

**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE**

**Análise geomecânica em rochas carbonáticas
com auxílio de drone: aplicação em
mineração na Formação Irati**

VICTOR HUGO HOFFMANN

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

VICTOR HUGO HOFFMANN

**ANÁLISE GEOMECÂNICA EM ROCHAS CARBONÁTICAS COM
AUXÍLIO DE DRONE: APLICAÇÃO EM MINERAÇÃO
NA FORMAÇÃO IRATI**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
do Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Geociências e Meio
Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes
Vieira Reis
Coorientador: Dr. Iata de Souza

Rio Claro - SP
2024

H711a Hoffmann, Victor Hugo
Análise geomecânica em rochas carbonáticas com auxílio de drone: aplicação em mineração na Formação Irati / Victor Hugo Hoffmann. -- Rio Claro, 2024
71 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Fabio Augusto Gomes Vieira Reis
Coorientador: Iata de Souza

1. Compartimentação geomecânica. 2. Extração Automática. 3. Drone. 4. RMR. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

VICTOR HUGO HOFFMANN

ANÁLISE GEOMECÂNICA EM ROCHAS CARBONÁTICAS
COM AUXÍLIO DE DRONE: APLICAÇÃO EM MINERAÇÃO
NA FORMAÇÃO IRATI

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Instituto de Geociências e Ciências
Exatas do Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista “Júlio
de Mesquita Filho”, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Mestre em Geociências e Meio
Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis
IGCE / UNESP / Rio Claro (SP)

Prof(a). Dr. Ana Elisa Abreu
IGE / UNICAMP / Campinas (SP)

Prof. Dr. Edilson Pizzato
GSA / USP / São Paulo (SP)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 09 de maio de 2023.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Márcio Roberto Hoffmann e Sophia Lessa Hoffmann que apoiaram a minha decisão de ingressar no mestrado na área da geomecânica e uso de drones.

À minha companheira Ranielle Lara Silva que me apoiou emocionalmente ao longo de todo o trajeto e me ajudou na revisão dessa dissertação.

Ao auxílio, orientação e paciência do Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis e do Dr. Iata Anderson de Souza na elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Joao Baptista Nogueira pelo auxílio em resolver as dificuldades advindas dos softwares.

Ao Msc. Saul Hartmann Riffel pelo apoio nas primeiras expedições de campo.

À Mineração Amaral por permitir a realização do estudo na cava da mina.

Ao programa PRH-40, ANP e a FINEP pelo financiamento do projeto e auxílio financeiro.

Ao Programa de Pós Graduação em Geociências e Meio Ambiente, principalmente a Rosângela e a Lauren.

À banca avaliadora composta pelo Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis, Prof(a). Dr. Ana Elisa Abreu e Prof. Dr. Edilson Pizzato pelas correções e discussões necessárias para o aprofundamento e melhor entendimento do tema estudado.

Resumo

As características geomecânicas de unidades geológicas carbonáticas reservatório e formações sobrepostas são de extrema importância para evitar diversos problemas relacionados à perfuração e extração de petróleo em poços terrestres e marítimos. Em função da profundidade e alto custo da coleta de amostras laterais, opta-se apenas pela amostragem das rochas reservatórios. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo determinar os parâmetros geomecânicos através de levantamentos fotométricos do drone obtidos em frentes de lavra de calcário da Formação Irati, além de fornecer maiores informações de forma rápida e com baixo custo sobre o maciço. Logo, a área escolhida foi a Mineração Amaral Machado, na região de Saltinho - SP, onde é explorado o calcário dolomítico que é recoberto por folhelhos ricos em matéria orgânica e intercalados com camadas centimétricas a decimétricas de calcários, considerados reservatórios análogos do pré-sal. A estrutura local possui duas falhas principais NW, responsáveis por abater o maciço, bascular parte do acamamento sub-horizontal para um mergulho de 60° e mostrar um padrão de fraturamento composto por falhas menores, duas famílias de juntas verticais NW e uma família vertical NE. Esse padrão de fraturamento foi observado previamente pela extração automática de planos da modelagem 3D, obtidos através do drone, e o maciço recebeu classe 4 nas classificações RMR e SMR. Contudo, ambas as classificações não foram capazes de separar unidades geomecânicas da área, devido a presença de finas camadas de folhelho que atuam como desagregadoras, formando fraturas muito abertas preenchidas por argilas expansíveis. Com o intuito de resolver tal problema, foi proposto a separação do talude em 3 setores por meio do acamamento. O setor A possui o acamamento com mergulho de 60° e a cinemática de talude de deslizamento planar, enquanto o setor B apresenta o acamamento sub-horizontal e a cinemática de tombamento de blocos. Assim, notou-se a falta de detalhamento das condições geomecânicas das rochas brandas pelo RMR e SMR, sendo necessário utilizar as características do acamamento, grau de fraturamento e cinemática para detalhar o talude, resultando em uma divisão de 11 compartimentos distintos, cujos compartimentos 7, 8 e 10 são os mais críticos e possuem zonas de queda de blocos, enquanto o compartimento 11 é uma zona de atenção para deslizamentos.

Palavras Chave: Compartimentação geomecânica, Extração Automática, Drone, RMR.

Abstract

The geomechanical characteristics of carbonate geological units, reservoirs and superimposed formations are extremely important to avoid several problems related to the drilling and extraction of oil in land and sea wells. Due to the depth and high cost of collecting lateral samples, only the reservoir rocks were sampled. Therefore, the present work aims to determine the geomechanical parameters through photometric 3D models of the drone obtained in limestone mining fronts of the Irati Formation, in addition to providing more information quickly and at low cost about the massif. Therefore, the area chosen was Mineração Amaral Machado, in the region of Saltinho - SP, where dolomitic limestone is explored, which is covered by shales rich in organic matter and interspersed with centimetric to decimetric layers of limestone, considered analogous pre-salt reservoirs. . The local structure has two main NW faults, responsible for collapsing the massif, tilting part of the sub-horizontal bedding to a 60° dip and showing a fracturing pattern composed of smaller faults, two families of NW vertical joints and one NE vertical family. . This fracturing pattern was previously observed with the automatic extraction of 3D modeling planes, obtained through the drone and classified in class 4, regarding RMR and SMR. However, both classifications were not able to separate geomechanical units in the area, due to the presence of thin shale layers that act as disaggregators, forming very open fractures filled with expandable clays. In order to solve this problem, it was proposed to separate the slope into 3 sectors by means of bedding. Sector A has bedding with a 60° dip and planar sliding slope kinematics, while sector B has sub-horizontal bedding and block overturning kinematics. Thus, using the characteristics of the bedding, degree of fracturing and kinematics, it was possible to divide the area into 11 different compartments, whose compartments 7, 8 and 10 are the most critical and have zones of falling blocks, while compartment 11 is a zone Pay attention to landslides.

