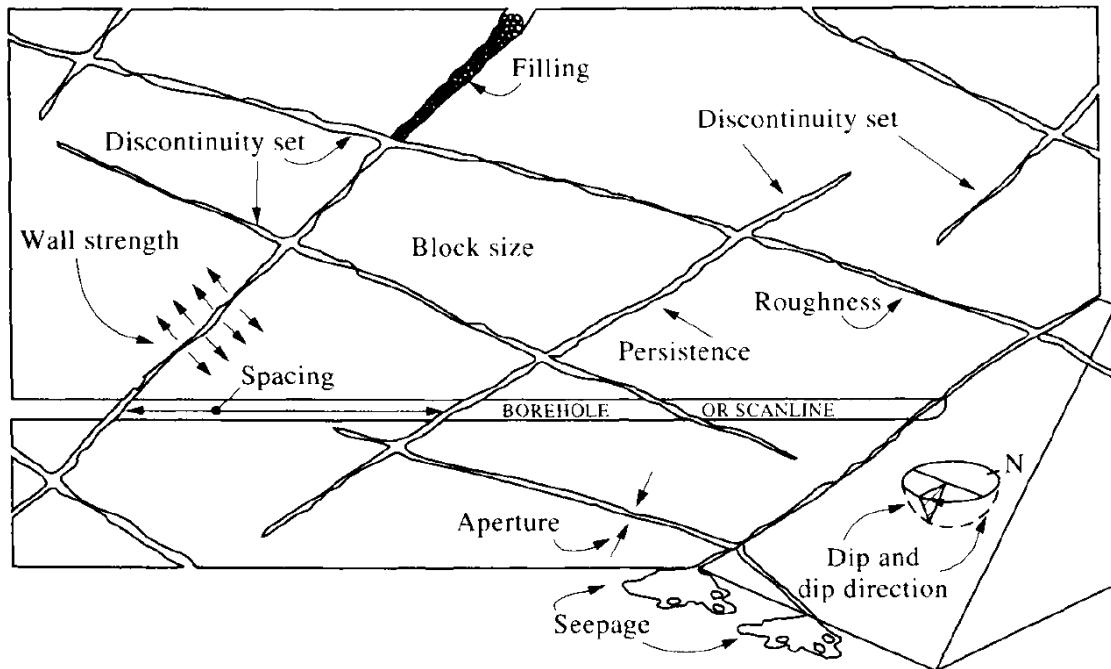


Figura 5. Figura esquemática exibindo as propriedades geométricas primárias de descontinuidades em rocha (Hudson & Harrison, 1997) .

3.5 Classificação de Maciços Rochosos

A necessidade de entender o comportamento da natureza se faz presente em qualquer obra de engenharia. Nesse contexto, a classificação de maciços rochosos surge como uma tentativa de quantificar as características naturais que podem afetar as suas condições de estabilidade. Cosar (2004) reúne as principais classificações de maciços rochosos, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Principais sistemas de classificação de maciços rochosos (Coşar, 2004).

Rock Mass Classification System	Originator	Country of Origin	Application Areas
Rock Load	Terzaghi, 1946	USA	Tunnels with steel Support
Stand-up time	Lauffer, 1958	Australia	Tunneling
New Austrian Tunneling Method (NATM)	Pacher et al., 1964	Austria	Tunneling
Rock Quality Designation (RQD)	Deere et al., 1967	USA	Core logging, tunneling
Rock Structure Rating (RSR)	Wickham et al., 1972	USA	Tunneling
Rock Mass Rating (RMR)	Bieniawski, 1973 (last modification 1989-USA)	South Africa	Tunnels, mines, (slopes, foundations)
Modified Rock Mass Rating (M-RMR)	Ünal and Özkan, 1990	Turkey	Mining
Rock Mass Quality (Q)	Barton et al., 1974 (last modification 2002)	Norway	Tunnels, mines, foundations
Strength-Block size	Franklin, 1975	Canada	Tunneling
Basic Geotechnical Classification	ISRM, 1981	International	General
Rock Mass Strength (RMS)	Stille et al., 1982	Sweden	Metal mining
Unified Rock Mass Classification System (URCS)	Williamson, 1984	USA	General
Communication Weakening Coefficient System (WCS)	Singh, 1986	India	Coal mining
Rock Mass Index (RMI)	Palmström, 1996	Sweden	Tunneling
Geological Strength Index (GSI)	Hoek and Brown, 1997	Canada	All underground excavations

O propósito e os requisitos da classificação, citados por Bieniawski (1973), são descritos a seguir conforme texto original.

“Uma classificação de maciços rochosos deve:

- (i) *Dividir um maciço rochoso em grupos de comportamento similar;*
- (ii) *Providenciar uma boa base para o entendimento das características de um maciço rochoso;*
- (iii) *Facilitar o planejamento e design das estruturas na rocha a partir da produção de dados quantitativos necessários para solucionar problemas reais de engenharia e*

- (iv) *Providenciar uma base comum para a comunicação efetiva entre todas as pessoas interessadas em problemas geomecânicos.*

Esses objetivos devem ser cumpridos garantindo que a classificação adotada seja:

- (i) *Simples e significativa em termos; e*
- (ii) *Seja baseada em parâmetros mensuráveis os quais podem ser determinados em campo de forma rápida e barata.”*

Para realizar a classificação é necessário coletar informações das características físicas do maciço, algumas delas já descritas na seção de caracterização como o tipo de rocha e seu estado de intemperismo, e a força (uniaxial compressiva) de um material intacto. Além disso, Bienawski (1973) cita outros dados que devem ser levantados. Um deles, é denominado como Rock Quality Designation (RQD). No início dos anos 1960, o engenheiro Don U. Deere desenvolvia a ideia de que o número e o tipo de descontinuidades influenciavam o comportamento dos maciços rochosos e que uma análise cuidadosa de furos de sondagem traria informações importantes sobre a rocha *in situ*. Sendo assim, em 1963, Deere apresenta o conceito de *Rock Quality Designation* (RQD) (Deere, 1989). Trata-se de se obter a porcentagem de recuperação de sondagens através da somatória do comprimento dos fragmentos intactos de rochas iguais ou maiores que 10 cm dividido pelo comprimento total e multiplicado por 100 (Bieniawski, 1973). Quando não há testemunhos de sondagem, seu valor pode ser obtido através do índice volumétrico de juntas (J_v), determinado pelo número total de juntas por m^3 (Barton *et al.*, 1974) ou através de uma linha de varredura. O valor do RQD é dado pela seguinte equação:

$$RQD = 100 \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{L} \%,$$

onde X_i é o valor dos fragmentos intactos iguais ou maiores que 10 cm e L é o comprimento do testemunho de sondagem ou da linha de varredura.

A partir do valor obtido através do RQD atribui-se a qualidade da rocha, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 Classificação da qualidade da rocha a partir do valor, em porcentagem, do RQD (Traduzido de Deere & Deere, 1989).

RQD (%)	Qualidade da rocha
90 - 100	Excelente
75 - 90	Boa
50 - 75	Razoável
25 - 50	Pobre
0 - 25	Muito pobre

Sendo assim, o parâmetro leva em consideração características das descontinuidades. O RQD possui limitações ao passo que não reflete completamente a qualidade do maciço. Porém, trata-se de um índice útil, tendo sido absorvido por outros sistemas de classificação como o RMR de (Bienawski, 1973) e o Sistema – Q de (Barton, 1974) (Abbas & Konietzky, 2015).

Apesar de extremamente úteis, Abbas & Konietzky (2015) apontam a preocupação de Bienawski (1989) ao atentar para o uso consciente das classificações e citam as desvantagens que o autor observa, conforme segue:

- (i) *Utilizar as classificações como um ‘livro de receitas’, ignorando métodos analíticos e de observação;*
- (ii) *Utilizar apenas uma classificação sem comparar os resultados com outro(s) sistemas;*
- (iii) *Utilizar as classificações com dados insuficientes;*
- (iv) *Utilizar as classificações sem a completa realização da sua natureza conservadora e seus limites decorrentes de uma base de dados pelas quais foram desenvolvidas.*

3.6 Análise Cinemática

Uma das características que influenciam a estabilidade dos taludes é o tipo de estruturas geológicas presentes. Sendo assim, é preciso conhecer as propriedades de suas descontinuidades.

O estudo de estabilidade de taludes envolve duas etapas de trabalho nas quais serão obtidos dados relevantes das estruturas geológicas presentes. Na primeira etapa, deve-se mapear o afloramento e seus cortes, adquirindo informações sobre as propriedades de suas

descontinuidades. Além disso, testemunhos de sondagem podem ser utilizados contribuindo para testes em laboratório. Na segunda etapa, deve-se estudar a relação entre a orientação das descontinuidades e da face do talude, onde determina-se a influência dessas estruturas na estabilidade. Sendo assim, realiza-se a análise cinemática a qual identificará possíveis modos de ruptura de talude (Wyllie & Mah, 2005).

Um dos principais fatores que influenciam o comportamento mecânico de um maciço rochoso são as características de suas descontinuidades, como orientação, persistência e espaçamento (Wyllie & Mah, 2005). A Figura 6 exibe como esses parâmetros combinados afetam a estabilidade de um talude.

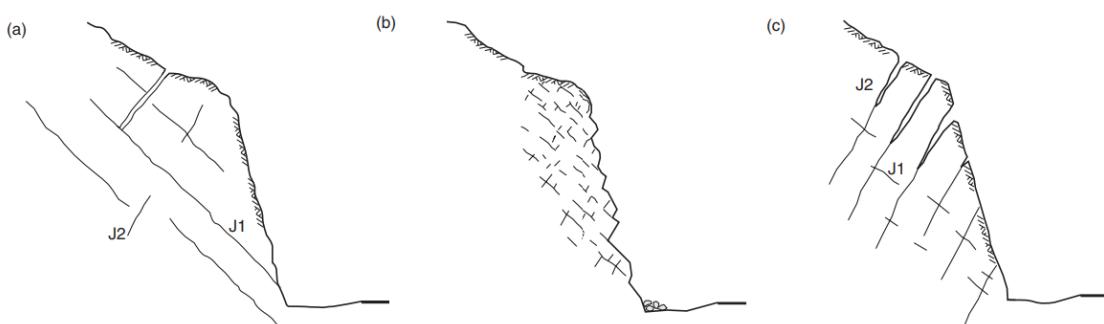


Figura 6. Efeito das propriedades da juntas na estabilidade de taludes: (a) juntas persistentes J1 mergulham para fora da face do talude gerando uma potencial instabilidade ao formar blocos deslizantes; (b) juntas com baixa persistência e pouco espaçadas geram um emaranhado de pequenos blocos; (c) juntas persistentes J2 mergulhando para dentro da face gerando um potencial tombamento de placas (Traduzido de Wyllie & Mah, 2005).

A análise da geologia estrutural pode ser realizada através de projeções estereográficas que permitem a representação em duas dimensões de dados de orientação em 3D (Wyllie & Mah, 2005). Para isso, os dados coletados em campo como, rumo do mergulho e mergulho das estruturas geológicas, são plotados em um estereograma onde a relação entre as orientações do talude e de suas descontinuidades são observadas. Essa relação pode acarretar na instabilidade do maciço com a geração de blocos (Wyllie & Mah, 2005).

Assim que o tipo de bloco é identificado, é possível realizar a análise cinemática do maciço rochoso. A análise cinemática visa reconhecer a direção de escorregamento do bloco e indicar suas condições de estabilidade através do uso do estereograma, onde são plotados os planos das descontinuidades e o plano da face do talude (Wyllie & Mah, 2005). Há quatro tipos principais de blocos que podem ser formados, como exibido na Figura 7.

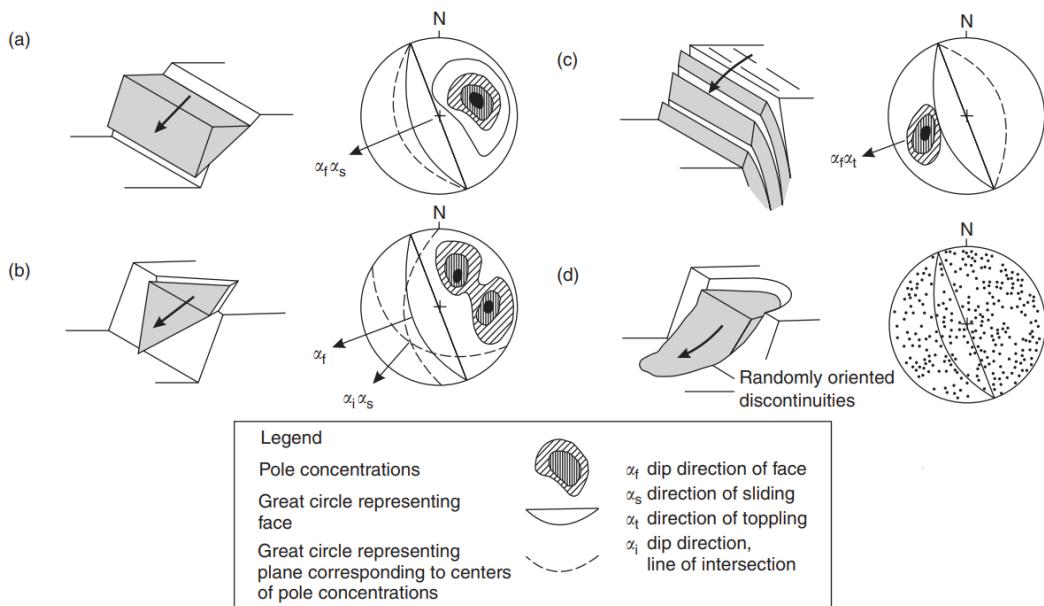


Figura 7. Principais tipos de blocos em taludes e suas prováveis condições da geologia estrutural causadoras: (a) plano de descontinuidade em rocha contendo juntas persistentes mergulhando para fora do talude e direção paralela à face; (b) bloco em cunha em duas descontinuidades que se interceptam; (c) bloco de tombamento em rocha dura contendo descontinuidades com mergulho íngreme na face do talude; e (d) ruptura circular em rocha de preenchimento, muito fraca ou rocha com fraturas muito próximas com orientação aleatória das descontinuidades (Traduzido de Wyllie & Mah, 2005).

Ao plotar as medidas dos planos no estereograma, verifica-se se os mesmos dentro ou fora das chamadas zonas críticas em relação ao plano do talude. As zonas críticas marcam o limite de risco de formação e movimentação de blocos. Um exemplo de como os planos são plotados a partir de seus pólos e analisados em estereogramas, segundo as zonas críticas de cada tipo de bloco de falha, é exibido na Figura 8.

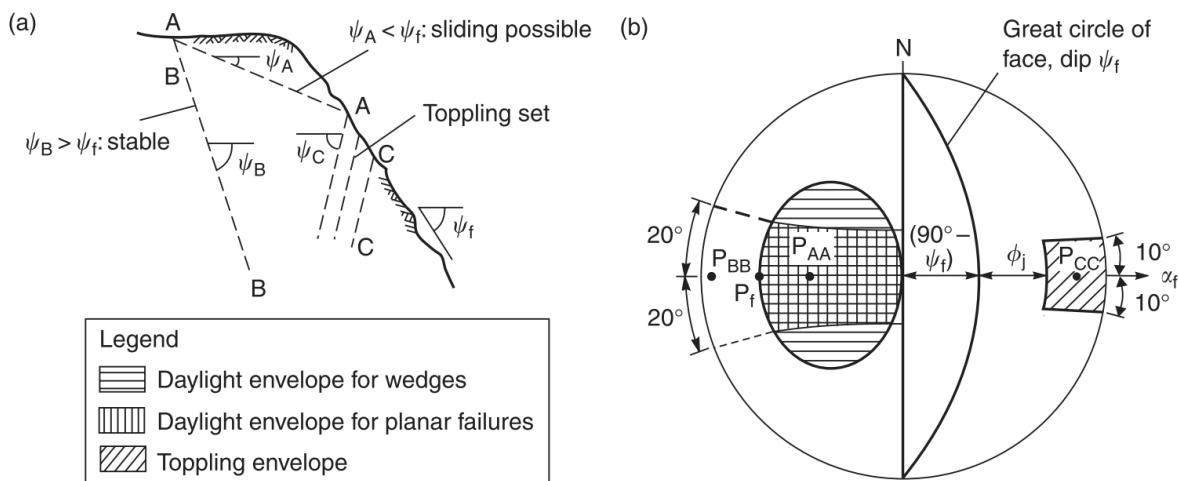


Figura 8. Análise cinemática de blocos rochosos em taludes: (a) conjunto de descontinuidades no talude; (b) zonas críticas em estereograma de igual área (modificado de Wyllie and Mah, 2005).

A Figura 8 (a) exibe três exemplos de conjuntos de descontinuidades e suas relações de estabilidade com a face do talude. O plano AA representa uma instabilidade uma vez que seu ângulo de mergulho é menor que mergulho do talude. Além disso, o plano aflora na face do talude, podendo ocorrer escorregamento planar. Já o plano BB possui um ângulo de mergulho maior que o do talude, sendo assim, ele apresenta estabilidade pois não aflora no plano paralelo à face do talude. O conjunto de planos CC possui mergulho para o lado oposto do plano paralelo à face do talude. Neste caso, é possível que ocorra tombamento de blocos. Os pólos (P) dos planos das descontinuidades e da face do talude estão plotados em estereograma, assumindo que todas as descontinuidades são paralelas à face como mostra a Figura 8 (b). Uma vez que os pólos das descontinuidades que afloram na face do talude se localizam nas zonas críticas, essas apresentam instabilidade (Wyllie and Mah, 2005).

Para que ocorra um escorregamento planar, é necessário que a direção do mergulho do conjunto de descontinuidades seja diferente em menos de 20° da direção do mergulho do talude. Se a diferença for maior, ocorre um aumento na espessura de rocha intacta ao final do bloco que terá força suficiente para resistir à falha. Esse limite angular é exibido no estereograma da Figura 8 (b) e é representado por duas linhas definindo a direções de mergulho ($\alpha_f +20^\circ$) e ($\alpha_f -20^\circ$) (Wyllie & Mah, 2005).

A análise cinemática de ruptura em cunha é similar à planar, porém, é analisada a intersecção entre dois planos de descontinuidades. O escorregamento ocorrerá se o pólo da linha de intersecção (ψ_i) apresentar ângulo de mergulho menor do que o ângulo de mergulho da face do talude ($\psi_i < \psi_f$). Uma vez que a cunha é formada por dois planos, a zona crítica é maior do que a do escorregamento planar (Wyllie & Mah, 2005).

O tombamento de blocos ocorre se a direção do mergulho das descontinuidades que mergulham para dentro da face do talude estiver entre 10° da direção do mergulho da face do talude. Neste caso, serão formadas placas paralelas à face. Além disso, o ângulo de mergulho das placas deve ser íngreme para que ocorra o escorregamento em camadas (Wyllie & Mah, 2005). Levando em consideração o ângulo de atrito (ϕ_j) das faces das camadas, o tombamento ocorrerá caso a seguinte condição seja encontrada (Goodman & Bray, 1976):

$$(90^\circ - \psi_f) + \phi_j < \psi_p,$$

onde ψ_f é o ângulo de mergulho da face do talude, ϕ_j é o ângulo de atrito entre as camadas e ψ_p é o ângulo de mergulho dos planos com potencial instabilidade.