Keywords: Geomechanical Compartmentation, Automatic Extraction, Drone, RMR

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS.	13
FIGURA 2- LOCALIZAÇÃO, SUBDIVISÃO ALOESTRATIGRÁFICA E FORMA DA BACIA DO PARANÁ SEPARANDO AS SEIS SUPERSEQUÊNCIAS E CONTOURO ESTRUTURAL DO EMBASAMENTO CRISTALINO.	15
FIGURA 3- COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ NO ESTADO DE SÃO PAULO.	16
FIGURA 4- MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO DA BORDA DA BACIA DO PARANÁ E A VISUALIZAÇÃO DO ALINHAMENTO DA ESTRUTURA LOCAL NW/SE.	19
FIGURA 5- COLUNA ESTATIGRÁFICA LOCAL DA ÁREA DE ESTUDOS....	21
FIGURA 6- FOTOGRAFIA DA COLUNA ESTATIGRÁFICA LOCAL.	21
FIGURA 7- EXEMPLO DE COMO REALIZAR O RQD DIRETO.	23
FIGURA 8- REPRESENTAÇÕES DOS TIPOS DE RUPTURAS DE TALUDES	30
FIGURA 9- RELAÇÕES ANGULARES DO TALUDE E FRATURA.	32
FIGURA 10- MODELO 3D FOTOGRÁFICO COM A VISÃO EM N225.....	42
FIGURA 11- MODELO 3D FOTOGRÁFICO COM A VISÃO EM N310.....	42
FIGURA 12 – MAPA DA CAVA PROVINDA DA ORTOFOTO.	43
FIGURA 13- NUVEM Densa DO TALUDE DO SETOR B NO SOFTWARE CLOUDCOMPARE.....	44
FIGURA 15- PLANOS DE FRATURAS NÃO GEOLÓGICOS. 1- PLANO ERRADO. 2- PLANOS DE DETRITOS NO PÉ E TOPO DOS TALUDES. 3- PLANO DA FACIE DO TALUDE.	45
FIGURA 16- PLANOS DE FRATURAS DA NUVEM Densa DO TALUDE DO SETOR B FILTRADAS.....	45
FIGURA 17- ESTEREOGRAMA DE CONTOURO DOS POLOS DAS FRATURAS OBTIDAS PELA EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA. 716 MEDIDAS.....	46

FIGURA 18- ESTEREOGRAMA DE CONTORNO DOS POLOS DAS JUNTAS. 83 MEDIDAS.....	46
FIGURA 19- PRESENÇA DE HIDROCARBONETOS EM JUNTAS.	47
FIGURA 20- DIVISÃO DOS SETORES DE ACORDO AS ATITUDES DO ACAMAMENTO. A: VISÃO EM N225. B: VISÃO EM N310.	48
FIGURA 21- ESTEREOGRAMA DE CONTORNO DOS POLOS DO ACAMAMENTO DO SETOR A. 5 MEDIDAS.	49
FIGURA 22- ESTEREOGRAMA DE CONTORNO DOS POLOS DO ACAMAMENTO DO SETOR B. 23 MEDIDAS.	49
FIGURA 23- ESTEREOGRAMA COM A PROJEÇÃO CICLOGRÁFICA DOS PLANOS DAS FALHAS E AS ESTRIAS. 8 MEDIDAS.....	50
FIGURA 24 – F1 BEM MARCADA E DELIMITANDO A SEPARAÇÃO DO SETOR B DO C.....	51
FIGURA 25 – A: PLANO DE FALHA DA F7 REPRESENTADA. B: BRECHA DE FALHA ENCONTRADA NO LIMITE ENTRE OS SETORES A E B.	51
FIGURA 26 – A: F2 APRESENTANDO UM PAR CONJUGADO SENDO A 2 SINTÉTICA E A 2' ANTITÉTICA. B: F3 ANTITÉTICA COM REJEITO CENTIMÉTRICO BEM MARCADO.	52
FIGURA 27 – F4 APRESENTANDO UMA DOBRA DE ARRASTO EM PEQUENA ESCALA.....	52
FIGURA 28 – ESTEREOGRAMA DE CINEMÁTICA DO TALUDE DO SETOR A. O ACAMAMENTO ESTÁ REPRESENTADO PELO PONTO BEGE DENTRO DA ZONA VERMELHA, CRÍTICA PARA DESLIZAMENTO PLANAR.....	53
FIGURA 29 – ESTEREOGRAMA DE CINEMÁTICA DO TALUDE DO SETOR B. A ZONA CRÍTICA É REPRESENTADA EM VERMELHO PARA DIRECT TOPPLING E DENTRO HÁ UMA INTERSECÇÃO DE PLANOS DAS JUNTAS.	54
FIGURA 30- LOCALIZAÇÃO DAS JANELAS NO SETOR B.	54
FIGURA 31- ESTEREOGRAMA DE CONTORNO DOS POLOS DAS FAMÍLIAS DA JANELA 1. 12 MEDIDAS.....	55
FIGURA 32- ESTEREOGRAMA DE CONTORNO DOS POLOS DAS FAMÍLIAS DA JANELA 2 A 4. 60 MEDIDAS.	55

FIGURA 33- DIFERENÇA DO TAMANHO DE BLOCOS DA BASE E DO TOPO.	59
FIGURA 34- ZONAS DE QUEDA DE BLOCOS.....	59
FIGURA 35- COMPARTIMENTAÇÃO GEOMECÂNICA DA FRENTE DE LAVRA.	63

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. LOCALIZAÇÃO	13
2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	14
2.1. GEOLOGIA REGIONAL	14
2.2. CONTEXTO ESTRUTURAL	18
2.2.1. Alto Estrutural de Jibóia	19
2.3. GEOLOGIA LOCAL	20
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
3.1. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA	22
3.1.1. RQD.....	22
3.1.2. Histórico de Aplicações da Classificação Geomecânica Rock Mass Rating (RMR).....	24
3.1.3. Sistema de Classificação Rock Mass Rating (RMR)	26
3.1.4. Cinemática de Taludes	29
3.1.5. Sistema de Classificação Slope Mass Rating (SMR)	31
3.2. PRINCÍPIOS DA FOTOGRAMETRIA.....	33
3.2.1 Utilização de Drones	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1. LEVANTAMENTO DE CAMPO	39
4.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS	40
4.2.1. Processamento das fotos de drone.....	40
4.2.2. Extração automática de planos via plugin Facets.....	40
4.2.3. Processamento dos dados estruturais e geomecânicos.....	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1. RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DO DRONE	42
5.2. RESULTADOS OBTIDOS PELA EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE PLANOS VIA PLUGIN FACETS	44
5.3. RESULTADOS OBTIDOS PELOS DADOS DE CAMPO	46
5.3.1. Juntas	46

5.3.2. Acamamento.....	47
5.3.3. Falhas.....	50
5.3.4. Cinemática dos taludes.....	52
5.3.5. Compartimento Geomecânico.....	54
6. CONCLUSÃO	63
7. BIBLIOGRAFIA	66

1. Introdução

As características geomecânicas de unidades geológicas carbonáticas reservatório e das formações sobrepostas (cap rock) são de extrema importância para evitar diversos problemas relacionados à perfuração e extração de petróleo em poços terrestres e marítimos. Em função da profundidade e o alto custo da coleta de amostras laterais e testemunhos dos poços, geralmente, opta-se apenas pela amostragem das rochas reservatórios, o que não é o suficiente para uma generalização do modelo geomecânico do reservatório em sua totalidade, ou pode-se recorrer a um estudo de reservatórios análogos a fim de se obter uma melhor compreensão do reservatório marinho.

O reservatório análogo é um sistema que compartilha algumas características com uma unidade de estudo de acesso restrito, cuja semelhança entre os dois sistemas é usada como base para a previsão de aspectos e comportamentos no sistema menos compreendido, julgada pelos parâmetros críticos e as características predefinidas. Com isso, as análises geomecânicas realizadas na Formação Irati pode ser utilizada como um estudo de reservatório análogo aos do pós e pré-sal, composta por unidade geológica de sucessão marcada pela intercalação de carbonatos e folhelhos, coquínas e calcários microbianos, localizada nas regiões de Rio Claro.

Com relação aos sistemas de classificação geomecânicos, Bieniawski (1973) foi o responsável pela criação do sistema RMR (Rock Mass Ratio) para túneis e, posteriormente, modificado por Bieniawski (1989) para taludes em mineração e barragens. O RMR é a soma ponderada de 5 critérios, sendo eles a resistência da matriz da rocha, rock quality designation (RQD), espaçamento das descontinuidades, condições das descontinuidades e percolação da água subterrânea (BIENIAWSKI, 1993). Romana (1985) avaliou o sistema RMR e propôs um sistema de classificação denominado Slope Mass Rating (SMR) que é obtido a partir do RMR subtraindo fatores de ajuste da relação junta-inclinação e adicionando um fator dependente do método de escavação (SINGH & GOEL, 2011). Para Romana (1993), a aplicação do sistema RMR em encostas não era possível, então o sistema SMR aparece para fornecer

fatores de ajuste, orientações de campo, classificação de rupturas e recomendações sobre métodos de apoio que permitem um uso sistemático da classificação geomecânica.

Para a realização das classificações geomecânicas, é necessário coletas de dados a partir de levantamento de campo. Tal coleta de dados em maciços rochosos apresenta desafios específicos, seja pelas limitações visuais das janelas de descrição, riscos iminentes no talude, restrições de acesso ou devido à vasta quantidade de medidas de atitudes necessárias para o tratamento dos dados. Nesse sentido, o desenvolvimento de uma metodologia para a automatização do levantamento dos dados estruturais das descontinuidades apresenta grande relevância técnica e prática.

Além disso, avanços nos equipamentos de tomada de dados (laser-scanner e drones para fotogrametria) e da capacidade gráfica nos computadores apresentam-se como uma ferramenta extremamente útil cujo uso deve ser considerado para mudanças de rotinas de caracterização de maciços rochosos. Riquelme et al. (2018) apresentam discussões e dados sobre como as geotecnologias estão modificando o modo como os taludes em maciços rochosos vêm sendo investigados. O uso cada vez mais recorrente de drones vem sendo popularizada principalmente pelo custo relativamente baixo de aquisição das imagens, o que torna a aplicação da aerofotogrametria por drones uma opção muito vantajosa com a mescla de dados obtidos em campo (WANG ET AL., 2019).

O objetivo principal desta pesquisa é realizar a classificação geomecânica através de levantamentos fotométricos do drone obtidos em frentes de lavra de calcário da Formação Irati. Já os objetivos secundários são:

- Executar o imageamento de alta resolução através de drone para definições de estruturas dos taludes das frentes de lavras;
- Realizar a extração automática de planos de fraturas das imagens de drone.