Após determinar se o bloco poderá se movimentar, é possível examinar as condições de estabilidade no mesmo estereograma. A análise é feita assumindo que o atrito é a única

força de cisalhamento atuante e a coesão é igual à zero. A Figura 9 (a) mostra um cone de atrito sobre um bloco sobre um plano inclinado. Para uma condição de repouso, o vetor força normal ao plano deve estar dentro do cone. Para condições onde apenas a força da gravidade atua sobre o bloco, o pólo do plano coincide com a mesma direção da força normal e o bloco será estável se o pólo recair dentro do cone (Wyllie and Mah, 2005).

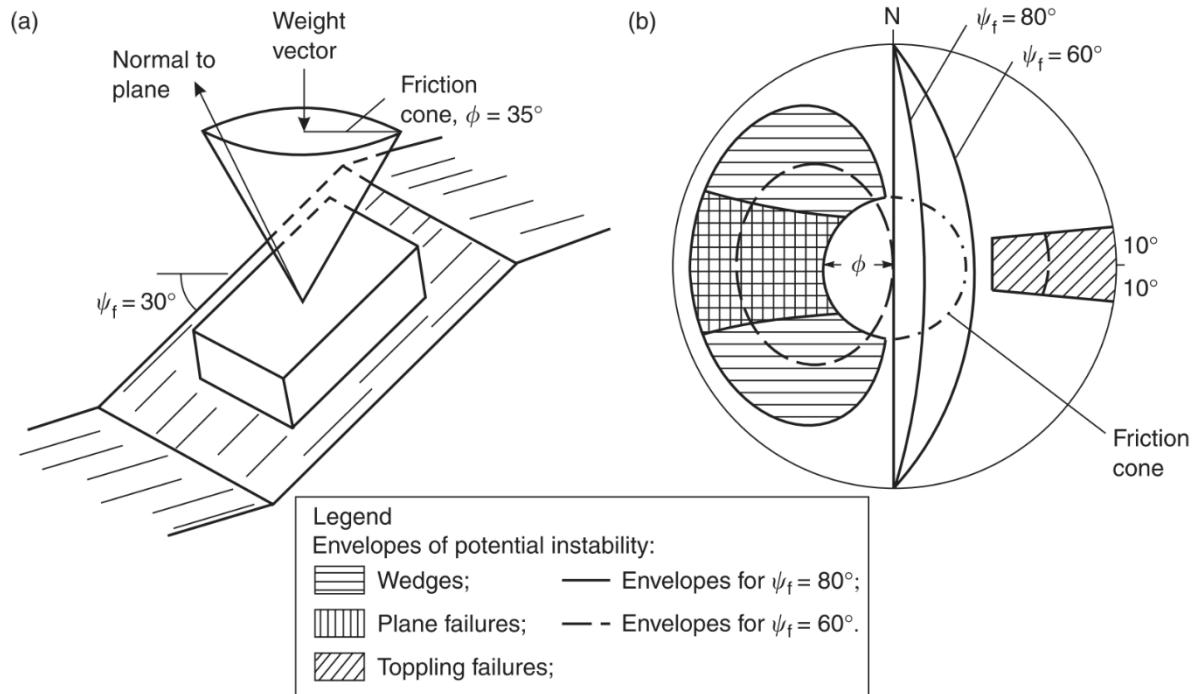


Figura 9. Combinação entre análise cinemática e estabilidade utilizando o conceito de cone de atrito: (a) cone de atrito em relação ao bloco sobre um plano inclinado (i.e. $\phi > \psi_p$); e (b) projeção estereográfica do cone de atrito sobreposto às zonas críticas (modificado de Wyllie and Mah, 2005).

A análise de estabilidade de taludes conta com dados obtidos através do mapeamento de descontinuidades de um maciço rochoso. Esse levantamento pode ser trabalhoso, lento e perigoso, colocando em risco a vida dos profissionais em campo. Muitas descontinuidades podem estar em locais de difícil acesso limitando o trabalho do geólogo, sendo necessário recorrer à prática de rapel, por exemplo. O uso de equipamentos para contornar os obstáculos naturais eleva o custo do mapeamento, além de reduzir a produtividade da coleta de dados (Haneberg, 2008).

Nesse contexto, a fotogrametria digital se coloca como uma alternativa à técnica tradicional de mapeamento de descontinuidades, uma vez que seu uso reduz o tempo gasto em taludes que oferecem risco e permite a coleta de dados em locais de difícil acesso, além

de garantir um elevado número de medidas necessárias para a análise estatística das orientações das descontinuidades (Haneberg, 2008).

3.7 Structure from Motion – Multi-View Stereo

Structure from Motion é uma ferramenta de reconstrução fotogramétrica na qual o produto gerado é um modelo em três dimensões de um dado objeto. A técnica difere da fotogrametria tradicional ao passo que se utiliza de algoritmos capazes de identificar características em comum em um dado conjunto de imagens obtidas em diferentes pontos de vista, mas que possuam parcial sobreposição entre si. Segundo Furukawa & Hernandez (2015), a maioria dos algoritmos de SfM no estado da arte seguem o fluxograma exibido na Figura 10.

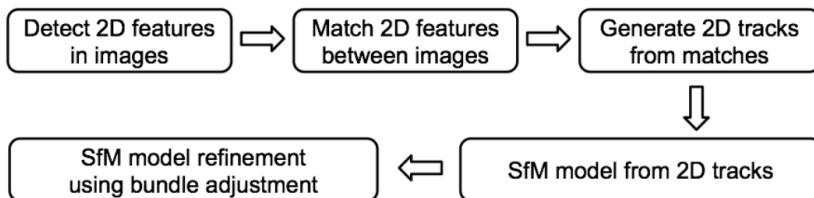


Figura 10. Fluxograma geral das etapas de *Structure from Motion* (Furukawa & Hernandez, 2015)

Inicialmente, um objeto deve ser fotografado com uma câmera digital sob vários pontos de vista. Os algoritmos realizam uma transformação de escala invariante (SIFT) de cada característica, identificando e correlacionando-as em outras imagens. Essa correlação deve ser suficiente para que se estabeleça uma relação espacial entre a posição original das imagens em um sistema de coordenadas 3D arbitrário (Micheletti, et al., 2015). Então, são calculados os parâmetros internos da câmera e as coordenadas relativas em 3 dimensões de cada ponto em comum, gerando uma nuvem de pontos (Viana et al., 2016; Carrivick et al., 2016). Esses pontos são codificados como traços. Um traço é definido como as coordenadas 3D de um ponto reconstruído e a lista de correspondências de coordenadas 2D em um subconjunto do conjunto inicial de imagens (Furukawa & Hernández, 2015). Esses dados são calculados através de um procedimento iterativo denominado ajuste de conjunto (*bundle adjustment*) fundamentado em uma base de dados extraída automaticamente de um conjunto de imagens sobrepostas (Viana, 2015). Ao final da reconstrução geométrica das câmeras obtém-se uma nuvem esparsa de pontos tridimensional. A Figura 11 exemplifica como os pontos rastreados nas imagens são utilizados para calcular as coordenadas relativas no espaço.

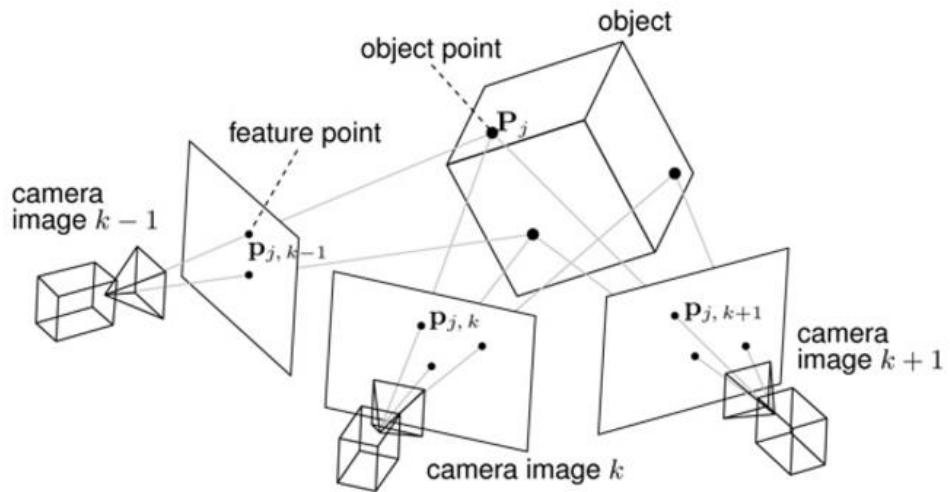


Figura 11. Resultado após uso de SfM. A projeção de um ponto P_j do objeto 3D na imagem da câmera no tempo/posição k resulta no ponto 2D rastreado $p_{j,k}$. (Kurz, et al., 2011).

A partir dessa etapa, inicia-se o processo de *Multi-View Stereo* (MVS) que surge como uma melhora dos algoritmos 2D estéreo. A base dos algoritmos de MVS se desenvolve sobre o fenômeno da estereopsia do qual se obtém informações de profundidade e estruturas tridimensionais a partir da combinação de imagens por visão binocular. O algoritmo gera pontos a partir de uma estimativa da posição da câmera em cada imagem, aumentando o número de pontos de vista e, consequentemente, a robustez da reconstrução da cena (Furukawa & Hernandez, 2015). A Figura 12 exibe o fluxograma geral de SfM-MVS.

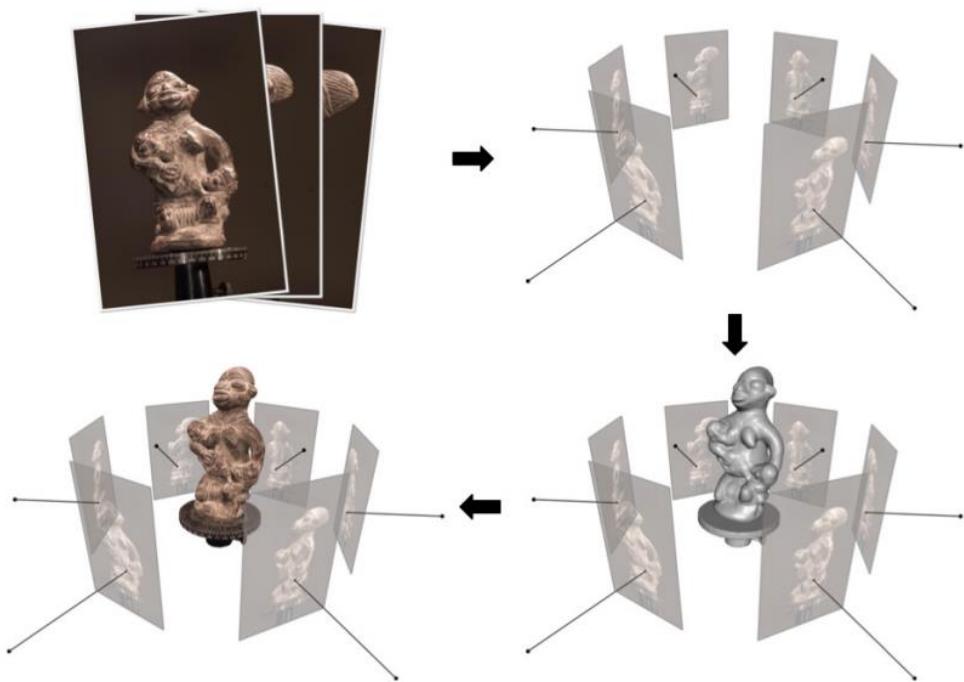


Figura 12. Fluxograma geral das etapas de SfM-MVS. No sentido horário: imagens de entrada, imagens posicionadas, geometria 3D reconstruída, geometria 3D texturizada (Furukawa & Hernandez, 2015).

3.8 Estado da Arte de Análise de Afloramentos Digitais

Com o avanço da tecnologia, a aquisição de dados geológicos se torna cada vez mais detalhada, precisa e a menor custo. Equipamentos que facilitam a captura de imagens, coordenadas geográficas, sensores e softwares são lançados no mercado em versões atualizadas, agilizando a coleta e análise de dados.

No contexto das geociências, a técnica SfM-MVS representa o mais recente avanço no levantamento digital e está sendo usado gradativamente como um componente crucial das ferramentas dos geocientistas (Westoby et al. 2012, Carravick et al. 2013a).

Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANT), ou *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV), mais conhecidos como *drone*, estão sendo cada vez mais aplicados em mapeamentos de estruturas geológicas, uma vez que podem obter informações em locais de difícil acesso. Câmeras acopladas ao *drone* obtém fotografias que servirão de base para a geração de um modelo 3D do afloramento, a partir do qual as análises poderão ser realizadas. Outros veículos como helicópteros e até mesmo balões podem ser utilizados para alcançar locais muito altos. Trabalhos nos quais veículos aéreos foram utilizados como meio de obtenção de fotografias para a geração de modelos 3D podem ser encontrados em (Firpo et al., 2011), (Vasuki et al., 2014), (Barlow et al., 2017) e (Agüera-Vega et al., 2018).

Outra ferramenta como o laser scanner é amplamente utilizada para a geração de modelos tridimensionais. O laser scanner emite um pulso de laser e registra o tempo que leva para esse pulso retornar ao scanner. O pulso de laser é emitido milhares ou dezenas de milhares de vezes por segundo. O laser viaja a uma velocidade constante e uma vez que se conhece a direção na qual ele foi emitido, a distância a partir do scanner de qualquer superfície reflectante e também as coordenadas remotas do ponto de reflexão são conhecidas. Existem dois tipos de de laser scanner: o Airborne Laser Scanning (ALS) e o Terrestrial Laser Scanning (TLS). A diferença principal está no modo de aquisição dos dados, onde um é transportado por uma aeronave (ALS) e o outro é fixado em um tripé (TLS) (Carrivick, et al., 2016). Trabalhos de levantamento de descontinuidades em afloramentos 3D baseados em TLS podem ser vistos em (Sturzenegger & Stead, 2009) (Salvini et al., 2013) e (Assali et al., 2014).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi iniciado com a revisão bibliográfica da técnica de SfM, bem como as técnicas de mapeamento de descontinuidades. Foi obtida imagem de satélite para identificar a localização da área de estudo. Os trabalhos de campo foram realizados em uma frente de lavra de uma pedreira de basalto inativa. Para a geração do modelo 3D, foram utilizadas fotografias obtidas por câmera fotográfica digital acoplada em *drone*, modelo *DJI Phantom 4Pro*. O software *Agisoft PhotoScan* foi utilizado para realizar a restituição fotogramétrica; e o software *MeshLab* (Cignoni et al., 2008) e o algoritmo *ply2atti* (Viana et al., 2016) para a amostragem virtual das descontinuidades. Para realizar a análise cinematográfica foi utilizado o software *OpenStereo*. Neste trabalho foi necessário obter coordenadas de pontos de controle que serviram para o georreferenciamento das imagens. Para isso, foi utilizada uma estação total modelo *Topcon GPT 3200NW* e um dGPS modelo *Spectra Precision SP60*.

4.1 Agisoft PhotoScan

Um dos objetivos do processamento de imagens no *PhotoScan* é a reconstrução de uma superfície 3D. Para isso, são realizadas quatro etapas principais: alinhamento da câmera para a geração de nuvem esparsa (SfM), geração de nuvem densa (*Multi-View Stereo*), geração de superfície (malha) e texturização.

De maneira geral, a reconstrução do modelo 3D é iniciada realizando-se o alinhamento de câmera, onde o *PhotoScan* procura e combina pontos em comum entre as fotografias e encontra a posição de cada imagem (SfM), além de refinar os parâmetros de calibração da câmera (*bundle adjustment*). O produto obtido é uma nuvem esparsa de pontos (*Agisoft PhotoScan*, 2018).

A etapa seguinte visa a densificação da nuvem esparsa. O software gera pontos a partir de uma estimativa da posição da câmera em cada imagem (MVS). É possível ajustar parâmetros de reconstrução e a escolha implicará no tempo de processamento das imagens e detalhamento e acurácia da geometria do modelo (*Agisoft PhotoScan*, 2018).

Para reconstruir a malha tridimensional, o software gera vetores entre os pontos da nuvem densa formando triângulos adjacentes que reproduzem a superfície da cena (*Agisoft PhotoScan*, 2018). É possível ajustar a contagem de faces (*Face count*), que especifica o número máximo de polígonos na malha final, calculados a partir do número de pontos da nuvem densa. A razão entre o número de polígonos e o número de pontos varia de 1/5 (*High*), 1/15 (*Medium*) e 1/45 (*Low*) e a escolha implicará no nível de detalhamento da superfície (*Agisoft PhotoScan*, 2018).

Finalmente, o programa gera a textura da superfície e então o modelo 3D pode ser exportado. Uma vez que a finalidade do modelo 3D é servir de base para a amostragem virtual, é necessário exportá-lo no formato .ply para ser importado pelo *software MeshLab*.

4.2 MeshLab

O *MeshLab* foi desenvolvido como uma ferramenta de processamento de malhas 3D atendendo às necessidades de usuários com pouca ou muita habilidade nesse tipo de processamento (Cignoni *et al.*, 2008). Uma das funcionalidades do *software* permite a seleção de áreas dentro dos limites de uma malha 3D, o que o torna interessante para o projeto, uma vez que se espera encontrar famílias de descontinuidades através de uma amostragem virtual. Para realizar a amostragem virtual, importa-se o arquivo no formato .ply para a seleção das descontinuidades. Ao importar o modelo 3D no *MeshLab*, seleciona-se manualmente os planos de descontinuidades de interesse utilizando a ferramenta *ZPainting*. É possível selecionar diferentes grupos de descontinuidades, caso necessário, colorindo cada grupo com uma cor. A ferramenta é útil para separar, por exemplo, famílias de descontinuidades.

4.3 CloudCompare

O *CloudCompare* é um *software* de processamento de nuvem de pontos 3D. Originalmente, foi desenvolvido para realizar comparações entre duas nuvens densas de pontos 3D ou entre uma nuvem de pontos e uma malha triangular. Posteriormente, o programa ampliou sua aplicação para usos em nuvens de pontos mais genéricas, e foi implementado com algoritmos avançados como o *Ransac Shape Detection (RANSAC_SD)* que detecta forma geométricas em nuvens de pontos.

4.4 OpenStereo

O *OpenStereo* é um *software* livre e multiplataforma para análise de dados estruturais. Malhas tridimensionais podem ser importadas por um arquivo de extensão .ply e convertidas em medidas de altitude. A nova versão possibilita o usuário a gerar estereogramas com projeções próprias para análises cinematáticas.

4.5 Atividades

As atividades descritas a seguir foram realizadas visando alcançar o objetivo deste trabalho e envolveram etapas de campo e de escritório.

Na primeira etapa de escritório, a área de estudo foi escolhida com o propósito de aplicar a técnica de fotogrametria digital em um maciço rochoso fraturado. Para obter as fotografias do afloramento, foi utilizado uma câmera digital acoplada a um *drone*. O plano de vôo do *drone* foi calculado através do programa *Litchi* com o requisito de obter 80% de sobreposição entre as imagens. Esse programa possui uma ferramenta chamada *Mission Hub* onde as missões são criadas, permitindo a aeronave sobrevoar um caminho feito de pontos de referência e executar diversas ações em cada um deles, como tirar fotografias, girar a aeronave, rotacionar o eixo da câmera, entre outros. Esses pontos que formam a linha de vôo do *drone* são criados através do *Google Earth*, salvos em um arquivo KML e depois importados no *Mission Hub* onde é permitido editar ações e ajustar a altura do vôo. Além disso, foram realizados estudos bibliográficos sobre a área e a técnica envolvida que perduraram até a conclusão deste trabalho.