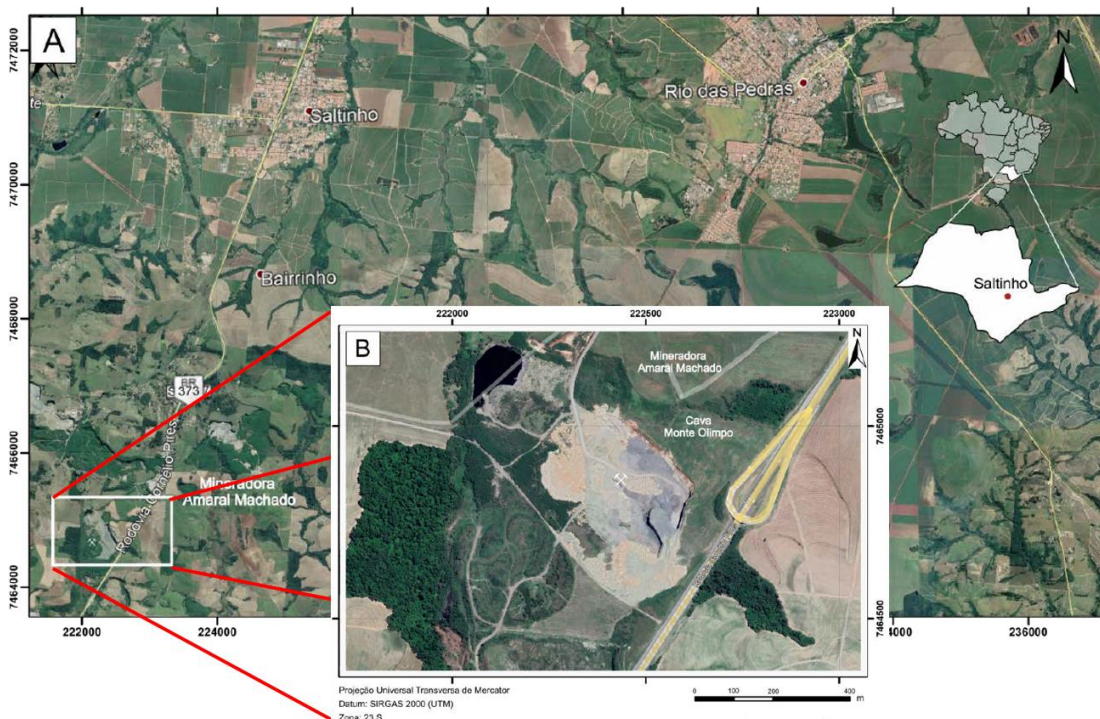
1.1. Localização

A região de estudos ocorreu na Mineração Amaral que se localiza na zona rural sul da cidade de Saltinho (SP) e no extremo sudoeste do município de Rio das Pedras, com acesso pela Rodovia Cornélio Pires (SP-127; BR-373), altura do quilometro 57, no sentido Piracicaba – Tietê, visto na figura 1.

O estudo foi feito na cava Monte Olimpo, inserida no Lineamento Tietê de direção NW-SE (RICCOMINI, 1997), no contexto tectônico do Alto Estrutural de Jibóia (SOARES, 1974), formado por falhas normais paralelas de orientação -N45°W (SOUSA, 2002), em arranjo de gráben, conhecido como estrutura do Serrote (CPRM, 2006).

Na área ocorre o Membro Assistência da Formação Irati, composto por calcários dolomíticos e folhelhos, em contato com siltitos da Formação Corumbataí, ambas encaixadas na Formação Tatuí por serem abatidas pelas falhas normais, além de um dique de diabásio correlato a Formação Serra Geral (FRIES, 2008).

Figura 1- Mapa de localização da área de estudos.



Fonte: Modificado de Lacerda (2022)

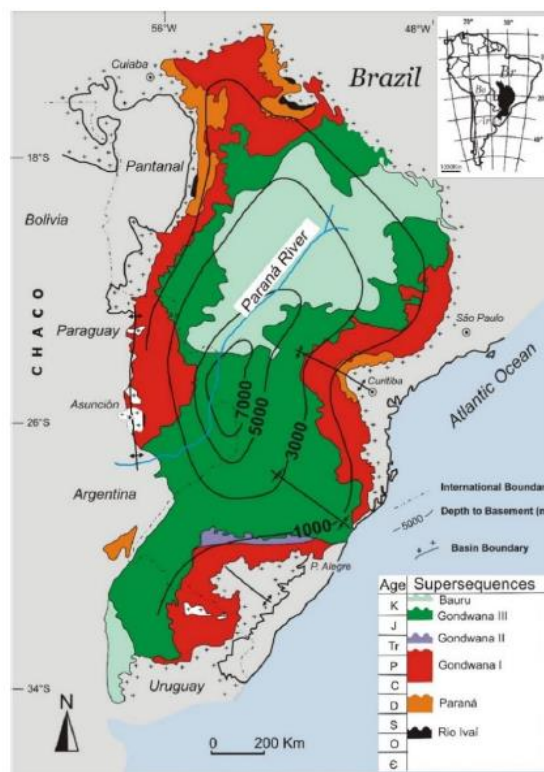
2. Características Gerais da Área de Estudo

2.1. Geologia Regional

A área de estudo se localiza no contexto da Bacia do Paraná, do tipo sinéclise, ovalada com direção NW-SE e se estende por uma vasta região situada na porção centro-oriental da América do Sul. Esta bacia se formou no interior do cráton Gondwana e teve origem pela propagação de esforços de episódios orogênicos na margem meridional ativa (ZALAN ET AL, 1990). O registro geológico da Bacia do Paraná é composto por rochas sedimentares e vulcânicas com idades entre Neo-ordoviciano a Neocretáceo, separadas em grupos e coberturas sedimentares do Neoceno (MILANI ET AL, 1997). As coberturas sedimentares são compostas pela Formação Rio Claro e Formação Pirassununga, que são formações correlatas (MELO, 1995).

A Supersequência Gondwana I foi originada no Eocarbonífero (final do Moscoviano), quando o Gondwana, em altas latitudes no hemisfério sul com geleiras associadas e um nível do mar muito baixo (período de glaciação), migrou para norte e colidiu com a Patagônia no lado noroeste. Essa colisão abriu espaço de acomodação no interior do continente e somado as mudanças climáticas, como aumento da temperatura e aumento do nível do mar Panthalassa, iniciou-se os processos deposicionais (DEAMON & FRANÇA, 1993). A base da deposição é caracterizada por depósitos com influência glacial, cujos mecanismos predominantes são de fluxos de massa e ressedimentação. Essa deposição alcançou condições de máxima inundação no Artinskiano e se encerrou com sistemas deposicionais continentais na entrada do Triássico (MILANI et al, 2007). Assim, a Supersequência Gondwana I representa um ciclo transgressivo-regressivo completo, advindo da invasão e posterior saída do Panthalassa sobre o interior do Gondwana (MILANI, 1997), visto na figura 2.

Figura 2- Localização, subdivisão aloestratigráfica e forma da Bacia do Paraná separando as seis Supersequências e contorno estrutural do embasamento cristalino.



Fonte: Realizado por BERGAMASCHI *et al.* (2016), adaptado de MILANI (1997)

Os grupos que fazem parte da Supersequência Gondwana I, no Estado de São Paulo, são o Grupo Tubarão (composto pela Formação Itararé), Grupo Guatá (composto pela Formação Tatuí), Grupo Passa-Dois (composto pelas Formações Irati e Corumbataí) e por parte do Grupo São Bento (apenas a Formação Pirambóia) (MILANI *et al.*, 2007), visto na figura 3.