No dia 28 de março de 2018, foi realizada a atividade de campo na qual foram obtidos dados para georreferenciamento do afloramento bem como as suas imagens. Primeiramente, o dGPS foi fixado num ponto próximo ao maciço rochoso e permaneceu coletando dados durante todo o período de trabalho. Para a coleta de mais dois pontos de controle fora do afloramento, foram fixadas estacas de madeira a maior distância possível do paredão para distribuir melhor o erro das medidas das coordenadas coletadas com o *rover* do dGPS. O uso do dGPS visa a correção de erros de coordenadas calculadas. Para isso, é necessário que um GPS receptor seja fixado como uma estação base de localização conhecida. Essa base calcula a própria localização a partir de sinais de satélite e a compara com a posição conhecida (ESRI, 2018). Um segundo GPS receptor móvel conhecido como *rover* coleta as informações já corrigidas pela base, em tempo real. Sendo assim, o *rover* foi levado até duas estacas de madeira para coletar as suas posições corrigidas.

Foi necessário coletar informações de distância horizontal, distância inclinada e ângulo de inclinação de pontos de controle. Para isso, foi utilizada uma estação total (ET) modelo *Topcon GPT 3200NW*. O equipamento emite um feixe de *laser* que reflete no alvo (prisma ou outros) o qual se deseja obter informações e retorna a ET. Pelo tempo de resposta e ângulo de rotação da luneta, a ET calcula distâncias e ângulos e armazena esses dados em uma memória interna que, posteriormente, é descarregada em um computador. Pode-se utilizar um prisma (objeto bastante refletor) que é posicionado no lugar do alvo. Uma vez que o

maciço rochoso já havia sido utilizado de forma recreativa para atividades de escalada, os alvos dos pontos de controle foram baseados em ‘mosquetões’ e ‘agarras’ já fixados no paredão. Outros pontos foram baseados em marcações pré-existentes feitas a tinta e feições naturais como encontro de fraturas ou vegetação pois, para distâncias menores que 400 metros, não é necessário um alvo refletor. Ao todo foram medidas as coordenadas de 33 pontos de controle no paredão, mais dois pontos externos (estacas). As coordenadas dos pontos de controle foram posteriormente calculadas através do programa *Spectra Survey Office*. A Figura 13 mostra os equipamentos utilizados na coleta de dados de campo. A Figura 14 exibe a posição da ET e do dGPS em relação aos pontos de controle.



Figura 13. Equipamentos utilizados para a coleta de dados para georreferenciamento do maciço rochoso. Acima à esquerda, dGPS modelo Spectra Precision SP60; à direita, estação total modelo Topcon GPT 3200NW. Abaixo, drone modelo DJI Phantom 4Pro com câmera acoplada utilizado para a aquisição das imagens fotográficas do afloramento.



Figura 14. Pontos de controle irradiados a partir da estação total. Coordenadas UTM Datum WGS 84 Zona 23S (Grohmann et al., 2018).

Para a coleta de imagens do afloramento, utilizou-se uma câmera fotográfica digital acoplada em um *drone* modelo *DJI Phantom 4Pro*. A missão do *drone* previamente calculada se realizou em dois levantamentos a 20 e 30 metros de distância da frente de lavra. O intervalo entre cada parada do *drone* foi de 6 metros na horizontal e 4 metros na vertical. No total, foram registradas 539 fotografias do afloramento.

Na segunda etapa de escritório, foi realizada a reconstrução das imagens da frente de lavra através do programa *PhotoScan*. Foi gerado um modelo 3D do afloramento que serviu de base para a seleção dos planos de fraturas utilizando o programa *MeshLab*. Os planos de fraturas foram selecionados levando em consideração as orientações das fraturas em todo o afloramento. Posteriormente, através do algoritmo *ply2atti* as atitudes dos planos selecionados foram calculadas e suas projeções estereográficas foram geradas pelo *OpenStereo*.

Também foram calculadas atitudes através do algoritmo *RANSAC Shape Detection* (Schnabel et al., 2007), utilizando o software *CloudCompare* na tentativa de se obter um maior número de medidas e melhorar a estatística da amostragem. Para a identificação dos planos com mais precisão a partir do mesmo modelo 3D gerado pelo *PhotoScan*. O algoritmo *RANSAC Shape Detection* ajusta primitivas, ou seja, formas geométricas, a uma nuvem de pontos. O algoritmo identifica todos os pontos que pertencem a uma mesma primitiva, considerando uma distância ϵ , e um desvio θ , em ângulo, entre os pontos e a primitiva. Após identificados todos os pontos que pertencem à mesma primitiva, o algoritmo calcula a primitiva se foram encontrados pelo menos N pontos com as mesmas características, ou senão

descarta este conjunto de pontos. Em seguida, o procedimento é repetido para o próximo conjunto de pontos.

Os parâmetros do algoritmo foram ajustados a partir dos resultados obtidos pelo *MeshLab*, de maneira a garantir que o *RANSAC Shape Detection* encontre todos os planos identificados no *MeshLab*. Foi escolhido como forma geométrica primitiva o plano, que é o objeto de interesse desse estudo. Para a escolha do mínimo número de pontos alinhados da nuvem densa para a identificação de um plano, foi utilizado o valor de 250, que corresponde à área do menor plano observado no *MeshLab*. Para o parâmetro de desvio (*e*), foi utilizado o valor igual à 0,3 levando em consideração a rugosidade aparente dos planos de descontinuidades observados através do modelo 3D. O parâmetro de resolução da amostragem (*b*) foi baseado na resolução da nuvem densa. O desvio máximo da normal para considerar planos como sendo da mesma família, foi escolhido 10 graus, com base em experiência de campo de mapeamento geológico. Para o parâmetro *overlooking probability*, foi mantido o valor padrão sugerido pelo software. Esses parâmetros foram ajustados para gerar os melhores resultados, levando-se em consideração critérios geológicos.

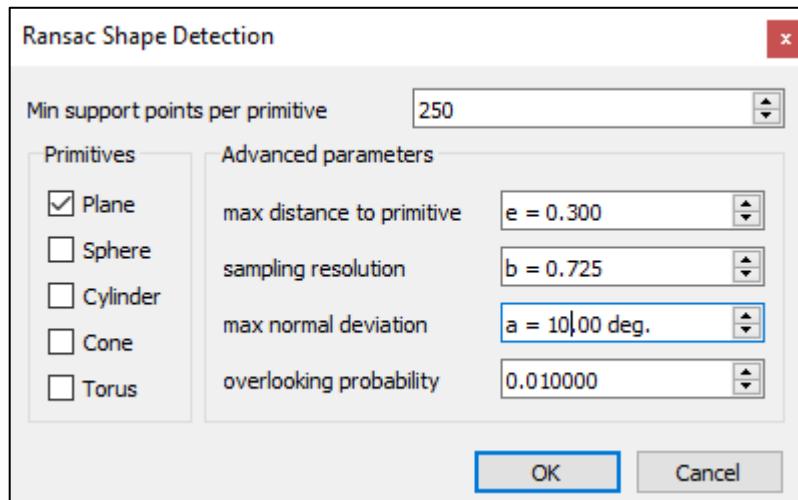


Figura 15. Parâmetros de configuração do algoritmo *RANSAC Shape Detection*.

Após os ajustes dos parâmetros, foram gerados planos para os três setores. Foi avaliado se os planos gerados são geologicamente relevantes, e se pontos não pertencentes ao afloramento, como vegetação na base e no topo do maciço, foram computados gerando planos não condizentes com a realidade. As atitudes geradas foram exportadas para o *OpenStereo*. Por fim, foi realizada a identificação de famílias e a análise cinemática dos conjuntos de dados obtidos através do *MeshLab*.

5 RESULTADOS OBTIDOS

A frente de lavra possui orientação NNW-SSE e é composta por rocha basáltica com alto grau de fraturamento. A coloração do afloramento varia de cinza escuro na área correspondente ao setor Azul a tons alaranjados, amarronzados e acinzentados nas outras áreas, sugerindo algum estado de intemperismo. A diferença na cor pode ter relação com a direção e grau do faturamento, submetendo mais ou menos os planos aos agentes intempéricos. Devido às dimensões do afloramento, à presença de vegetação alta na base do paredão, não foi possível realizar um levantamento tradicional das estruturas conforme objetivo original. Sendo assim, o levantamento foi realizado a partir do modelo tridimensional, conforme segue abaixo.

O resultado do processamento das fotografias do afloramento pelo *PhotoScan* é exibido nas Figura 16 e Figura 17.

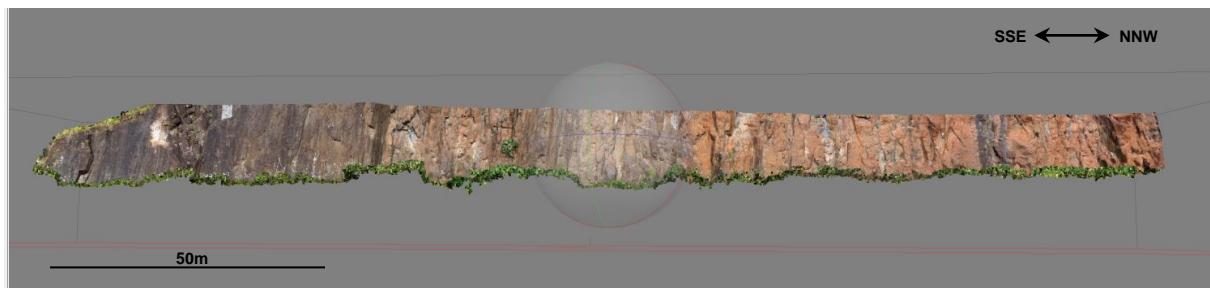


Figura 16 Modelo 3D da frente de lavra inativa da pedreira Garcia gerado pelo *PhotoScan*.

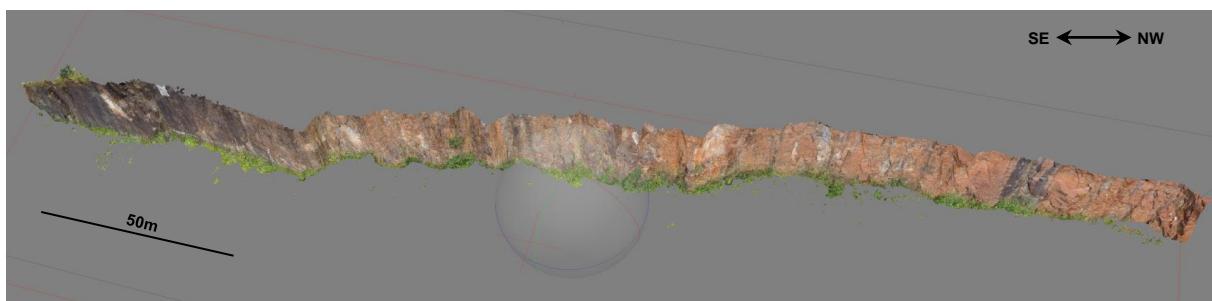


Figura 17 Modelo 3D da frente de lavra Pedreira Garcia reconstruído a partir de um conjunto de fotografias. A visualização em perspectiva facilita o reconhecimento das três dimensões.

Foram observadas diferenças no padrão de fraturamento ao longo do afloramento. Sendo assim, notou-se a necessidade de dividi-lo em setores com base nas diferenças das principais feições estruturais. O setor Azul apresenta planos bem definidos e muito persistentes, paralelos à face do talude. O setor Vermelho é representado e limitado por extensas fraturas subverticais, observadas da base ao topo, na direção NW-SE. Já o setor Amarelo possui, em sua maioria, fraturas pouco persistentes. Além disso, os planos mais visíveis possuem mergulho para NNE. Após a divisão, utilizando o modelo tridimensional,

fraturas foram selecionadas através do *MeshLab* (Figura 18). A seleção foi realizada de forma a contemplar o maior número de fraturas observáveis em cada setor.

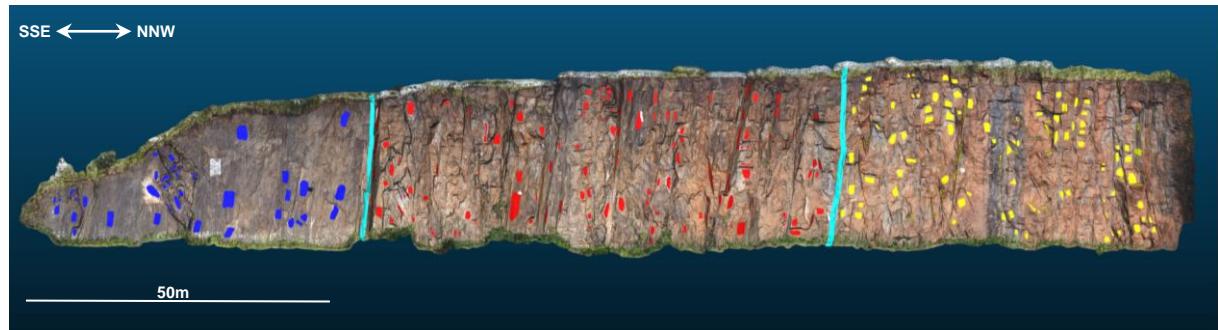


Figura 18. Planos de fratura selecionados através do *MeshLab*. A frente de lavra oeste foi dividida em três setores (linhas em ciano) levando em consideração a predominância das atitudes observadas visualmente.

Na tentativa de obter um maior número de medidas, foi realizada uma busca por planos através do *CloudCompare*, porém, nem todos gerados foram aceitos. O software permite verificar plano a plano e excluir os que não são de interesse. No caso, foram excluídos planos que não coincidiam com estruturas geológicas observáveis. A Figura 19 exibe alguns exemplos dos planos de fraturas encontrados.

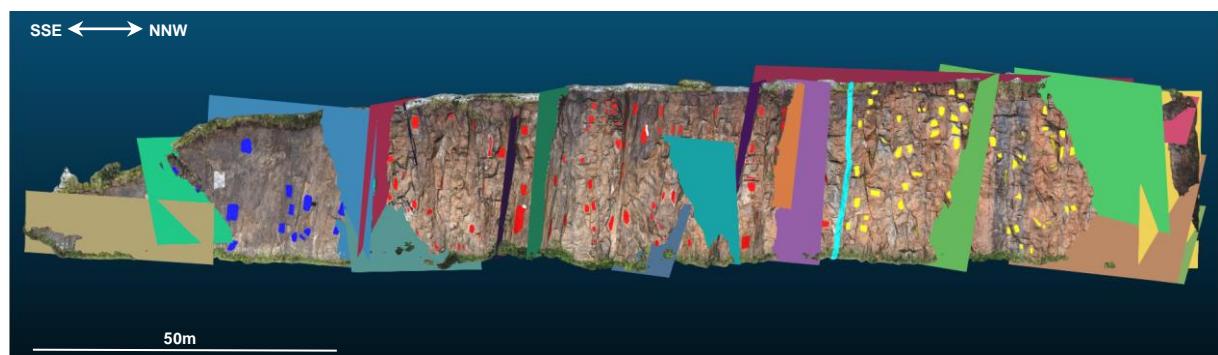


Figura 19. Alguns planos de fraturas encontrados pelo algoritmo *RANSAC Shape Detection*, através do *CloudCompare*. A imagem exibe apenas alguns planos para facilitar a visualização do afloramento.

Mesmo assim, foram observados três problemas principais referentes ao método, que interferem na interpretação geológica. O primeiro trata da geração de planos que não levam em consideração a persistência das fraturas reais, podendo levar a conclusões erradas sobre a intersecção das fraturas com o talude. As Figura 20 e Figura 21 exibem exemplos de fraturas com diferentes atitudes cuja intersecção entre si não é observada no afloramento, nem seccionando o talude. Porém, os planos encontrados pelo *CloudCompare* sugerem que a intersecção entre as fraturas ocorre, e secciona, a face do talude. Sendo a persistência uma característica fundamental na geração, ou não, de blocos, é importante que o geólogo se atente para essa questão para não enviesar sua análise.

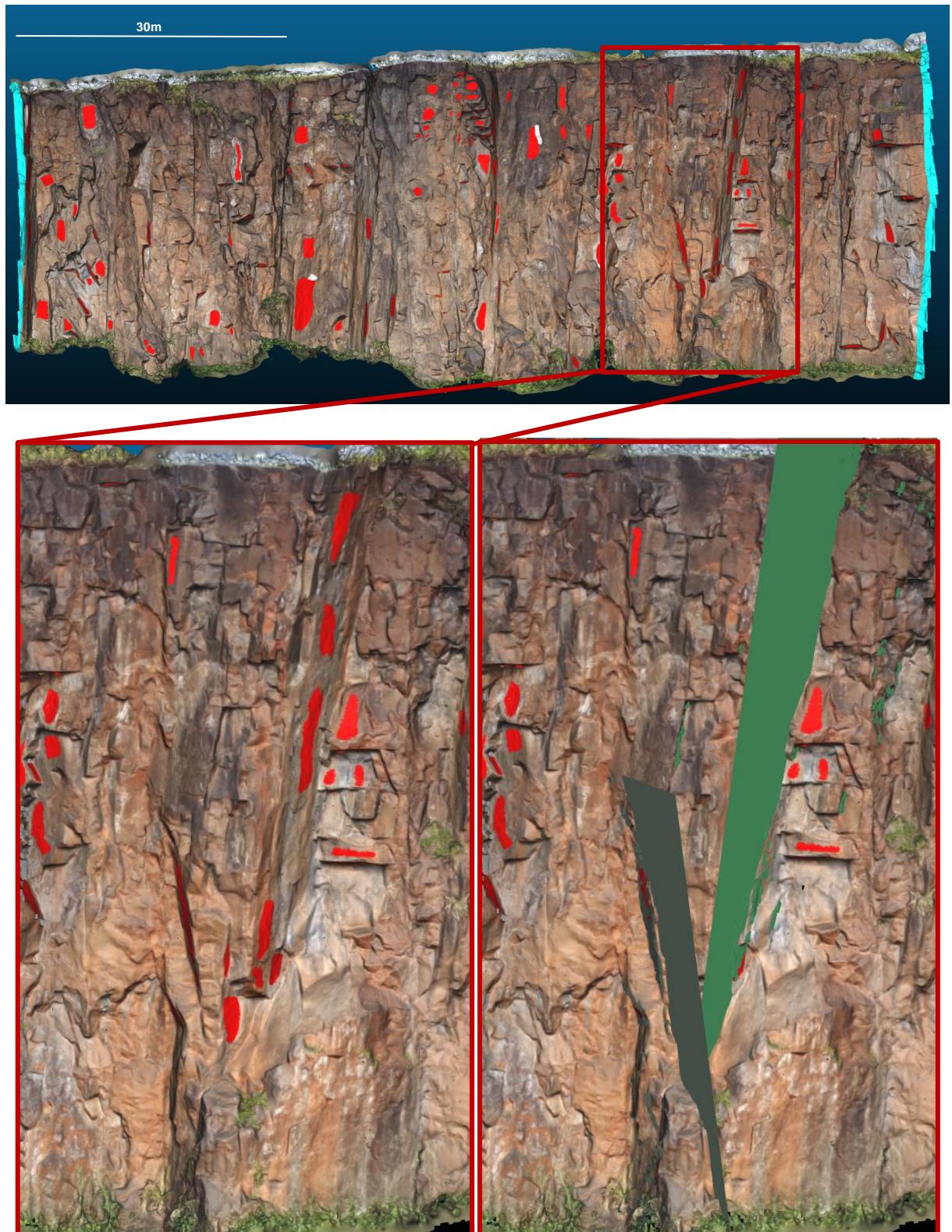


Figura 20. Setor Vermelho (acima). À esquerda (abaixo), detalhe de dois planos selecionados através do MeshLab. À direita (abaixo), planos encontrados pelo CloudCompare que facilitam a visualização da sua intersecção.