A formação basal do Grupo Passa-Dois na área de estudos, a Formação Irati, possui idade permiana (Neo-Artinskiano), de acordo com datação geocronológica de zircões em cinzas vulcânicas na formação realizada por Santos *et al.* (2006). Essa formação estende-se por aproximadamente 1.000.000 km² e apresenta espessura média constante de 40 metros no Estado de São Paulo e cerca de 50 metros no centro da bacia (AMARAL, 1971).

Figura 3- Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo.

COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ EM SÃO PAULO							
ERA	PERÍODOS	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	Espes. Média (Metros)	DESCRIÇÃO SUCINTA	AMBIENTE DE DEPOSIÇÃO
CENO-ZOICA	QUATERNÁRIO		RIO CLARO		30	ARENITOS POUCO CONSOLIDADOS COM LENTES DE ARGILAS E NÍVEIS CONGLOMERÁTICOS NA BASE (Arenitos = reservatório de água subterrânea em poços rasos da região de Rio Claro)	CONTINENTAL: PLANÍCIE ALUVIAL E LACUSTRES. COLUVIÕES
	TERCIÁRIO		MARÍLIA ADAMANTINA		50	ARENITOS COM MATRIZ ARGILOSA OU CIMENTO CALCÍFERO, SILTITOS	CONTINENTAL: PLANÍCIE ALUVIAL E LACUSTRE
MESOZOICA	CRETÁCEO	BAURU	SERRA GERAL		100	DERRAMES DE BASALTOS COM LENTES DE ARENITO NA BASE. DIQUES E SOLEIRAS DE DIABÁSIO (Basalto e diabásio = matéria-prima para brita - pavimentação e construção civil - na região de Rio Claro)	MAGMATISMO FISSURAL
			BOTUCATU		100	ARENITOS BEM SELECIONADOS COM GRÃOS BEM ARREDONDADOS E BEM ESFÉRICOS, POUCA ARGILA	CONTINENTAL DESÉRTICO
	JURÁSSICO		PIRAMBÓIA		150	ARENITOS COM GRÃOS ARREDONDADOS E ESFÉRICOS. DIVERSOS NÍVEIS DE LAMITOS	CONTINENTAL: FLUVIAL E DESÉRTICO
	TRIÁSSICO		CORUMBATAÍ		100	SILTITOS CONTENDO LENTES DE ARENITOS FINOS ARGILITOS, SILTITOS, ARENITOS FINOS, NÍVEIS DE CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS E COQUINAS (Argilitos = matéria-prima para a indústria cerâmica da região de Rio Claro)	CONTINENTAL: LACUSTRE MISTO: PLANÍCIE DE MARE
			IRATI		40	SILTITOS, FOLHELHOS PIROBETUMINOSOS, CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS (pedreiras de calcário na região de Assistência e Ipeúna)	MISTO: LAGUNA/PLATAFORMA
PALEOZOICA	PERMIANO	PASSA DOIS	PALERMO		50 (Tatuí)	SILTITOS E SILTITOS ARENOSOS	MISTO: PLANÍCIE COSTEIRA/PLATAFORMA
			RIO BONITO		20 (Pal+RB)	ARENITOS E SILTITOS COM INTERCALAÇÕES DE DELGADAS CAMADAS DE CARVÃO	CONTINENTAL: FLUVIAL / COSTEIRO MISTO: DELTAICO/MARINHO RASO
		TUBARÃO	ITARARÉ		900	ARENITOS, SILTITOS, VARVITOS E DIAMICTITOS (ALGUNS VERDADEIROS SILTITOS) (Arenitos = reservatórios de água subterrânea em poços profundos da região)	CONTINENTAL: GLACIAL FLUVIAL LACUSTRE MISTO MARINHO (GLÁCIO-MARINHO)
			AQUIDAUANA				
			EMBASAMENTO			GRANITOS, MIGMATITOS, GNAISSES, XISTOS, QUARTZITOS	
	CARBONÍFERO						
	Pré-Cambriano						

Perinotto (2008), com base em Soares & Landim (1975)

Fonte: Perinotto & Zaine (2008)

Barbosa & Almeida (1949) subdividiu a Formação Irati em Membro Taquaral (base) e Membro Assistência (topo). O Membro Taquaral é composto por argilitos, folhelhos cinza- esverdeado escuro e siltitos cinza, com laminação plano-paralela. A espessura da formação varia na ordem de 10 a 20 metros no estado de São Paulo (SCHNEIDER et al., 1974).

O Membro Assistência é composto por uma sequência de folhelhos e siltitos cinza escuros, folhelhos pirobetuminosos intercalados com calcários dolomíticos e pelitos subordinados, com laminação plano-paralela. Nas camadas carbonáticas há nódulos de sílex, marcas onduladas, laminação cruzada e convoluta, oolitos, brechas intraformacionais e laminação algálica (SCHNEIDER et al., 1974), e possui espessura de 40 metros (BARBOSA e ALMEIDA, 1949).

O ambiente deposicional do Irati é representado por marinho calmo na base (Membro Taquaral) e marinho plataformar de águas rasas no topo (Membro Assistência) segundo Schneider et al. (1974). As rochas dessa formação foram depositadas sob a plataforma de um mar progressivamente mais salino em direção à porção superior da unidade e, para Perinotto & Zaine (2008), ocorreu em ambiente misto lagunar e/ou marinho raso.

A Formação Irati possui hidrocarbonetos associados aos folhelhos nas proximidades com rochas básicas da Formação Serra Geral, em que a presença dos chamados altos estruturais tem influência na formação de trapas estruturais (AQUAROLI, 2013).

A Formação Corumbataí apresenta espessura na ordem de 130 metros no estado de São Paulo e idade permiana. Além disso, é constituída por argilitos, siltitos e folhelhos de coloração arroxeada e marrom-avermelhados, com intercalações de arenitos e leitos carbonáticos, e a unidade é marcada por estratificação plano-paralela (SCHNEIDER et al., 1974). O ambiente de deposição proposto para esta unidade é marinho costeiro e pantanoso (principalmente dominado por marés) e localmente lacustre (PERINOTTO & ZAINE, 2008).