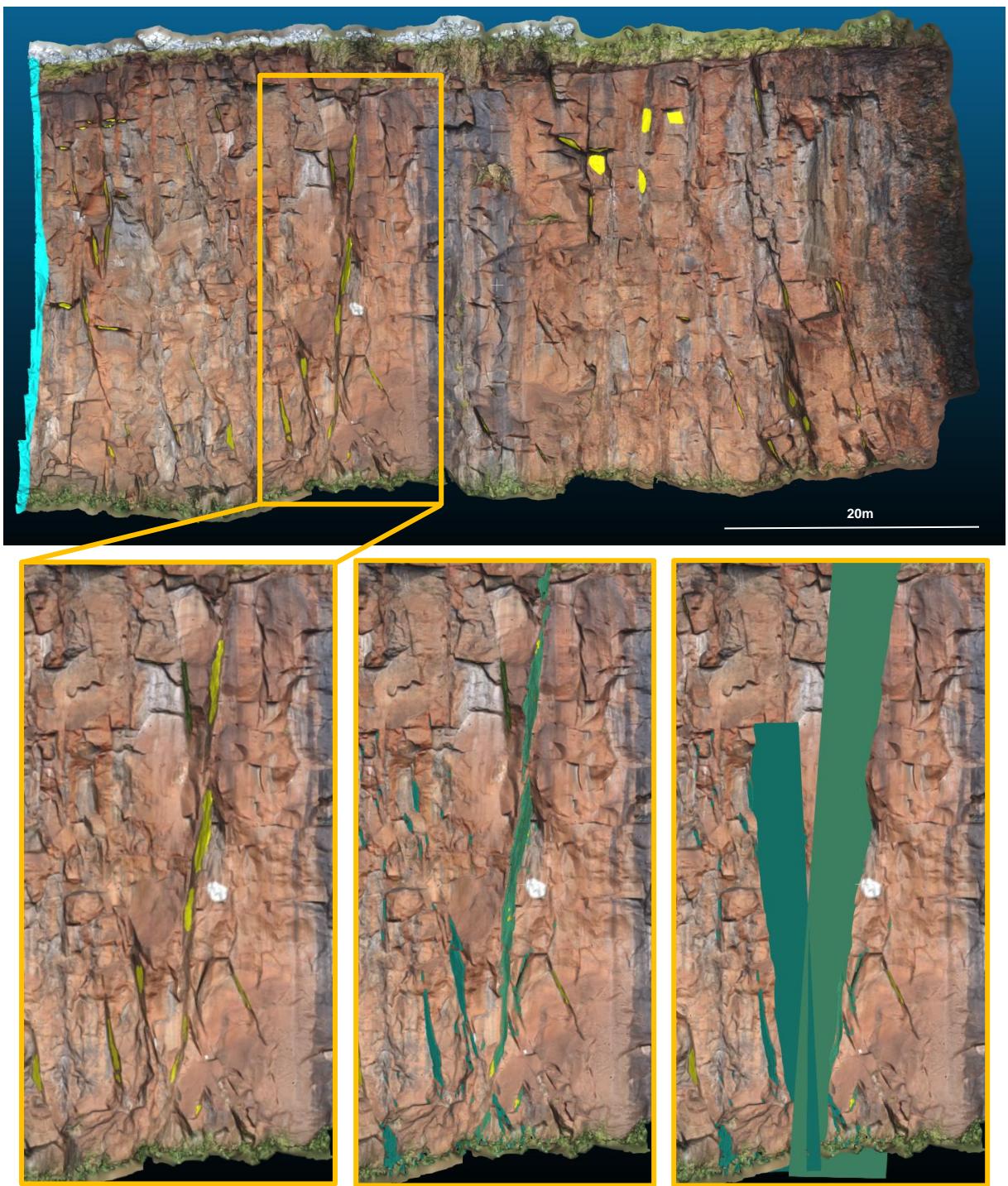


Figura 21. Setor Amarelo (acima). À esquerda (abaixo), detalhe de dois planos selecionados através do MeshLab. No centro (abaixo), pontos da nuvem densa utilizados para encontrar planos. À direita (abaixo), planos encontrados pelo CloudCompare que facilitam a visualização de sua intersecção.

Outro problema observado é que a escolha dos parâmetros muitas vezes pode suprimir a quantidade de fraturas reais de uma determinada atitude, influenciando na identificação de famílias. Por exemplo, duas ou mais fraturas reais podem gerar um único plano, caso os valores atribuídos aos parâmetros de vizinhança dos pontos que formarão o plano sejam intervalos muito grandes.

O terceiro problema enfrentado foi a presença de artefatos no modelo, como a vegetação no topo e base do afloramento. Foi utilizada a ferramenta de excluir faces e vértices no modelo 3D pelo *MeshLab*, na tentativa de minimizar a geração de planos com interferência de superfícies não geológicas. O software trouxe benefícios ao encontrar as atitudes médias dos taludes necessárias para a realização da análise cinemática.

A atitude dos planos selecionados através do *MeshLab* e encontrados através do *CloudCompare* foram calculadas pelos algoritmos *ply2atti* e *RANSAC Shape Detection*, respectivamente. Os valores das atitudes estão disponibilizados no Apêndice B. Posteriormente, os dados foram importados pelo *OpenStereo* e suas projeções estereográficas foram obtidas com o objetivo de identificar conjuntos de famílias de fraturas (Figura 22). O total de medidas obtidas por cada software é exibido na Tabela 3.

Tabela 3. Resumo da quantidade de planos obtidos.

Software/ algoritmo	Setor Azul	Setor Vermelho	Setor Amarelo	Total
<i>MeshLab/ ply2atti</i>	58	231	176	465
<i>CloudCompare/ RANSAC_SD</i>	86	380	284	750

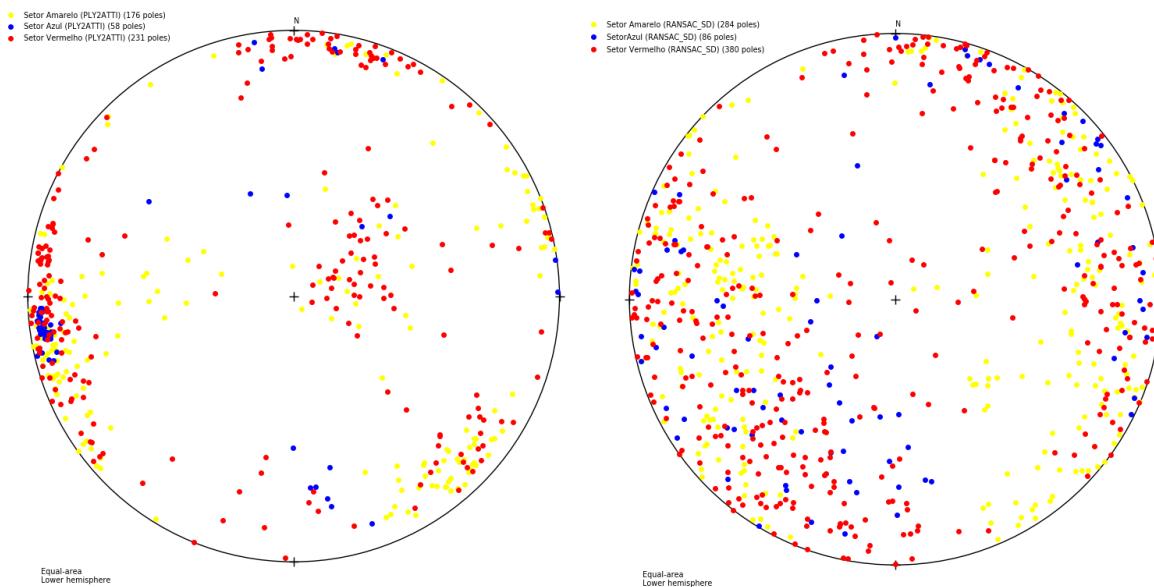


Figura 22. Projeções estereográficas geradas pelo OpenStereo planos de fraturas selecionados manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita) dos três setores do afloramento.

A projeção estereográfica das fraturas selecionadas manualmente exibe uma boa dispersão dos dados, enquanto a detecção automática apresenta valores muito dispersos e pouco confiáveis. Isso se deve ao fato de que a detecção automática encontra planos matemáticos, não levando em consideração critérios geológicos. Apesar de um plano de

fratura ser um plano matemático, o inverso nem sempre é verdadeiro. Além disso, o ajuste dos parâmetros pode gerar um plano médio entre duas fraturas, por exemplo, acarretando em uma distorção da quantidade real de fraturas existentes no afloramento que configurem uma família. Uma vez que o afloramento foi dividido em setores, realizou-se a análise das projeções de cada setor na busca de possíveis famílias de fraturas.

A Figura 23 exibe os resultados das projeções estereográficas dos pólos dos planos do setor Azul. Através da seleção dos planos pelo *MeshLab*, o resultado do Setor Azul apresentou três famílias de fraturas com direções, praticamente, ortogonais entre si. A atitude do plano da família principal é dada por 084/85 e é subparalela à face do talude, cuja atitude média do talude obtida através do *CloudCompare* é 081/86. As outras duas famílias se concentram numa pequena área do setor. Tratam-se de fraturas pouco persistentes com orientação para ENE-WSW e NNW-SSE. Pela alta dispersão dos dados obtidos através do *CloudCompare*, não foi possível identificar famílias. Porém, nota-se uma tendência de orientação em torno da direção N-S, com alto ângulo de mergulho.

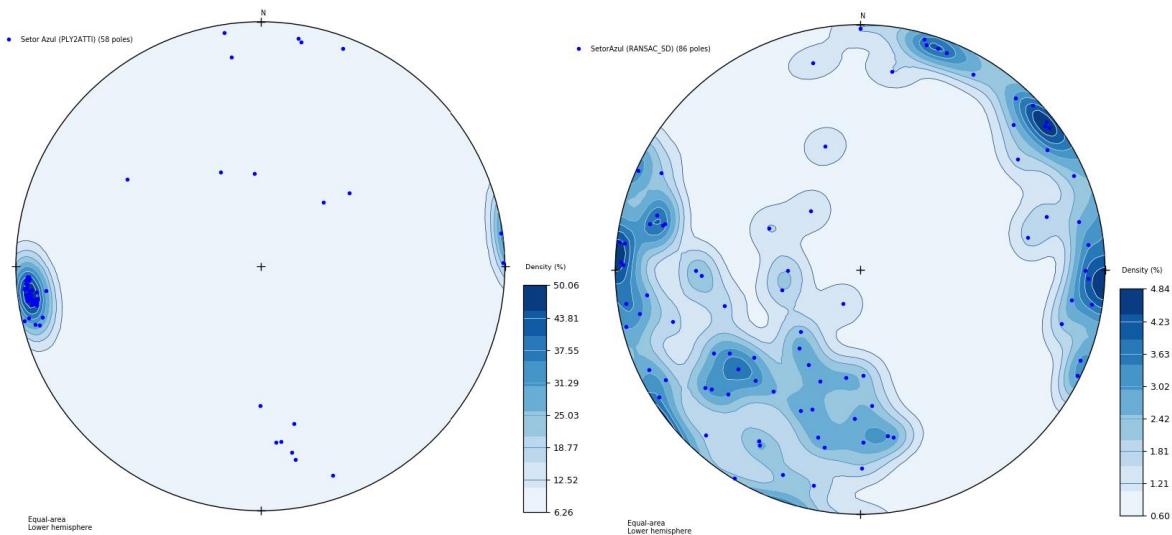


Figura 23. Projeções estereográficas geradas pelo OpenStereo dos planos de fraturas selecionados manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita) dos três setores do afloramento.

Já o setor Vermelho (Figura 24) apresenta seis famílias de fraturas através da seleção do *MeshLab*. A direção preferencial de duas das principais famílias de fraturas é dada praticamente por N-S, com forte mergulho para E. Há também uma maior frequência de fraturas com direção WNW-ESE com mergulho para NNE, NE-SW com mergulho para NW, outra família com menor frequência com direção WNW-ESE com mergulho para SSW. Ainda ocorre uma família com baixo ângulo de mergulho (~20°) para SW que ocorre em todo o setor, com maior persistência na no centro e próximo à base, e pouco persistentes quando afloram

no topo. Pelo *CloudCompare*, também ocorreu uma dispersão nos dados, sendo possível apenas sugerir que há uma tendência de fraturas com orientação WNW-ESE, com elevado mergulho. A atitude média do talude deste setor é dada por 066/88.

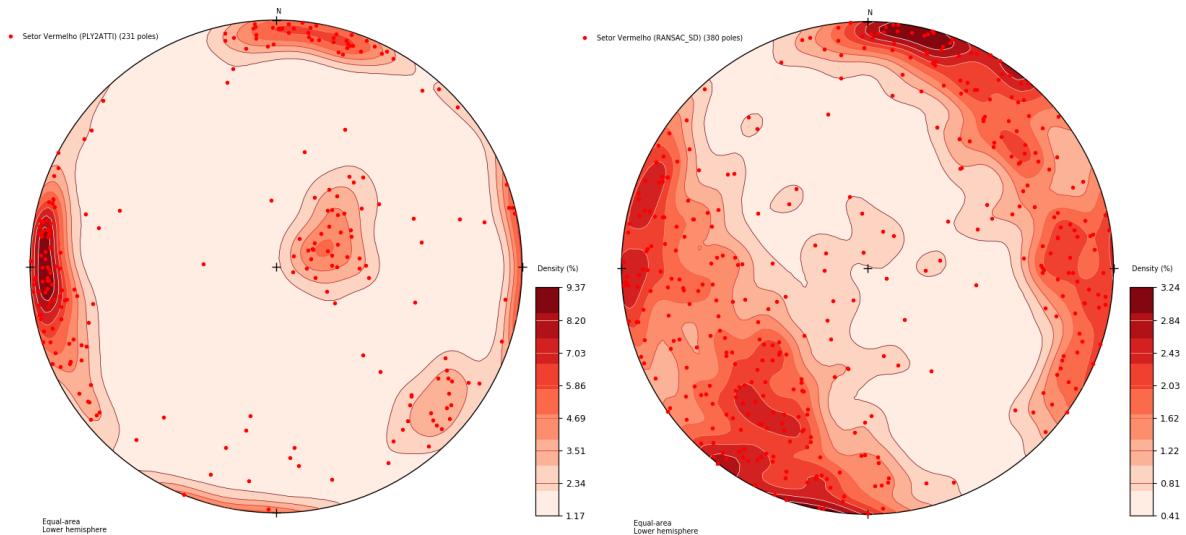


Figura 24. Projeções estereográficas geradas pelo OpenStereo dos planos de fraturas selecionados manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita) dos três setores do afloramento.

No setor Amarelo, exibido na Figura 24, ocorrem seis famílias de fraturas encontradas pelo *MeshLab*, das quais três apresentam direção NW-SE sendo duas com mergulho para SW e uma para NE. Outras famílias apresentam direção/mergulho correspondentes a NE-SW/NW, NNE-SSW/ESE e NNW-SSE/SSW, sendo a última relacionada às mesmas de baixo ângulo observadas no setor Vermelho. As fraturas de baixo ângulo ocorrem, principalmente, no topo do setor. O estereograma resultante dos planos encontrados pelo *CloudCompare* sugere uma família de orientação NNE-SSW de médio ângulo de mergulho. Essa orientação pode ser observada através do estereograma resultante do *MeshLab*. A atitude média do talude desse setor é dada por 076/87. A Tabela 4 resume as atitudes médias das famílias identificadas nos três setores.

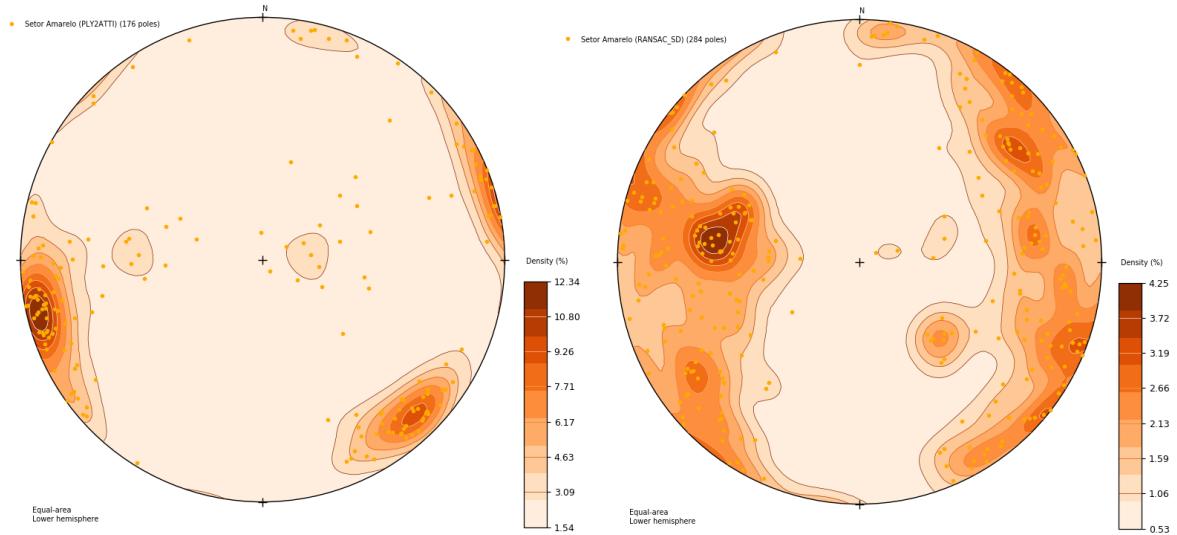


Figura 25. Projeções estereográficas geradas pelo OpenStereo dos planos de fraturas selecionados manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita) dos três setores do afloramento.