Na Formação Corumbataí é constatado teores de matéria orgânica que atingem até 23%, um dos maiores do mundo (MILANI, 2007). A maturação do óleo, gerado pela energia térmica fornecida pelas intrusões do Eocretáceo correlatas à Formação Serra Geral, foi classificado como “imaturo e pesado” (ARAÚJO ET AL, 2000; THOMAZ FILHO et al., 2008). Milani (2007) caracterizou como um sistema petrolífero atípico, uma vez que houve condições de maturação, migração e acumulação de hidrocarbonetos na região.

O Grupo São Bento é integrado, da base para o topo, pelas formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral, que são representantes da Era Mesozóica.

A Formação Serra Geral, do Cretáceo, é composta por derrames basálticos, diques e soleiras de diabásio, de coloração cinza escuro a preto com intercalações de camadas arenosas na porção basal. Essa formação é considerada um magmatismo fissural que ocorreu nas condições desérticas da

Formação Botucatu. A unidade estratigráfica de Serra Geral foi de suma importância por fornecer calor suficiente para a maturação da matéria orgânica presente na Formação Irati através das intrusões na forma de diques ou soleiras (SOARES & LANDIM, 1975).

2.2. Contexto Estrutural

O contexto tectônico da área de estudo é o da borda leste da Bacia do Paraná, cuja evolução apresenta uma série de elementos estruturais relacionados aos fenômenos tectono-magmáticos do Ciclo Brasileiro. Isto ocorreu durante o período Neoproterozoico-Eopaleozoico, e foi relacionado à estabilização da Plataforma Sul Americana inserida no Supercontinente Gondwana (MILANI, 1997).

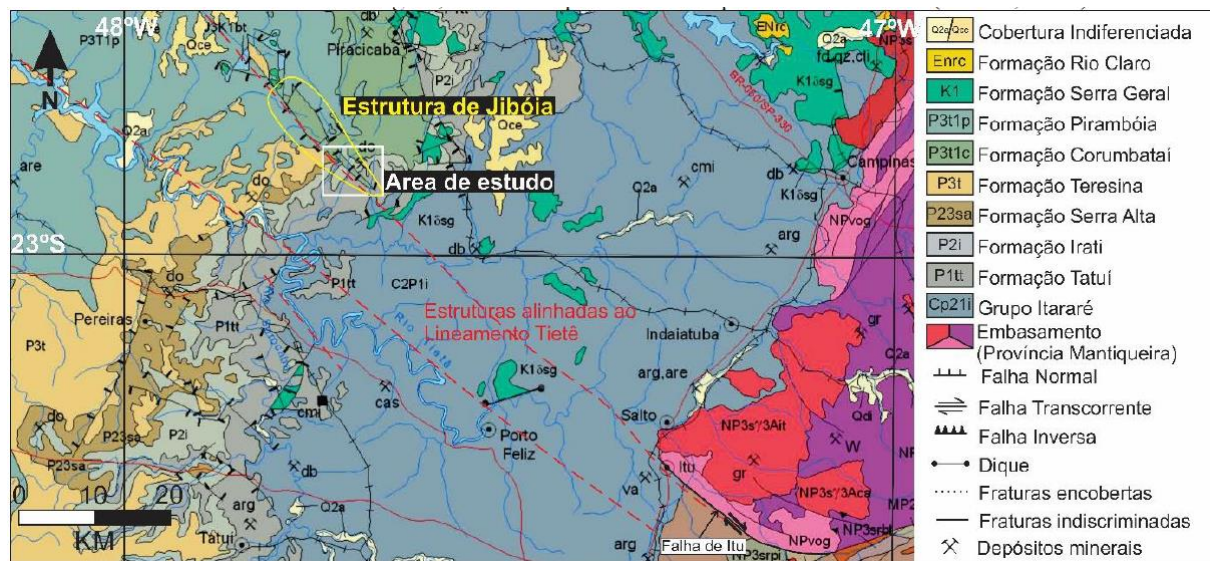
De acordo com ZALAN et al. (1990), o substrato da bacia é marcado por elementos tectônicos lineares de direções NW-SE, NE-SW e E-W, representados por falhas ou zonas de falhas.

As falhas de orientação NW foram intensamente reativadas durante a fragmentação do Gondwana, gerando novos falhamentos concordantes e conduzindo a intrusão, o que culminou no intenso derrame basáltico do Serra Geral, no período juro-cretáceo. Ambos os lineamentos, NW e NE, são estruturas relacionadas às dinâmicas transcorrentes atribuídas aos estágios finais de magmatismo do Serra Geral, mas apenas a direção NW-SE possui diques (ZALÁN et al., 1990).

Os elementos estruturais de orientação EW desenvolvidos no Triássico, apresentam concordância com as zonas de falhas oceânicas, e possivelmente são relacionados à abertura do Atlântico Sul (ZALÁN et al., 1987).

A ocorrência desses eventos propiciou o desenvolvimento de algumas estruturas tectônicas na borda leste da Bacia do Paraná como altos estruturais, horstes e grábens (ZALÁN et al., 1987). Na área de estudo ocorrem os altos estruturais de Pitanga, Anhembi, Artemis, Pau d' Alho e Jibóia, detalhadamente descritos por Sousa (2002). A geologia da região e a estrutura do Jibóia estão representados na figura 4.

Figura 4- Mapa geológico da região da borda da Bacia do Paraná e a visualização do alinhamento da estrutura local NW/SE.



Fonte: Riffel (2020) adaptado de CPRM (2006)

2.2.1. Alto Estrutural de Jibóia

O Alto Estrutural de Jibóia é delimitado por falhas paralelas de direção N45W, concordante com a estrutura Pau d'Alho, localizada a noroeste e a SW pela falha de Monte Branco. Tal estrutura é marcada por dois grupos de falhas paralelas de orientação N45°W com falhas subverticais normais, responsáveis por alçar as rochas da Formação Corumbataí no nível das rochas da Formação Pirambóia, configurando horstes (SOUSA, 2002). Segundo Fries (2008), as camadas estão basculadas em 15° para SW e 5° para o centro da estrutura.