Tabela 4. Resumo das altitudes médias das famílias de fraturas encontradas por diferentes algoritmos.

	ply2atti			RANSAC_SD
Setor Azul	Família	Rumo do mergulho	Mergulho	Tendência de orientação observada
	Az1	84	85	
	Az2	350	65	N-S, com elevado ângulo de mergulho
	Az3	264	90	
Setor Vermelho	Família	Rumo do mergulho	Mergulho	Tendência de orientação observada
	Vm1	182	87	
	Vm2	195	86	
	Vm3	99	85	
	Vm4	86	83	WNW-ESE, com elevado ângulo de mergulho
	Vm5	310	77	
	Vm6	249	17	
Setor Amarelo	Família	Rumo do mergulho	Mergulho	Tendência de orientação observada
	Am1	253	89	
	Am2	194	86	
	Am3	78	84	
	Am4	316	79	
	Am5	94	45	
	Am6	265	15	NNE-SSW, com médio ângulo de mergulho

As figuras 26, 28 e 30 exibem as fraturas selecionadas manualmente (áreas coloridas) pelo MeshLab. A seleção foi baseada em critérios geológicos e foram consideradas até as

fraturas de menor área. Apesar da detecção automática não ter resultado em planos com o padrão esperado geologicamente, a atitude média do talude pôde ser calculada de maneira satisfatória, conforme exibem as figuras 27, 29 e 31.

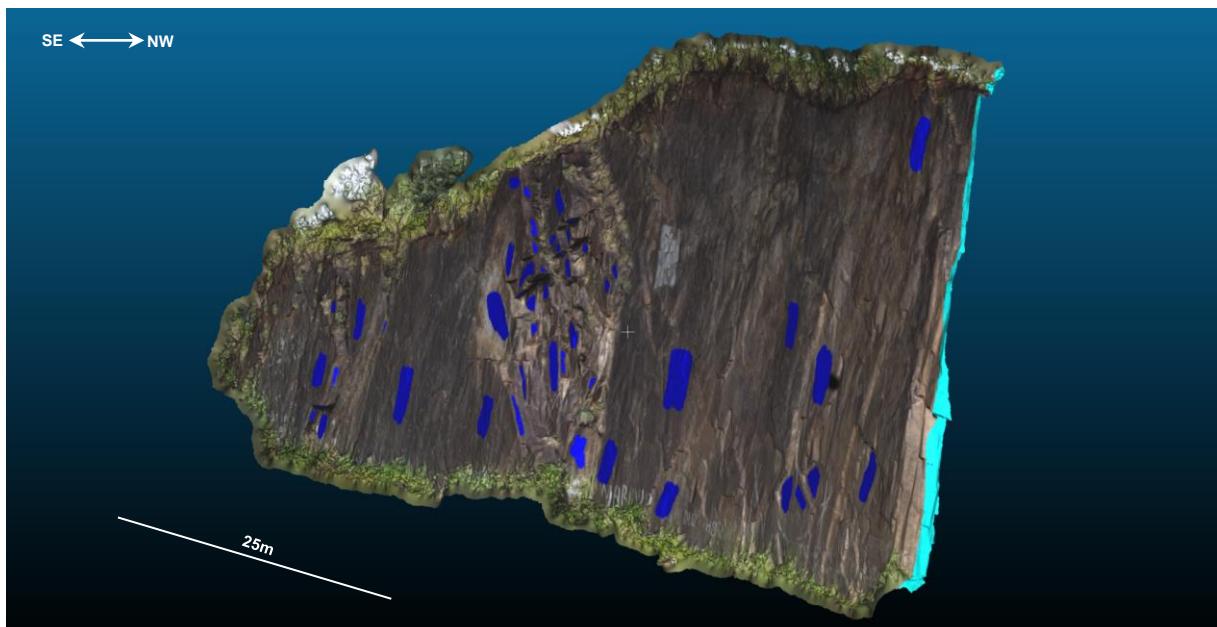


Figura 26. Visão em perspectiva do setor Azul. A imagem exibe os planos selecionados através do MeshLab (em azul).

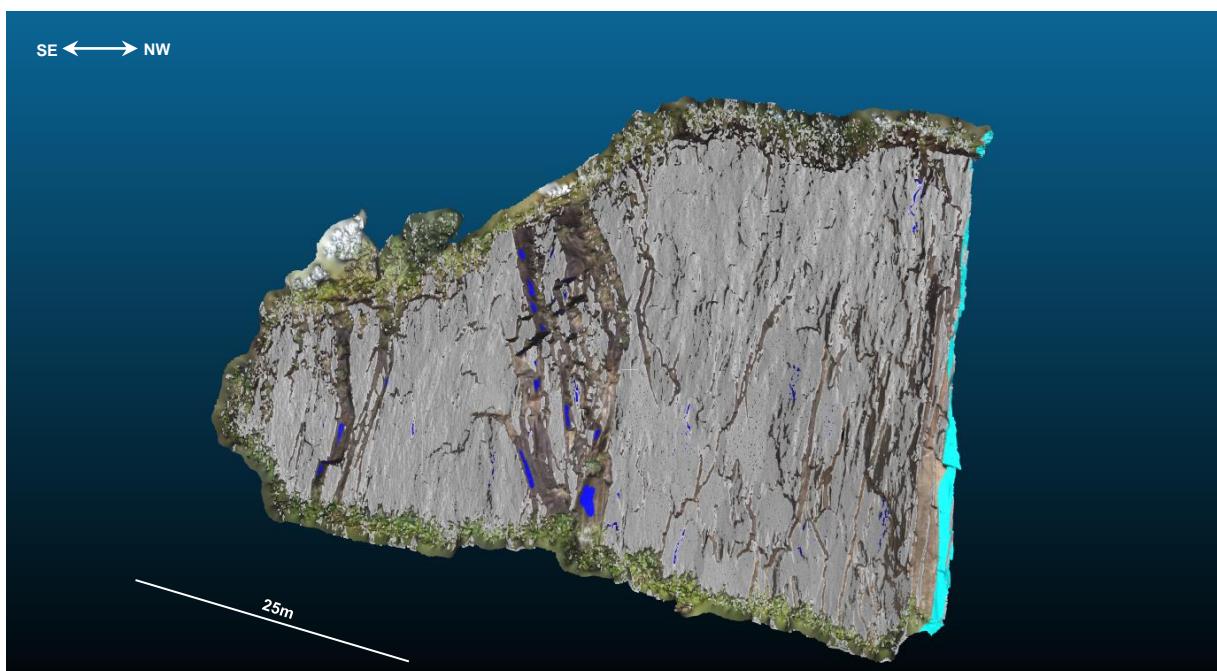


Figura 27. Visão em perspectiva das fraturas que compõe a atitude média do talude (em branco) do setor Azul, cuja medida é 081/86.

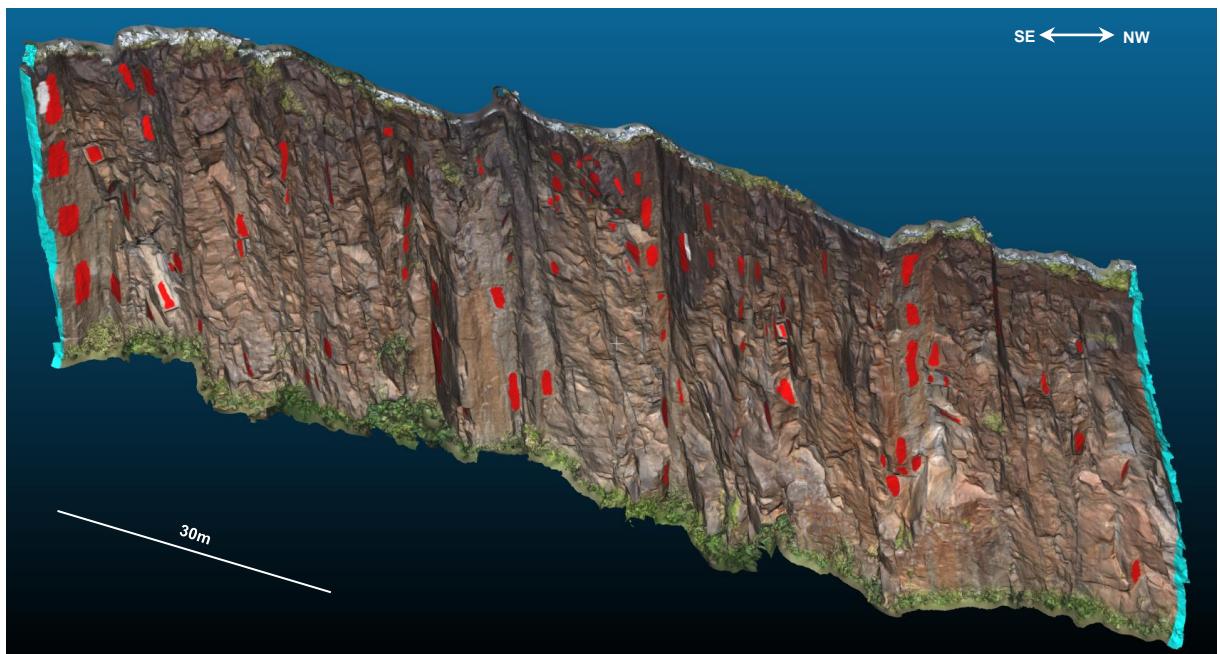


Figura 28. Visão em perspectiva do setor Vermelho. A imagem exibe os planos selecionados através do MeshLab (em vermelho).

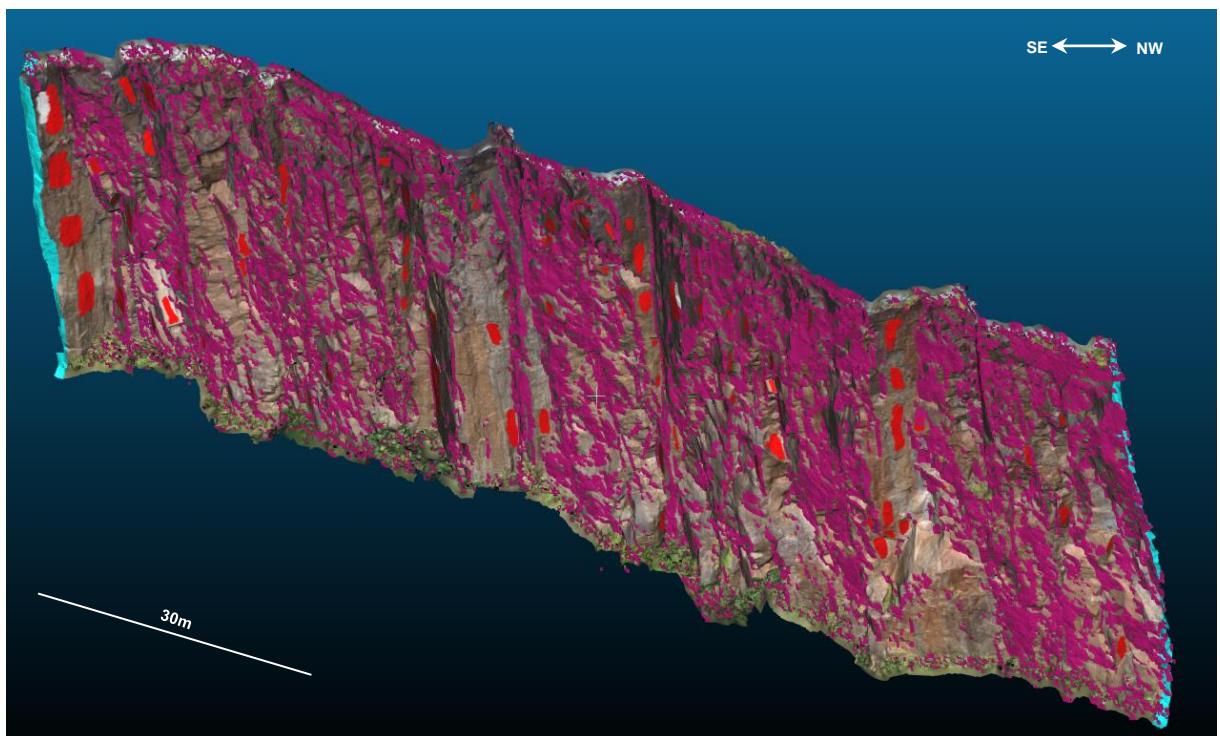


Figura 29. Visão em perspectiva das fraturas que compõe a altitude média do talude (em rosa) do setor Vermelho, cuja medida é 066/88.

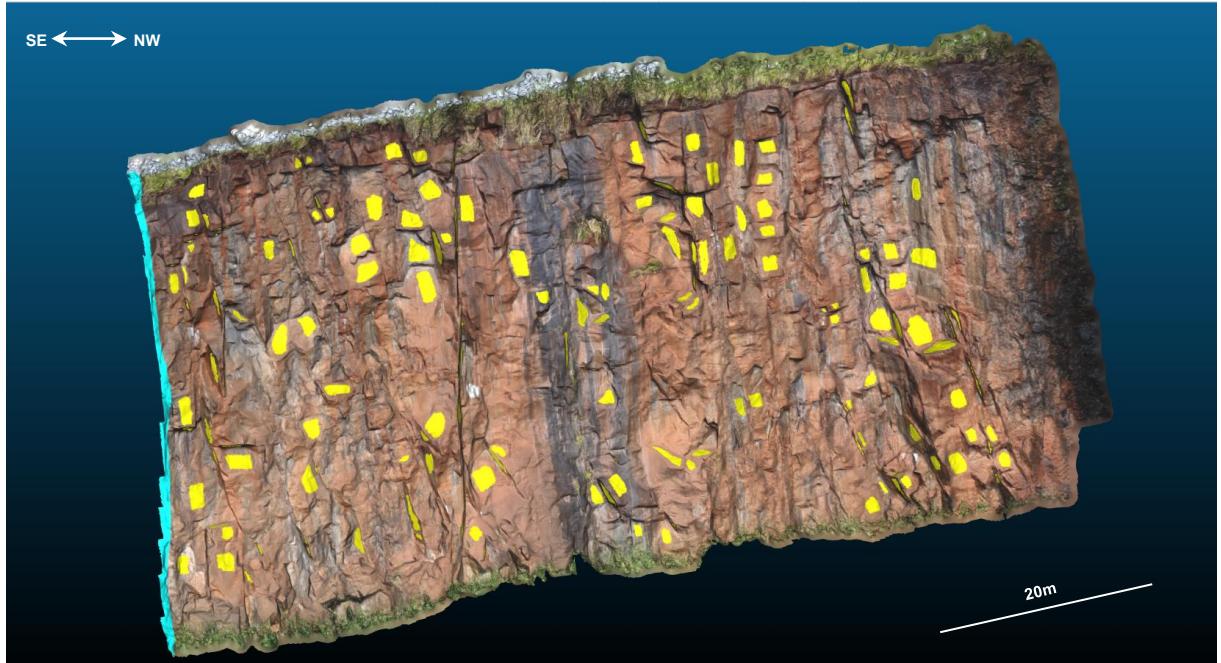


Figura 30. Visão em perspectiva do setor Amarelo. A imagem exibe os planos selecionados através do MeshLab (em amarelo).

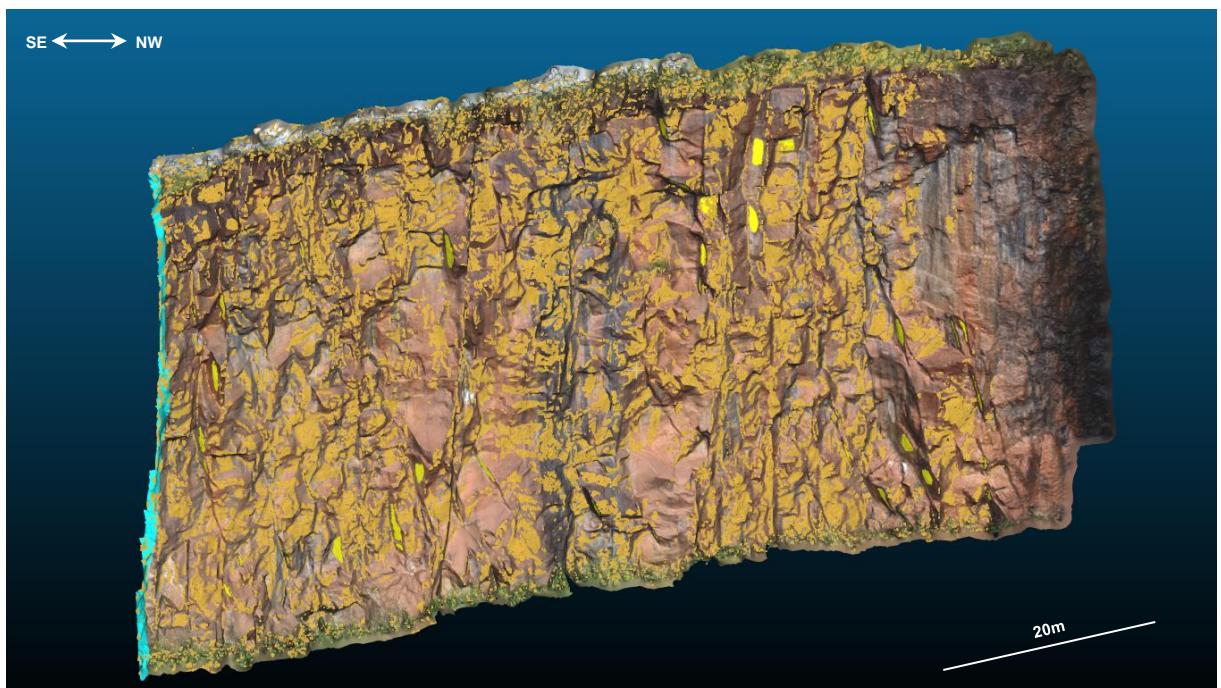


Figura 31. Visão em perspectiva das fraturas que compõe a atitude média do talude (em mostarda) do setor Amarelo, cuja medida é 076/87.

Os três setores apresentam famílias em comum com direção aproximada NNW-SSE e alto ângulo de mergulho para ENE acima de 80°. Essa direção muito se assemelha à dos taludes que varia, em média 15°, entre os setores. Observa-se ocorrência de fratura de baixo ângulo nos setores Vermelho e Amarelo, o que não é observado no setor Azul. As atitudes médias do talude para cada setor estão resumidas na Tabela 5.

Tabela 5. Resumo da atitude média dos taludes.

Setor	Rumo do mergulho	Mergulho
Azul	081	86
Vermelho	066	88
Amarelo	076	87

Para a realização da análise cinemática, além da atitude do talude, é necessário obter o valor do ângulo de atrito típico da litologia do afloramento. O ângulo de atrito escolhido foi de 35° com o objetivo de se manter entre os intervalos encontrados na literatura, conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6. Resumo de valores para ângulo de atrito do basalto.

		Intervalo do Ângulo de Atrito	Autor
Basalto	Rocha sã	Úmida	35-38°
		Seca	31-36°
			(Wyllie & Mah, 2005), (Barton, 1973), (Jaegar & Cook, 1976)
		34-40°	

Os resultados da análise cinemática dos setores Azul, Vermelho e Amarelo são exibidos nas figuras 32, 33 e 34, respectivamente. No estereograma estão plotados o *daylight envelope*, os limites laterais foram ajustados para o padrão encontrado na literatura de 20°.

A análise cinemática sugere a possibilidade de ruptura em cunha no setor Azul, conforme mostra o estereograma da Figura 32. Ocorrem duas fraturas cuja intersecção aflora na face do talude e possui ângulo de mergulho maior do que o ângulo de atrito. Visualmente, não se nota a possibilidade de tombamento. Porém, a análise cinemática aponta essa possibilidade. Ao examinar o modelo tridimensional por vários ângulos, observa-se que alguns dos planos pouco persistentes possuem um leve mergulho na direção oposta ao mergulho da face do talude.

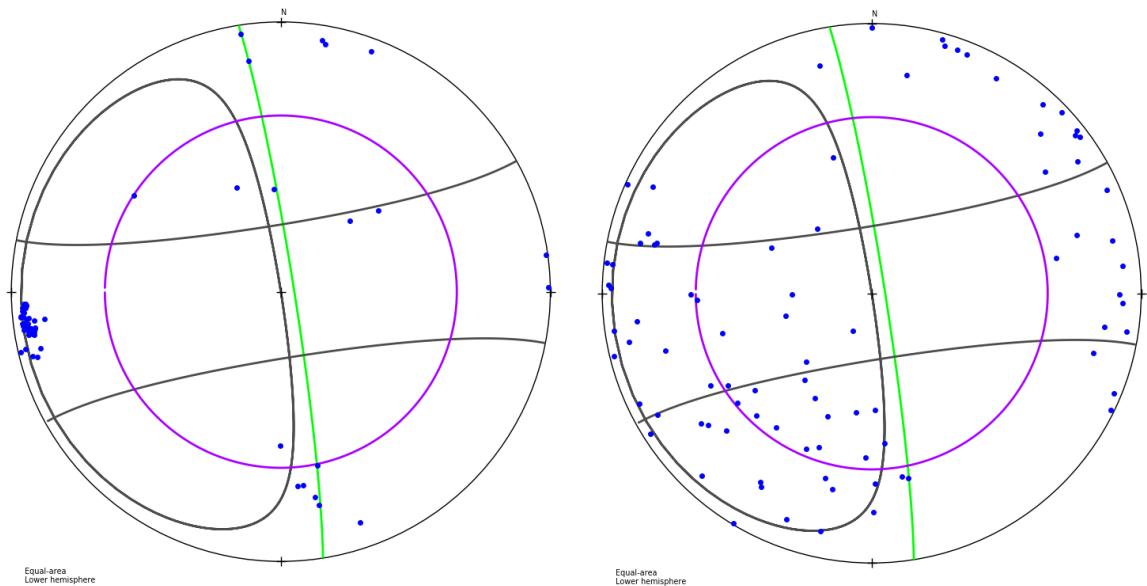


Figura 32. Análise cinemática do setor Azul das fraturas selecionadas manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita). A projeção exibe o talude (verde), o cone de atrito (roxo) para um ângulo de 35°, o daylight envelope e os limites laterais (ambos em preto).

A análise cinemática do setor Vermelho sugere escorregamento planar e tombamento (Figura 33). Dos planos selecionados via *MeshLab*, apenas um cai na zona crítica de ruptura em cunha. Nesse caso, são necessários dois planos que se intersectam para gerar um bloco em cunha.

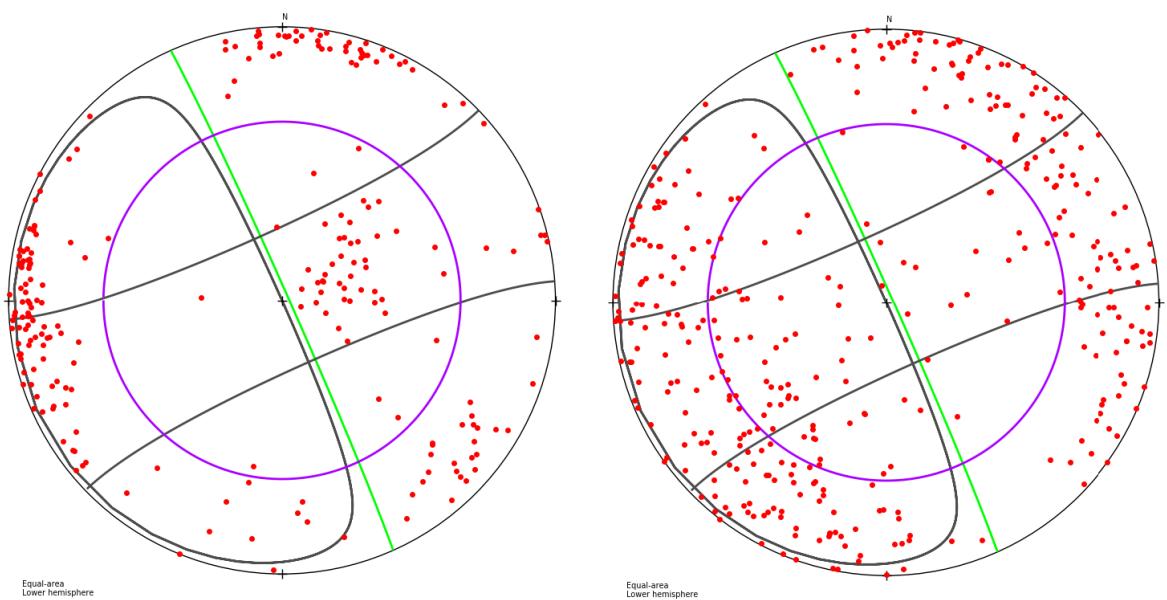


Figura 33. Análise cinemática do setor Vermelho das fraturas selecionadas manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita). A projeção exibe o talude (verde), o cone de atrito (roxo) para um ângulo de 35°, o daylight envelope e os limites laterais (ambos em preto).

Da mesma forma que o setor anterior, a análise cinemática do setor Amarelo (Figura 34) não apresentou a possibilidade de ruptura em cunha, mas sim, escorregamento planar e tombamento.

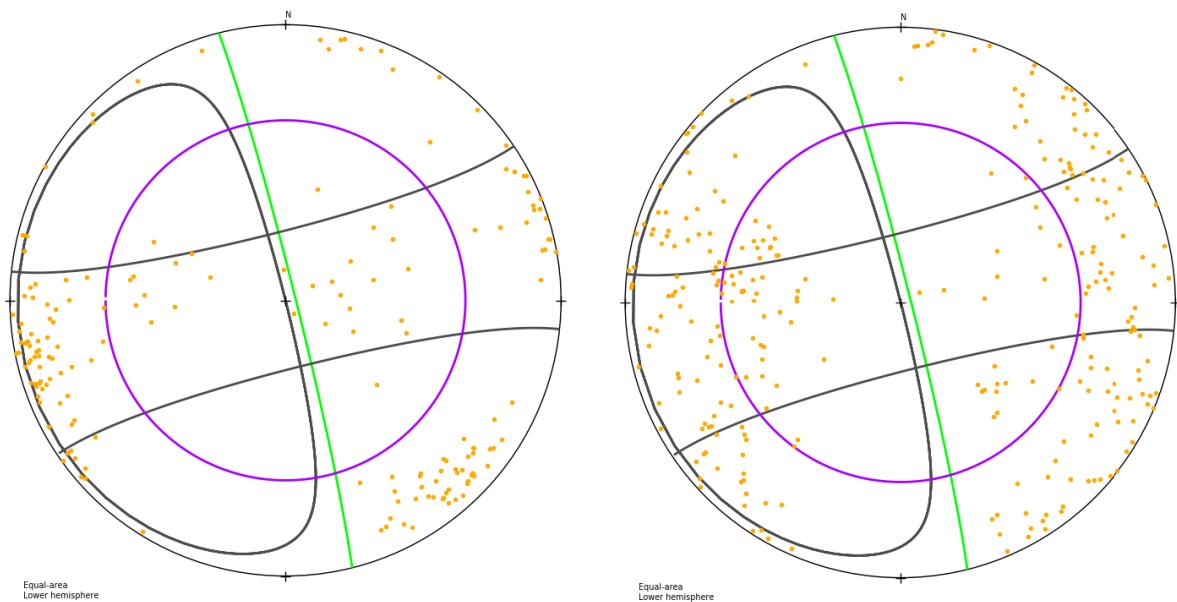


Figura 34. Análise cinemática do setor Amarelo das fraturas selecionadas manualmente (à esquerda) e por detecção automática (à direita). A projeção exibe o talude (verde), o cone de atrito (roxo) para um ângulo de 35°, o daylight envelope e os limites laterais (ambos em preto).

6 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Percebe-se um padrão de faturamento nos setores Vermelho e Amarelo. Esse padrão pode ocorrer devido uma diferença estrutural em relação ao setor Azul, ou a uma maior exposição dessas áreas às máquinas escavadeiras durante a atividade da pedreira, ou em sua inativação para adequá-la ao uso público. Observa-se duas famílias de planos muito persistentes com orientação preferencial NW-SE NE-SW com direção de mergulho opostos, cortando o afloramento, conforme exibe as figuras Figura 20 e Figura 21.

A análise cinemática do setor Azul sugere a possibilidade de ruptura em cunha e tombamento de blocos, conforme resume os estereogramas da Figura 35. A figura mostra duas fraturas cuja intersecção aflora na face do talude e possui ângulo de mergulho maior do que o ângulo de atrito. A seta indica o sentido da movimentação do possível bloco a ser formado. Visualmente, não se nota a possibilidade de tombamento, apesar do estereograma. Esse fato pode estar associado à persistência das fraturas que, por ser baixa, atenua o risco de formação e, consequentemente, tombamento de blocos. Ao examinar o modelo tridimensional por vários ângulos, observa-se que alguns dos planos pouco persistentes possuem mergulho na direção oposta ao mergulho da face do talude, conforme visto na figura abaixo.

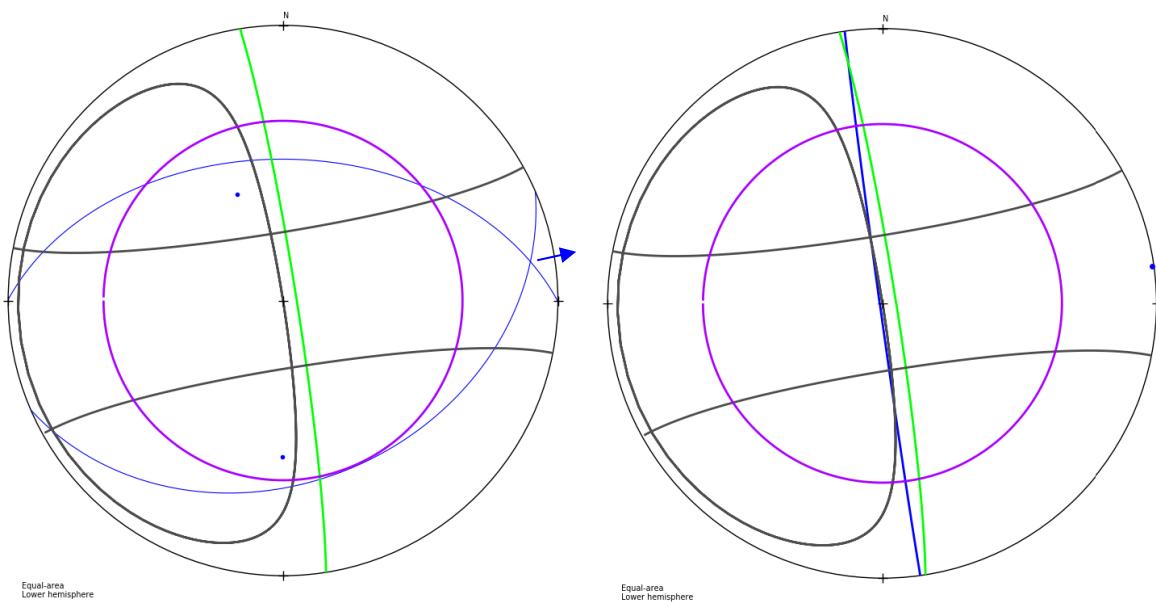


Figura 35. Estereogramas da análise cinemática do setor Azul indicando ruptura em cunha (à esquerda) e tombamento de blocos (à direita). A seta indica a direção do deslizamento.

A análise cinemática do setor Vermelho não indica ruptura em cunha. Dos planos selecionados via *MeshLab*, apenas um cai na zona crítica de ruptura em cunha pela análise

do setor Vermelho. Nesse caso, são necessárias duas fraturas que se intersectam para gerar um bloco em cunha. Os estereogramas sugerem escorregamento planar e tombamento (Figura 36).

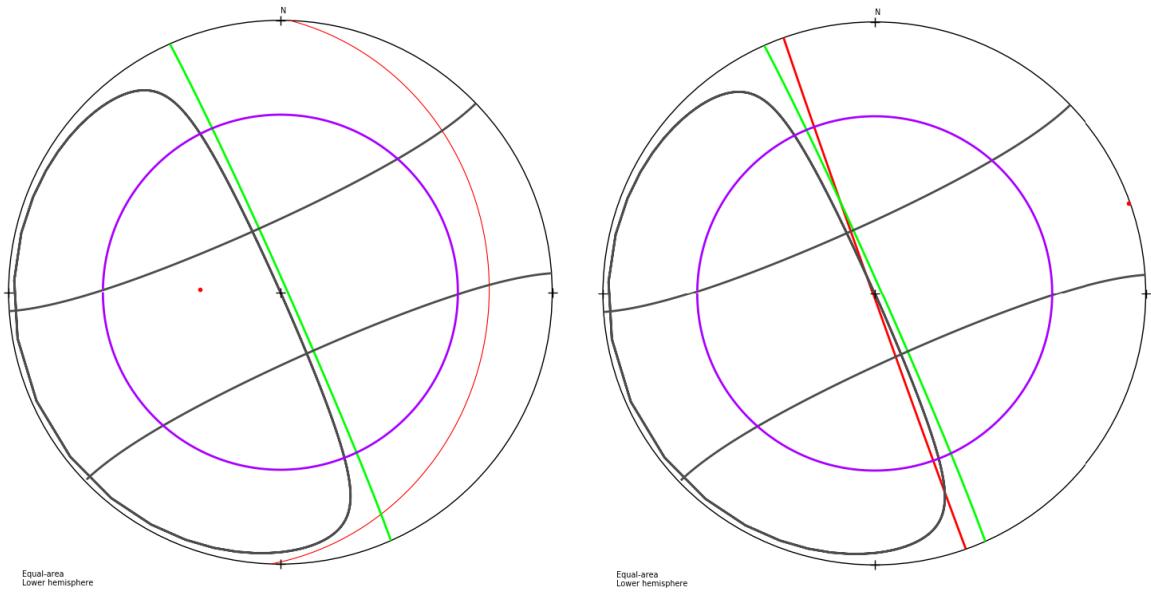


Figura 36. Estereogramas da análise cinemática do setor V indicando ruptura em cunha (à esquerda) e tombamento de blocos (à direita). A seta indica a direção do deslizamento.

Da mesma forma que o setor anterior, a análise cinemática do setor Amarelo (Figura 34) apresentou a possibilidade de escorregamento planar e tombamento.

A identificação de estruturas pelo *MeshLab* exige um certo grau de experiência tanto quanto em trabalho de campo. Já os valores de altitude obtidos através do *CloudCompare* sugerem uma maior dispersão dos dados. Este fato pode ser resultado da extração dos parâmetros ajustados, uma vez que o algoritmo do software encontra planos a partir do alinhamento de pontos. Observa-se que o número de medidas de altitude calculadas é maior através do *CloudCompare*, porém é necessário realizar um controle pelo geólogo, que pode ou não, aceitar os planos encontrados. É relevante citar que a seleção dos planos de fratura por qualquer um dos software empregados e cálculo das medidas pelos algoritmos são muito mais rápidos e eficientes que o levantamento tradicional em campo.

Alguns parâmetros de caracterização de descontinuidades não podem ser obtidos pelo modelo digital como preenchimento, que exigem conhecer a composição mineral do material, infiltração ou resistência à compressão fazendo-se necessário coletar as informações em campo. As principais fraturas setor Azul aparentam possuir um valor de rugosidade JRC=2-4. Já as fraturas mais persistentes (decamétricas) do setor Vermelho apresentam um valor de

rugosidade maior, na escala JRC em torno de 6-8. Outras fraturas menos persistentes possuem uma superfície mais lisa (JRC=0-2, 2-4) em todos os setores.

Estruturas pré-existentes se estabelecem como zonas de fraqueza, facilitando rupturas em planos preferencias. Fraturas de grandes dimensões e com padrão de orientação reforçam a ideia da presença dessas estruturas. Nesse contexto, ocorrem três famílias de maior destaque. No setor Azul, a família subparalela ao talude NNW. No setor Vermelho, duas famílias de fraturas com direções NW-SE e NE-SW se destacam e se apresentam como as de maior persistência. A orientações das principais fraturas do setor Vermelho se assemelham à orientação das estruturas observadas nos diabásios geradas pelo evento T₀₁NW, onde o esforço principal na direção NW resultou em estruturas com direção em torno de NS e EW. Apesar de não se poder afirmar, o próprio desenvolvimento da Bacia do Paraná contou com deposições e derrames que se alocaram em antigas zonas de fraquezas reativadas. Sendo assim, sugere-se que as fraturas cuja a persistência era maior, principalmente, possam ter sido geradas em eventos tectônicos relacionados à quebra do Gondwana. As fraturas de baixo ângulo podem ser resquícios de intervalos de pulsos formadores do sill. Não é possível afirmar nada quanto à gênese das estruturas observadas no modelo tridimensional, pois outros parâmetros como estrias, em casos de falhas, não são possíveis de se observar. Deve-se realizar uma atividade de campo, caso seja objeto de estudo.

Para dados de orientação, o modelo fornece a oportunidade de gerar dados com os mesmos critérios geológicos que seriam utilizados em campo, com a vantagem de acessar estruturas de difícil alcance, além de coletar um maior número de dados em menos tempo que um levantamento tradicional. Atenta-se para a escolha do software a ser utilizado na seleção de estruturas geológicas. O *MeshLab* fornece resultados mais consistentes com o afloramento, pois a seleção é feita por um geólogo. Apesar disso, o *CloudCompare* mostrou adequado para fornecer a atitude média do talude.

Portanto, o afloramento como um todo apresenta certo grau de instabilidade, uma vez que, seus setores estão sujeitos aos diversos tipos de rupturas devido suas fraturas. Apesar do risco de tombamento estar presente nas análises dos três setores, os planos que apresentam esse tipo de ruptura são pouco persistentes. O mesmo se aplica para os setores Vermelho e Amarelo que não apresentaram ruptura em cunha, pois a intersecção das fraturas mais persistentes não é vista aflorando na face do talude. O escorregamento planar poderá ocorrer nesses setores, porém, o alto grau de faturamento leva à formação de planos pouco persistentes com orientação semelhante à do talude, sendo mais difícil a identificação desse tipo de ruptura visualmente. Uma vez que a área é utilizada para atividades recreativas, sugere-se uma atenção quanto aos pequenos blocos que podem se formar e movimentar.