A região SE do Alto Estrutural de Jibóia, onde se localiza a área de estudo, é marcado por um sistema de falhas arranjadas no formato de gráben, denominado de Serrote por Soares (1974), responsável colocar a Formação Corumbataí no centro, em mesma cota da Formação Irati (mais antiga). Este gráben apresenta extensão aproximada de sete quilômetros e menos de um quilometro de largura, limitado por duas falhas principais de direção N40W. (BATISTA, 2002).

Batista (2002) afirma que as falhas principais são de alto ângulo e a falha limitante a SW apresenta um basculamento das camadas do bloco alto,

cujo acamamento chega a ter um mergulho de até 75°, e no limite NE foram reconhecidas dobras simétricas, com amplitude de até 4 metros, na Formação Irati.

2.3. Geologia Local

Na Cava Monte Olimpo, a base estratigráfica é composta por uma camada de calcário dolomítico de coloração cinza claro a esbranquiçado, que integra o Membro Assistência da Formação Irati.

Os calcários apresentam espessuras de camada que variam de centimétricas a métricas em estruturas plano-paralelas. Nestes ocorrem as exsudações de betume que preenchem as fraturas, juntas, falhas, cavidades e o acamamento sedimentar da rocha. Tal ocorrência pode ser reconhecida tanto visualmente, quanto sensorialmente pelo odor característico do óleo e impregnação das mãos ao manipular as amostras com betume.

Sobreposto ao calcário, há a típica intercalação rítmica em camadas plano-paralelas de folhelhos escuros pirobetuminosos, siltitos cinza e calcário esbranquiçados, com nódulos de sílex e pirita. Nesta intercalação também é observada a ocorrência de exsudações de betume/hidrocarbonetos preenchendo as juntas e cavidades dos carbonatos ou impregnando as fraturas nos pelitos. A espessura das camadas de calcário no ritmo começam centimétricas e chegam a métricas em direção ao topo.

O limite superior do Membro Assistência é delimitado pelo contato com os argilitos e siltitos marrom amarelados e alterados da Formação Corumbataí, o qual já é considerado um saprólito. Esse pacote de rochas integra aproximadamente 8 metros de espessura na frente de lavra e apresenta alteração para camada avermelhada de solo com cerca de 1,5 metros de espessura.

Na região ocorrem diques de diabásio correlatas à Formação Serra Geral que pode ser observado ao cortar os estratos sedimentares dos dolomitos do Membro Assistência. A coluna completa pode ser vista nas figuras 5 e 6.

Figura 5- Coluna estatigráfica local da área de estudos.

Era	Período	Grupo	Formação	Espessura (m)	Descrição
Mesozoica	Cretáceo	São Bento	Serra Geral	—	Intrusões de diques e soleiras de diabásio
Paleozoica	Permiano	Passa Dois	Corumbataí	8	Argilitos e siltitos marron avermelhados
			Irati	15	Folhelhos pirobetuminosos, calcários dolomíticos e siltitos
				~3,5	Calcários dolomíticos

Fonte: Lacerda (2022)

Figura 6- Fotografia da coluna estatigráfica local.

Fonte: Autor

3. Fundamentação Teórica

3.1. Classificação Geomecânica

3.1.1. RQD

O índice RQD foi desenvolvido originalmente por Deere (1963) para ser utilizado como parâmetro da classificação geomecânica de maciços rochosos. Este índice é a medição indireta do número de descontinuidades do maciço rochoso a partir de testemunhos de sondagem rotativa com diâmetro NX (54 mm) ou superior executada com barrilete duplo. Baseia-se na percentagem de recuperação, que considera somente os testemunhos rochosos com comprimentos superiores a 10 cm e divide o seu somatório (p) pelo comprimento total perfurado na manobra (n), segundo a equação:

$$RQD = \sum \frac{p}{n} \times 100$$

Na determinação do RQD considera apenas testemunhos de rocha sã e coerente, e exclui aqueles que apresentem elevado grau de alteração. Deere (1969) propôs a relação entre o valor do RQD e a qualidade da rocha, visualizado no quadro 1.

Quadro 1- Classificação RQD

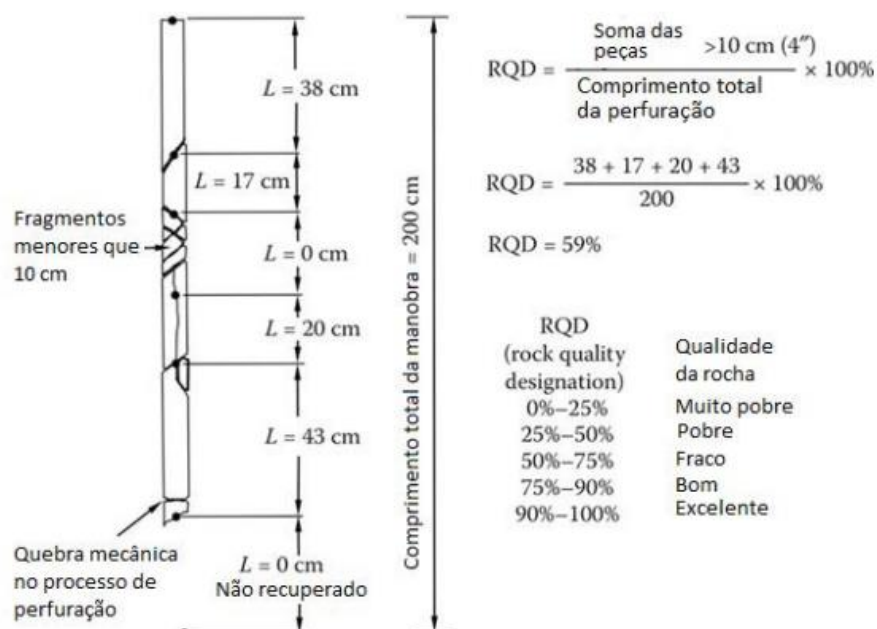
Qualidade da Rocha	RQD (%)
Muito Ruim	<25
Ruim	25 - 50
Regular	50 - 75
Bom	75 - 90
Muito Bom	90 - 100

Para calcular corretamente o RQD, deve-se seguir as seguintes instruções conforme Deere et al (1969) propôs e a Internacional Society of Rock Mechanics (ISMR, 1981) recomenda:

- A perfuração da sondagem deve ser executada com sonda rotativa, coroa diamantada, com uso de barrilhete duplo giratório de comprimento máximo de 200 cm e diâmetro maior ou igual a 54,7 mm (NX);
- As medidas devem ser realizadas tendo como referência o eixo do testemunho, com especial atenção às fraturas de direção subparalelas ao eixo do testemunho;
- Deve-se considerar todas as fraturas presentes, excluindo-se somente aquelas provocadas pelo sondador (quebra no final da manobra e ao se acondicionar o testemunho à caixa) ou quebras mecânicas.