7 CONCLUSÕES

A missão com o *drone* se mostrou uma ferramenta extremamente eficiente no que se refere a rapidez na coleta de dados, ao volume de fotografias a serem obtidas e armazenadas e na redução de interferências naturais como a variação da exposição da luz na cena. O tempo de aquisição de 539 fotografias pelo *drone* foi em torno de 2 horas, o que justifica seu uso no projeto e reforça a importância da sua aplicação. O *PhotoScan* mostrou-se uma ferramenta fácil de ser utilizada, com menu coerente com as etapas do fluxo de processamento. A etapa mais trabalhosa é durante o pré-processamento com o uso da ferramenta Máscara que esconde informações irrelevantes para a geração do modelo tridimensional. Dentre as etapas de processamento, a geração do *mesh* é a mais demorada. O tempo varia de acordo com os parâmetros de qualidade ajustados. O *MeshLab* é mais difícil de utilizar, pois sua interface não deixa as ferramentas óbvias. Outro problema enfrentado é que o software não grava a seleção da cor, dureza e tamanho do pincel da ferramenta *ZPainting*, sendo assim, a cada novo plano a ser pintado deve-se ajustar novamente esses parâmetros, tornando o trabalho demorado e repetitivo. Apesar disso, o software é o mais adequado para obter informações de fraturas, pois a seleção de planos manual é feita com base em critérios geológicos. O *CloudCompare* possui uma interface semelhante ao *PhotoScan*. A geração dos planos mostrou-se uma etapa rápida, porém, o ajuste dos parâmetros para o alinhamento dos pontos é uma tarefa trabalhosa e requer atenção para não gerar resultados sem compatibilidade entre planos matemáticos e planos geológicos. A extração de planos geológicos a partir dessa técnica não se mostrou adequada. Sendo assim, os dados utilizados para identificação de famílias e análise cinemática foram obtidos através do *MeshLab*. O algoritmo *ply2atti* calcula de maneira rápida as atitudes dos planos selecionados na malha tridimensional que são plotadas pelo *OpenStereo* que forneceu ferramentas para a análise cinemática.

As descontinuidades exercem grande influência na estabilidade dos maciços, sendo que esse parâmetro é estudado nos diversos sistemas de classificação de maciços rochosos. Uma vez que é necessário conhecer as propriedades físicas de um maciço rochoso para caracaterizá-lo, classificá-lo e realizar a análise cinemática, o uso do modelo tridimensional mostra-se eficiente na aquisição de parâmetros necessários para a classificação. Os dados obtidos através dos software fornecem informações sobre a disposição de descontinuidades no espaço, possibilitando a realização de uma análise cinemática com um número de medidas de atitude mais representativo. As ferramentas digitais possibilitam explorar áreas inacessíveis do afloramento, tornando o levantamento estrutural mais abrangente. Cabe ao

geólogo executar o controle de qualidade das imagens e resultados gerados por diferentes algoritmos.

A metodologia utilizada neste trabalho mostrou-se eficiente ao longo do projeto e reforça que o uso de novas tecnologias no levantamento de dados geológicos torna as atividades de campo mais rápidas e seguras e os resultados mais completos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agisoft LLC (2016) 'Agisoft PhotoScan User Manual', Professional Edition, Version 1.2, p. 37. Disponível em: www.agisoft.ru.
- Agüera-Vega, F. et al. (2018) 'Reconstruction of extreme topography from UAV structure from motion photogrammetry', *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. Elsevier, 121(February), pp. 127–138.
- Almeida, F. F. M. (1986) Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *Rev. Bras. Geociências* 16(4): 325-349
- Assali, P. et al. (2014) 'Surveying and modeling of rock discontinuities by terrestrial laser scanning and photogrammetry: Semi-automatic approaches for linear outcrop inspection', *Journal of Structural Geology*. Elsevier Ltd, 66, pp. 102–114.
- Barlow, J., Gilham, J. and Cofrã, I. I. (2017) 'Kinematic analysis of sea cliff stability using UAV photogrammetry', *International Journal of Remote Sensing*.
- Barton, N. and Choubey, V. (1977) 'The shear strength of rock joints in theory and practice', *Rock Mechanics Felsmechanik Mécanique des Roches*, 10(1–2), pp. 1–54.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974). Enginnering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6(4), 189-236.
- Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Trans S. Afr. Inst. Civ. Eng.*, 15:335-343.
- Carrivick, J. L., Quincey, D. J., Smith, M. W. (2016). Structure from Motion in the Geosciences. (1a ed.) *Wiley Blackwell*.
- Cignoni P., Callieri M., Corsini M., Dellepiane M., Ganovelli F., Ranzuglia G. (2008). MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. *Sixth Eurographics Italian Chapter Conference*, 129-136, Italy
- CloudCompare (2018). Acesso em 30 de setembro de 2018, <<https://www.danielgm.net/cc/>>.

ESRI (2018). *Differential GPS Explained*. Acesso em 15 de maio 2018, <<http://www.esri.com/news/arcuser/0103/differential1of2.html>>.

Fernandes A. J., Azevedo Sobrinho J. M., Teixeira A. L. (1993). *Mapa Geológico do Município de Campinas e Mapa de Pontos Geológicos e Geomorfológicos do Município de Campinas*. Escala 1:50.000. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo/Instituto Geológico.

Fernandes, A. J. (1997) Tectonica cenozóica na porção média da bacia do rio Piracicaba e sua aplicação à hidrogeologia. Tese de doutorado. São Paulo: Instituto de Geociências. USP.

Firpo, G. et al. (2011) 'Use of Digital Terrestrial Photogrammetry in rocky slope stability analysis by Distinct Elements Numerical Methods', *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Elsevier, 48(7), pp. 1045–1054.

Frank, H.T., Elisa, M., Gomes, B., Luiz, M., Formoso, L., 2009. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. Pesqui. em Geosci. 36, 49–57

Furukawa, Y e Hernández, C. (2013). Multi-View Stereo: A Tutorial. Foundations and Trends in *Computer Graphics and Vision*, 9(1-2), 1-148.

Grohmann, C. H. et al. (2019). Semi-automatic UAV-based SfM survey of vertical surfaces, pp. 10–13. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto [artigo submetido].

Haneberg, W. C. (2008) 'Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.

Hudson, J. A. and Harrison, J. P. (1997) *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*.

ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, COMISSION ON STANDARDIZATION OF LABORATORY AND FIELD TESTS 1978. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *Int. J. of Rock mechanics and Mining Sciences* 15: 319-368.

Kurz, C., Thormahlen, T., & Seidel, H.-P. (2011). Visual Fixation for 3D Video Stabilization. *JVRB - Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 8(2011)(2).

- Machado, F. B. et al. (2005) 'As rochas intrusivas da Formação Serra Geral na Porção leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo: Aspectos petrográficos e geoquímicos - Resultados preliminares', *Geociencias*, 24(1), pp. 5–17.
- Micheletti N., Chandler J. H., Lane S. N. (2015). Sec 2.2: Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. In: Cook, S.J., Clarke, L.E. & Nield, J.M. (Eds.) *Geomorphological Techniques* (Online Edition), British Society for Geomorphology, London. ISSN: 2047-0371.
- Piccirillo E .M. and Melfi A. J. (1988), *The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects*, São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, SP, Brasil.
- Rossetti, L. et al. (2018) 'Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Elsevier B.V., 355, pp. 98–114.
- Salvini, R. et al. (2013) 'Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and rock fall runout along the Domodossola-Iselle railway, the Italian Alps', *Geomorphology*.
- Schnabel, R., Wahl, R. and Klein, R. (2007) '<RANSAC for Point Cloud Segmentation.pdf>', 0(0), pp. 1–12.
- Sturzenegger, M. and Stead, D. (2009) 'Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts', *Engineering Geology*. Elsevier B.V., 106(3–4), pp. 163–182.
- Vasuki, Y. et al. (2014) 'Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach', *Computers and Geosciences*. Elsevier, 69, pp. 22–32..
- Viana, C. D. (2015). *Análise estrutural de descontinuidades baseada em técnicas de structure from motion: aplicação em mina a céu aberto*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências. USP.
- Viana, C. D., Endlein, A., Campanha, G. A. C., Grohmann, C. H. (2016). Algorithms for extraction of structural attitudes from 3D outcrop models. *Computers&Geosciences*, 90, 112–122.
- Wyllie, D. C. e Mah, C. W. (2007) 'Rock Slope Engineering Civil and Mining', 4th ed. Spon Press, London.

APÊNDICE A – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A COLETA DE DADOS DE CAMPO



Figura 37. Visão geral do afloramento.



Figura 38. Equipamentos utilizados para a coleta de dados para georreferenciamento do maciço rochoso. À esquerda, dGPS modelo Spectra Precision SP60. À direita, estação total modelo Topcon GPT 3200NW.



Figura 39. Drone modelo DJI Phantom 4Pro com câmera acoplada utilizado para a aquisição das imagens fotográficas do afloramento.

APÊNDICE B – RESULTADOS OBTIDOS PELO PHOTOSCAN

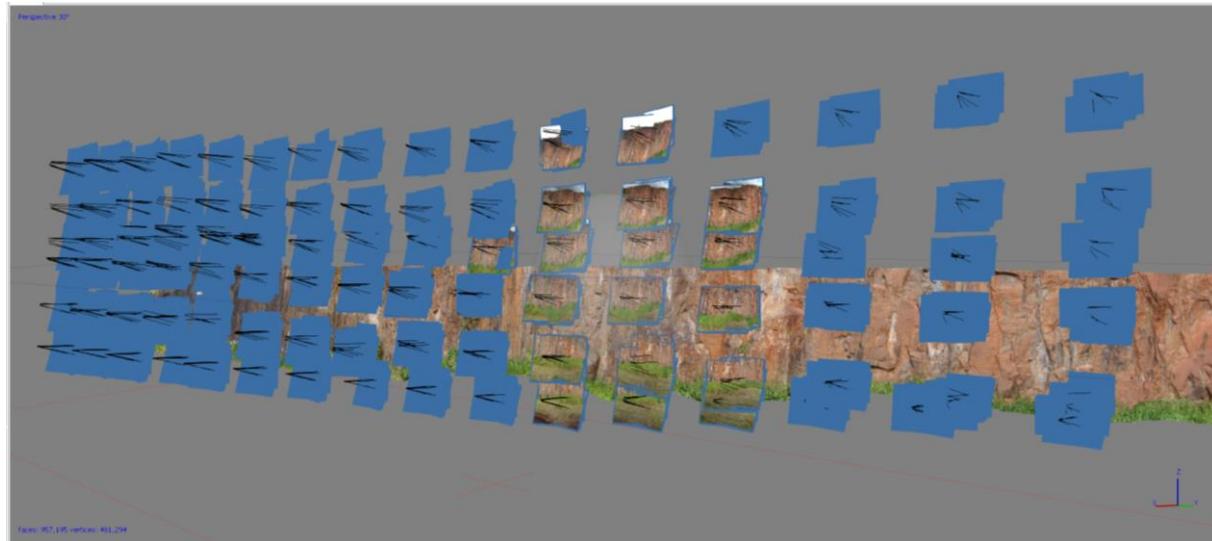


Figura 40. Resultado da missão do drone com o objetivo de obter 80% de sobreposição entre as imagens. Os retângulos azuis representam as fotografias obtidas em cada parada e alinhadas no software PhotoScan. Notar posição da câmera (fotografias).

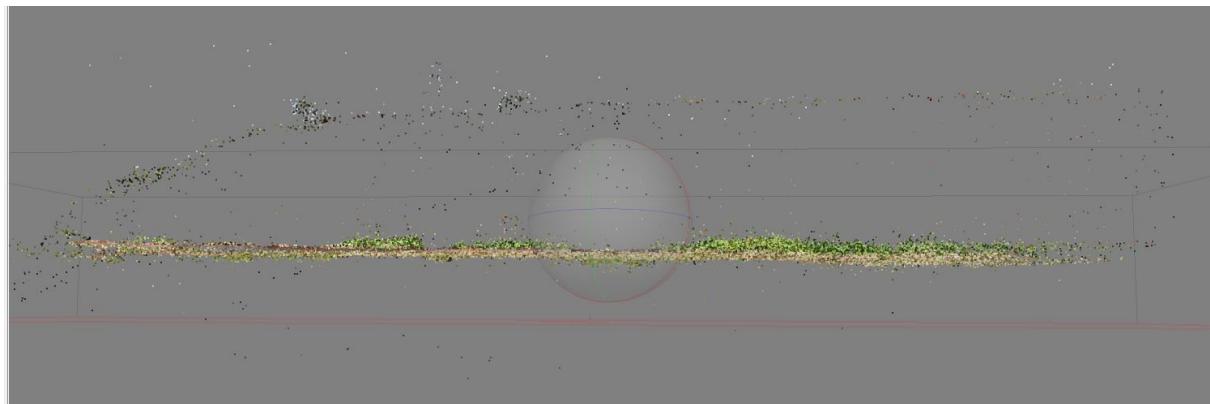


Figura 41. Resultado da geração de nuvem esparsa de pontos pelo software PhotoScan.

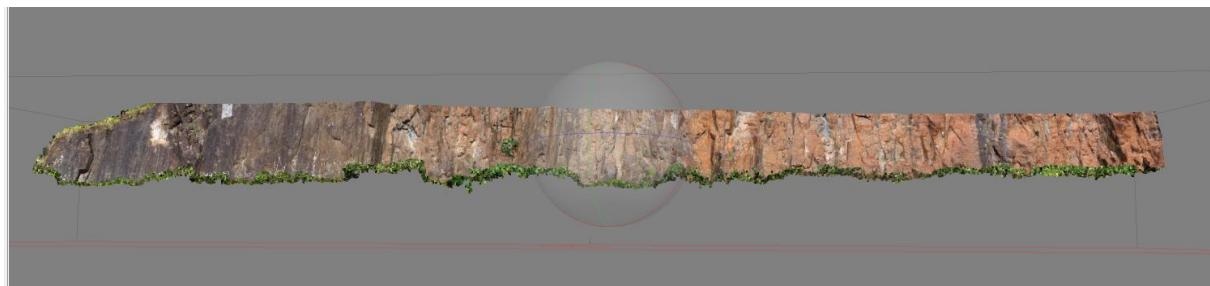


Figura 42. Resultado da geração de nuvem densa de pontos pelo software PhotoScan. Apesar das cores serem parecidas com a original, os pixels ainda não contêm os valores reais da textura, que será inserida na etapa final.

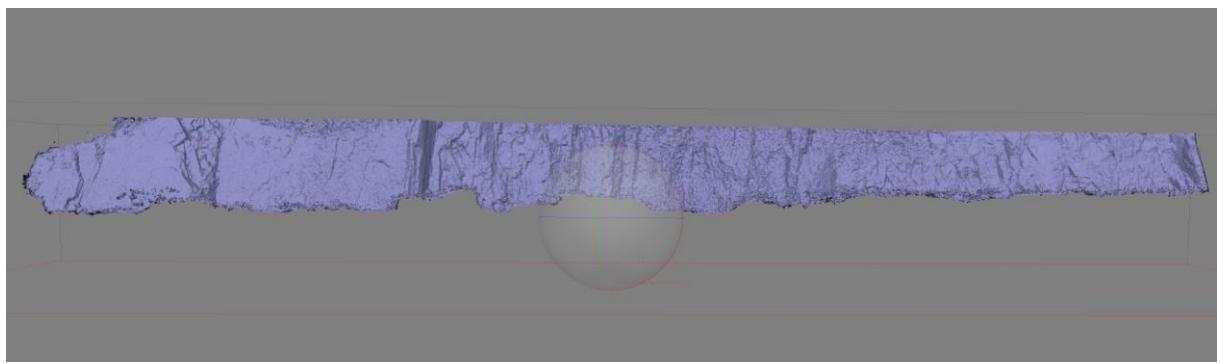


Figura 43. Visão geral do mesh gerado a partir da nuvem densa de pontos da área de estudo.

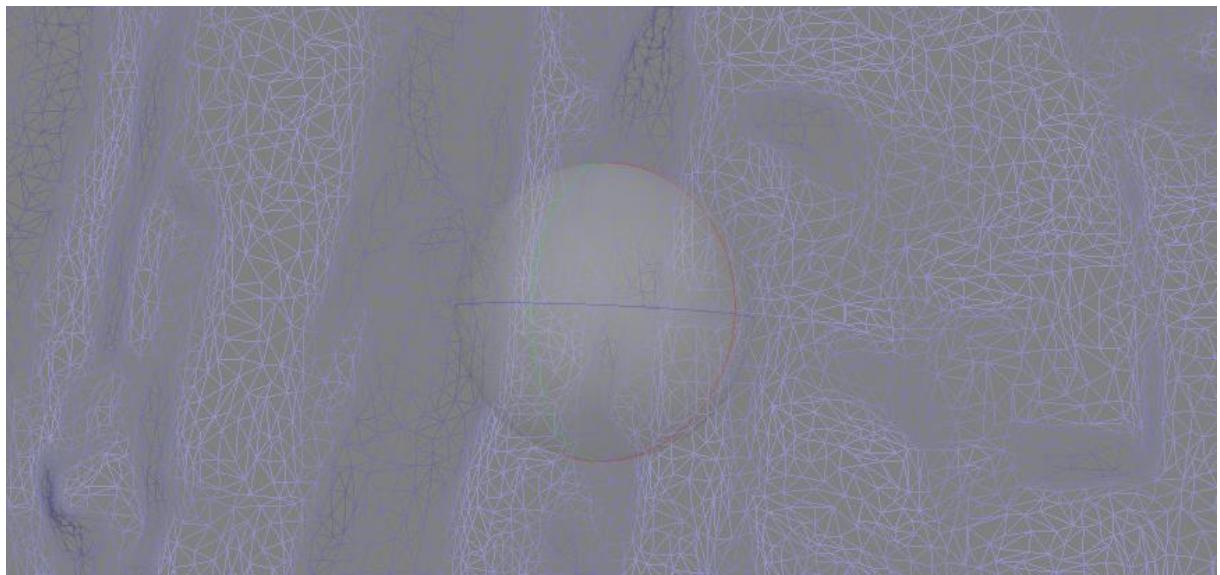


Figura 44. Detalhe do mesh gerado a partir da nuvem densa de pontos da frente de lavra da Pedreira Garcia. Notar polígonos triangulares.

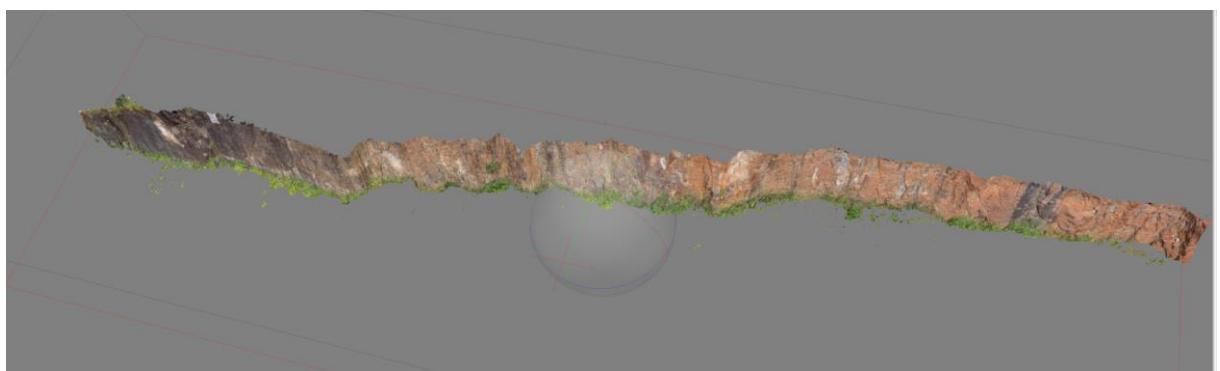


Figura 45. Modelo 3D da frente de lavra Pedreira Garcia reconstruído a partir de um conjunto de fotografias. A visualização em perspectiva facilita o reconhecimento das três dimensões.

**APÊNDICE C – DADOS DE COORDENADAS DOS PONTOS DE CONTROLE
CALCULADOS E DADOS DE ATITUDES CALCULADOS PELO ALGORITMO PLY2ATTI**

Tabela C.1 – Coordenadas calculadas dos pontos de controle.

Ponto	X	Y	Z
1	282736.1	7465456	617.882
2	282736.6	7465455	615.281
3	282728.3	7465488	617.759
4	282727.8	7465489	623.559
5	282727.4	7465490	630.26
6	282716.9	7465511	634.417
7	282718.0	7465510	625.401
8	282718.9	7465509	617.95
9	282707.4	7465535	639.818
10	282707.1	7465535	628.303
11	282706.6	7465535	619.021
12	282693.5	7465567	641.846
13	282693.1	7465566	630.571
14	282693.8	7465567	619.598
15	282684.9	7465595	638.463
16	282685.0	7465595	629.843
17	282684.3	7465599	620.028
A1	282736.4	7465455	616.439
A2	282729.7	7465474	626.537
A3	282729.9	7465480	614.461
A4	282726.3	7465496	635.923
A5	282727.5	7465495	616.182
A6	282721.6	7465502	626.817
A7	282714.6	7465517	626.994
A8	282704.8	7465540	627.415
A9	282703.3	7465544	641.074
A10	282702.6	7465548	624.332
A11	282698.2	7465557	631.753
A12	282696.0	7465563	641.897
A13	282683.7	7465598	628.413
A14	282686.5	7465591	621.461
A15	282691.8	7465568	628.005
A16	282705.3	7465541	632.644

Tabela C.2 – Dados calculados pelo algoritmo ply2atti do Setor Azul.

Rumo do Mergulho	Mergulho	X	Y	Z	Traço
77	89	26.3844	95.9203	634.0748	2.5753
87	85	27.3484	95.9610	622.0282	2.5237
87	85	27.4041	95.0356	618.6794	2.4002
83	85	27.8551	89.8204	622.4357	2.7170
86	86	28.0020	90.0929	617.6745	1.4053
84	84	28.2947	89.3191	616.8042	1.2741
86	86	28.4200	88.0474	616.8030	1.7310
82	85	28.4739	87.3615	621.2229	1.9402

87	84	28.1856	86.7192	624.2665	2.0492
83	85	28.6933	85.9031	618.1229	1.7393
83	85	28.6406	79.2196	631.0560	2.5174
80	84	29.8085	77.7009	620.2698	3.0056
77	87	30.1035	78.0025	614.6987	1.7953
82	86	30.9702	72.8427	615.5343	2.0676
81	82	30.8644	71.9427	624.0966	0.6301
84	87	31.1878	71.9293	623.4039	0.5969
171	86	31.5827	71.8378	619.0144	0.5070
189	84	31.9586	71.7746	615.8801	1.5689
81	84	31.9439	70.1562	620.7871	1.1474
350	69	32.3170	70.0413	619.6856	1.0018
83	84	31.4207	69.6113	624.7412	0.4413
80	82	32.6205	69.7497	619.3609	2.2333
83	81	32.1081	69.3869	623.7894	0.8965
176	31	32.0707	69.4018	625.9644	0.4366
0	47	34.1041	69.5865	617.0006	2.0730
269	89	32.0323	69.0114	625.2175	0.6108
230	39	32.2760	68.8965	624.3409	0.3468
87	84	32.3390	68.3606	626.6559	1.2612
84	87	32.3928	68.7346	624.5877	0.4156
77	81	33.6085	68.6682	618.4727	1.6517
262	89	32.4977	68.3306	624.9037	0.5547
84	86	32.6147	68.1854	622.4804	0.6575
348	56	32.9325	68.4704	623.5474	0.2848
341	79	33.1200	68.3002	620.8209	0.6239
85	85	33.3852	67.6911	623.2856	1.4681
355	62	33.1815	67.9809	624.4462	0.5621
75	85	33.0176	67.5589	621.8503	0.7082
353	62	33.1022	67.4720	625.2617	0.7998
157	34	33.3532	67.1785	622.2258	0.4958

Tabela C.3 – Dados calculados pelo algoritmo ply2atti do Setor Vermelho.

Rumo do Mergulho	Mergulho	X	Y	Z	Traço
302	23	-7.9002	169.3662	631.4899	0.9684
262	24	-7.1495	169.5654	635.8612	0.4285
250	89	-7.2195	168.1488	621.1461	1.1238
288	6	-6.9506	167.7909	635.8854	1.0022
306	76	-8.0678	167.6483	628.6051	1.7625
320	71	-6.8321	168.0453	619.0725	0.5880
65	86	-7.9568	167.2046	627.0951	1.0207
326	74	-7.0757	167.5533	619.8842	0.5194
220	82	-7.7868	166.8106	628.9085	1.3477
301	80	-6.4224	167.1824	636.6617	1.0888
202	83	-6.6624	167.0504	619.6764	1.8992

172	78	-7.4208	166.7221	626.9726	1.1555
57	78	-6.9824	166.2940	627.1965	1.3482
175	84	-6.6144	165.7076	636.6470	0.9784
308	80	-6.4865	165.1358	626.4352	0.7467
67	72	-5.2062	164.6397	617.4713	0.9101
232	29	-5.1034	164.6683	618.2501	0.9283
175	82	-5.8911	164.6459	628.8570	1.5843
65	81	-4.9796	164.5683	619.2251	1.3025
183	85	-4.8299	163.8551	633.5848	1.8756
57	85	-4.3417	162.9263	620.3244	1.1961
79	78	-4.4264	162.8519	618.7830	0.5179
242	24	-4.3243	162.4680	640.6722	0.3358
223	25	-4.1166	162.5303	631.3400	0.2233
51	82	-4.2193	162.5282	620.1272	0.3185
106	84	-4.1106	161.1870	639.3616	1.7719
101	86	-3.9527	161.1207	637.1331	1.6542
126	83	-3.9473	160.0849	633.1649	0.8979
72	89	-2.5173	157.7775	639.4441	1.4415
305	69	-2.2915	157.9585	631.2918	0.6305
274	10	-2.2528	157.3575	628.0659	0.7299
256	87	-1.7679	156.7368	628.4607	0.9207
70	76	-2.0839	156.7921	626.9775	1.5235
234	18	-1.5610	156.5816	632.2446	0.4582
69	86	-1.9630	156.9524	631.2698	0.7408
198	83	-1.0450	156.8022	640.7435	2.5585
64	77	-1.6119	156.7391	633.3093	1.6628
223	87	0.0351	156.8191	618.0476	2.3366
251	22	-1.9528	156.2639	628.0283	0.6094
199	84	-1.0076	156.1862	636.6631	2.0016
233	22	-1.5216	156.0868	630.7383	0.1747
72	86	-1.4212	156.0512	631.2391	0.5601
198	85	-0.6281	155.6509	632.7117	3.8870
102	63	0.3653	154.9383	622.3118	2.4877
229	88	1.2667	155.5359	618.3784	0.7565
191	83	-0.1640	154.4979	624.3666	1.1641
199	84	0.6598	154.5393	625.8810	2.1720
270	20	0.7583	154.6525	635.7080	0.2394
196	80	0.6920	154.2462	624.1417	0.9502
271	28	0.8524	154.2263	635.6053	0.2470
207	88	1.0160	153.3335	622.6613	1.6749
244	13	1.1458	153.2258	633.9670	0.1819
194	83	1.3640	153.3386	624.7420	1.2252
315	81	1.6376	152.2539	624.0729	0.6366
311	83	1.6391	151.8201	626.2535	3.7451
84	84	1.5343	151.2401	639.2269	1.6926
316	67	1.6636	151.4191	622.6951	0.8590

134	87	1.6415	151.2615	619.6615	0.9468
314	78	1.5529	150.8655	632.8107	0.5221
74	88	1.8258	150.3717	619.9869	1.1048
258	75	1.6727	148.9027	641.8509	0.6488
50	84	3.0996	148.0988	617.6001	1.1501
239	15	2.7341	146.6345	634.9565	0.6871
101	85	2.3904	146.8103	632.1955	0.8056
98	82	2.5697	146.8607	633.7187	1.1599
296	19	2.5124	146.7937	632.8015	0.2532
106	86	2.4881	146.3460	629.1723	1.8754
10	52	2.5114	146.1435	631.2476	0.7912
354	63	3.1726	146.1846	626.9520	1.6925
270	30	2.8702	146.1002	640.2351	0.3774
92	83	2.8012	145.7544	631.3541	1.6184
87	82	3.2110	145.7543	636.1387	1.3806
223	38	3.2383	145.4139	632.8135	0.0428
81	82	3.1460	145.2466	631.1519	0.8436
98	87	4.2230	145.3516	625.1914	2.0940
75	84	3.6189	144.6106	636.1544	1.4688
178	78	4.0724	144.3383	632.7268	1.5201
179	79	4.2028	143.8678	629.6663	0.9132
90	77	4.2899	143.6397	625.1458	1.3325
288	86	5.4505	144.0647	618.3213	0.5470
90	79	5.5248	143.7842	620.1039	0.9978
322	73	5.5840	144.0596	620.2322	0.2320
107	84	5.5836	143.2863	617.3747	1.2590
82	71	5.5421	143.2882	620.9758	0.3265
81	88	4.0425	142.5375	638.9887	1.9560
80	83	4.4371	142.5740	635.9277	1.2687
124	83	5.9595	143.2507	615.6384	1.5261
197	79	5.2056	142.8598	622.8756	0.3625
202	89	5.3467	142.7459	622.4074	0.2152
81	76	5.2657	142.3512	623.5314	1.0597
84	72	5.6153	142.2143	621.7663	1.1136
90	84	4.9412	140.0748	634.8919	2.9102
105	83	4.3069	138.2398	639.1373	1.9424
88	87	4.9819	137.6744	621.2702	2.2119
189	89	5.1535	136.9139	636.5483	2.2290
188	88	5.3662	137.0452	639.3212	0.9735
91	90	4.9166	136.9665	629.5690	0.8839
22	90	5.3389	136.8609	633.1021	1.5176
99	83	4.9862	136.8349	628.1499	1.3482
197	86	5.3083	136.8878	622.3290	2.0330
194	85	5.2643	136.7535	629.7742	0.4291
242	12	5.7153	136.2490	635.7702	0.9353
189	82	5.4648	136.4895	626.6852	0.9376

256	89	6.1251	136.1306	633.4251	1.6765
7	77	6.4021	136.4407	639.0591	1.1907
286	13	6.1657	136.1030	636.3327	0.3819
220	12	6.8937	136.1171	637.6600	0.5473
78	88	6.5058	135.9061	636.7196	0.3542

Tabela A.4 – Dados calculados pelo algoritmo ply2atti do Setor Amarelo.

Rumo do Mergulho	Mergulho	X	Y	Z	Traço
91	81	-18.9263	221.7828	620.2614	0.9014
91	84	-18.7491	221.1548	621.9097	1.0027
331	72	-19.1001	221.2350	619.1046	0.6292
311	76	-18.8450	220.9714	621.1232	0.7251
334	77	-18.8660	220.5814	625.1603	2.1656
83	82	-18.8895	219.9623	621.9850	0.7968
305	82	-19.3112	219.8305	629.0624	1.3615
257	88	-18.8575	219.4137	624.2321	1.1460
336	79	-19.6423	219.4319	628.6617	1.6393
109	35	-19.3437	218.6983	627.4580	1.1603
69	86	-18.9195	218.9361	620.3254	1.2691
119	90	-19.9923	218.3207	632.8368	1.5399
134	87	-19.9087	218.2709	637.0214	1.3142
78	82	-19.6889	217.5474	628.4842	1.8185
338	61	-19.1231	217.5746	626.8201	0.5473
76	87	-20.3212	216.5932	631.5311	0.9585
323	78	-18.8642	217.6363	620.5313	0.8991
87	89	-20.2512	216.3625	633.4039	1.2177
324	77	-19.6373	216.5885	622.3153	1.0909
332	81	-19.8747	216.2673	628.8751	1.5942
81	41	-19.9872	215.7874	628.0534	1.4063
81	84	-20.2797	215.3661	629.2793	1.4420
329	64	-19.2811	216.1253	618.4801	0.4858
79	81	-19.4859	215.7867	619.5337	0.7301
322	69	-19.6476	215.2962	619.2333	1.5294
107	23	-19.6310	215.4827	620.0018	0.3902
252	81	-20.1765	214.8445	633.4050	0.6157
55	84	-20.4797	214.6862	631.7979	1.5287
117	31	-19.7799	215.0599	620.0252	0.2013
320	84	-19.9609	214.6727	641.5626	1.7417
322	81	-19.4616	214.7684	643.4375	1.6439
83	87	-20.1607	214.3399	625.8283	0.9437
77	77	-20.2748	214.4043	619.2386	0.7669
248	90	-19.9189	213.6402	618.2646	1.0175
306	81	-20.0464	213.9470	636.6872	0.3581
53	85	-19.8698	213.4248	622.3008	0.9429
300	76	-19.7848	213.1959	621.9852	1.1533

67	75	-19.9325	212.9085	624.5151	0.5261
257	88	-19.7098	212.5558	629.7938	0.5408
239	82	-19.4881	212.6939	630.5907	0.3321
308	71	-19.9325	212.6793	624.2609	0.4528
251	71	-19.3409	211.9434	630.4510	0.2357
265	82	-19.1301	209.5995	640.6831	0.7431
277	19	-18.7752	210.0443	627.7429	0.4049
81	84	-19.0947	209.2606	638.7466	0.7811
73	63	-18.6640	209.1047	635.6549	0.6552
77	81	-18.8689	209.0286	636.9705	1.1202
71	81	-18.5191	208.9912	633.7012	0.9438
101	86	-18.6977	207.8763	640.5296	1.5706
104	88	-18.4597	207.5771	636.5927	1.5615
241	85	-18.0209	207.2709	625.6401	0.8345
285	37	-17.9318	207.5819	627.6900	0.2517

ANEXO A – RELATÓRIO DE EXECUÇÃO DO PHOTOSCAN

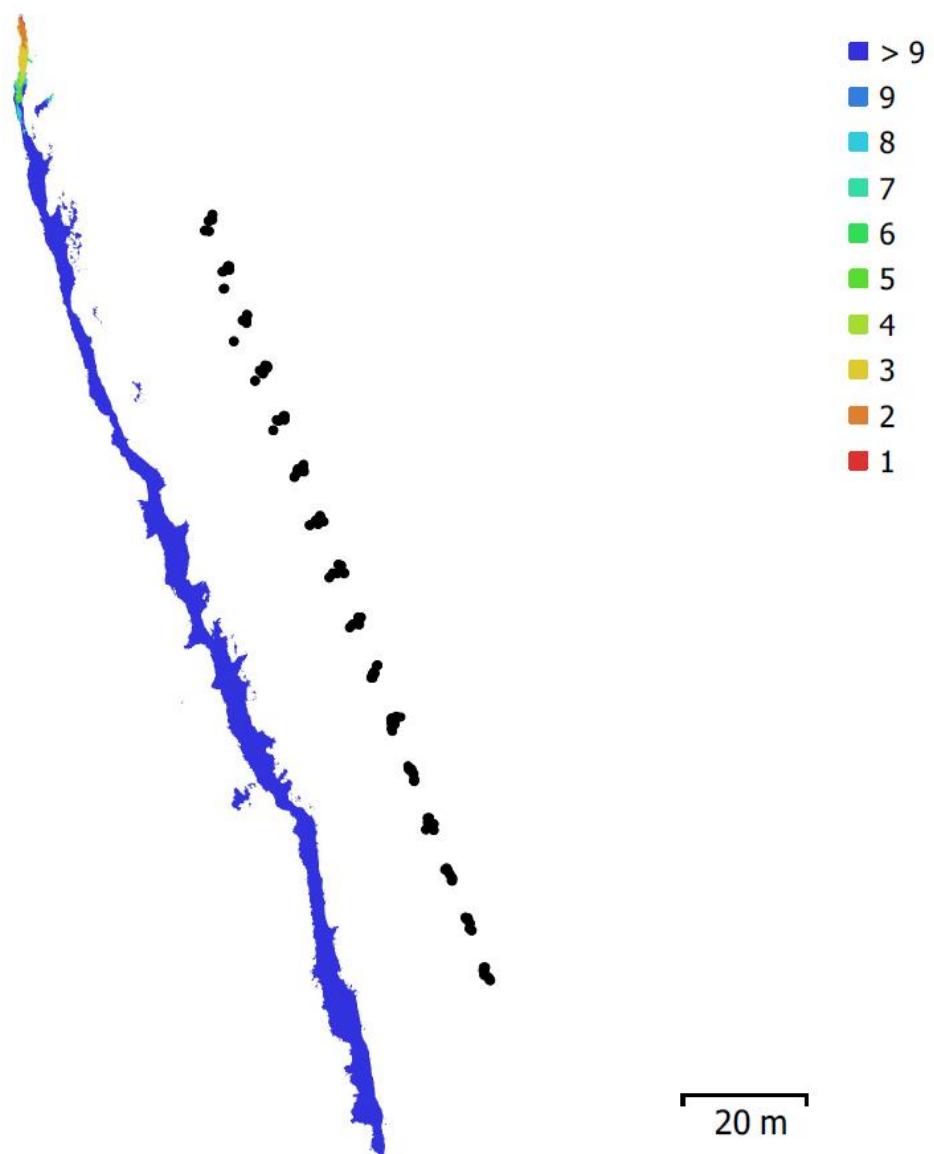


Figura 46. Localização da câmera e sobreposição de imagem. Imagem obtida pelo relatório gerado pelo PhotoScan.

Number of images:	539	Camera stations:	534
Flying altitude:	26 m	Tie points:	129,806
Ground resolution:	6.78 mm/pix	Projections:	1,992,502
Coverage area:	582 m ²	Reprojection error:	0.82 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310 (8.8 mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 µm	No

Figura 47. Informações sobre a câmera obtidas pelo relatório gerado pelo PhotoScan.

Parâmetros de Processamento

General	
Cameras	539
Aligned cameras	534
Markers	15
Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 23S (EPSG::32723)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	129,806 of 191,236
RMS reprojection error	0.209339 (0.82013 pix)
Max reprojection error	0.633545 (25.9421 pix)
Mean key point size	3.79531 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	20.6568
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	No
Reference preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Filter points by mask	Yes
Mask tie points	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	59 minutes 26 seconds
Alignment time	18 minutes 54 seconds
Dense Point Cloud	
Points	39,599,660
Point colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	6 hours 51 minutes
Dense cloud generation time	9 hours 52 minutes
Model	
Faces	7,919,932
Vertices	3,966,392
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	15,000 x 15,000 x 20, 4 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Surface type	Arbitrary
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Face count	7,919,932
Processing time	18 minutes 17 seconds
Texturing parameters	
Mapping mode	Generic
Blending mode	Mosaic
Texture size	15,000 x 15,000
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
UV mapping time	1 minutes 20 seconds
Blending time	22 hours 47 minutes
Software	
Version	1.4.2 build 6205
Platform	Windows 64

Figura 48. Parâmetros de processamento obtidos pelo relatório gerado pelo PhotoScan.