As rochas mais brandas como filitos, siltitos e arenitos não silicificados, tendem a se fraturar durante os eventos geológicos, apresentando baixo percentual de RQD em relação a outros litotipos mais resistentes, como os granitos, basaltos e gnaisses. A figura 7 apresenta um exemplo de como realizar o RQD direto.

Figura 7- Exemplo de como realizar o RQD direto.



Fonte: Singh & Goel (2011)

Contudo, em lugares onde testemunhos são difíceis de se obter e/ou há falta destes, existem os métodos indiretos de obtenção do RQD. Dentre vários métodos, vale ressaltar o índice volumétrico de fraturamento proposto por Palmstrom (1982) (SINGH & GOEL, 2011).

Palmstrom (1982) menciona a obtenção do RQD por meio de correlações empíricas a partir de mapeamento de detalhe das fraturas em afloramentos ou em superfícies escavadas, conforme a equação abaixo:

$$RQD = 115 - 3.3 J_v$$

J_v é um parâmetro que representa um índice volumétrico de fraturamento do maciço rochoso, e consiste no número total de descontinuidades por unidade de comprimento que interceptam uma unidade de volume de $1m^3$, representado pela fórmula:

$$J_v = \sum_{i=1}^J \left(\frac{1}{S_i} \right)$$

O termo S_i representa o espaçamento médio das juntas em um metro para as famílias de fraturas, e o J é o número total de famílias.

3.1.2. Histórico de Aplicações da Classificação Geomecânica Rock Mass Rating (RMR)

Bieniawski (1973 e 1976) desenvolveu o sistema de classificação de maciços rochosos denominado Rock Mass Rating (RMR), também conhecido como Classificação Geomecânica RMR, embasado em casos históricos de obras em túneis e minerações na África do Sul. A primeira proposta apareceu em seu artigo “Engineering Classifications of Jointed Rock Masses” em 1973 e o autor aprimorou o sistema até o ano de 1979.

Bieniawski (1976) e, posteriormente, Serafim e Pereira (1983), correlacionaram o índice RMR com o módulo de deformação *in situ*, adequando a aplicação desse índice a fundações.

Segundo Aksoy (2008), quando foi desenvolvida em 1973, a classificação RMR tinha como objetivo avaliar o período de estabilidade de um vão livre escavado (distância entre a frente de escavação e o último segmento escorado) até que ele colapsasse, em folhelhos e rochas pouco argilosas. Em 1974, Bieniawski revisou o sistema e adicionou as características descritivas das descontinuidades, reduzindo o número de parâmetros analisados de 8 para 6.

Em 1976 a classificação RMR foi novamente atualizada, cuja principal alteração foi no guia de suporte para tuneis de vão de 10 m em forma de ferradura, através da diminuição nos tamanhos dos tirantes e na espessura do concreto projetado. Ademais, ocorreram outras mudanças como o intervalo de pesos finais que foi de 90 — 100 para 81 — 100 da primeira classe de maciços rochosos, além da rugosidade ter sido adicionada ao se avaliar as descontinuidades, assim como foi inserido o teste para o índice de resistência a carga pontual.

Em 1979, vieram as alterações pertinentes à água subterrânea e a condição das descontinuidades. Adiciona-se ao parâmetro as condições gerais da água nos casos em que esta não pode ser medida, sendo a quantidade de padrões aumentada para cinco. Além disso, o fator de correção através da orientação das descontinuidades também foi adicionado para casos de túneis, taludes e fundações.

Em 1981, foi proposto pela Internacional Society for Rock Mechanics (ISRM) um método empírico *in situ* para a determinação aproximada da resistência a compressão uniaxial.

Posteriormente, Romana (1985) desenvolveu o Slope Mass Rating (SMR), o qual classifica os taludes com base no Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1976 e 1979).

Por fim, as últimas modificações feitas por Bieniawski em 1989 no sistema RMR foram:

- Gráficos de “Pesos x Parâmetros” com valores mais precisos;

- Parâmetros de continuidade, espaçamento, rugosidade, preenchimento e grau de alteração das descontinuidades, foram especificados e atribuídos pesos de acordo com ISRM (2007);
- Parâmetros de correção para a determinação de massas rochosas enfraquecidas pelo impacto das atividades mineiras foram recomendados;
- Rearranjo no gráfico de vão livre não escorado.

3.1.3. Sistema de Classificação Rock Mass Rating (RMR)

O RMR é a soma ponderada de 5 critérios, sendo eles a resistência da matriz da rocha, rock quality designation (RQD), espaçamento das descontinuidades, condições das descontinuidades e percolação da água subterrânea (BIENIAWSKI, 1993).

Para aplicar o sistema de classificação geomecânica, a análise deve ser dividida em uma série de unidades estruturais geológicas, de tal forma que cada tipo de massa rochosa é representado por uma unidade estrutural geológica separada. Os cinco parâmetros são determinados para as famílias de fratura, visualizados nos quadros 2 a 4 (SINGH & GOEL, 2011).

O RMRb (básico) é determinado como uma soma algébrica de classificações para todos os parâmetros dos quadros 2 a 4. Já o RMR (final) é obtido após ajustes para orientação de descontinuidades. Com base nos valores de RMR, o maciço rochoso possui cinco classificações: muito bom (RMR 100-81), bom (80-61), regular (60-41), ruim (40-21), e muito ruim (<20).

A classificação pode ser usada para estimar muitos parâmetros úteis, como o tempo de sustentação, o período de ação da ponte e a pressão de suporte para uma abertura subterrânea. Também pode ser usada para selecionar um método de escavação e o sistema de suporte permanente. A coesão, o ângulo de atrito interno, o módulo de deformação da massa rochosa e a pressão de suporte permitida para as fundações, também podem ser estimados para analisar a estabilidade de taludes de rocha (SINGH & GOEL, 2011).

Quadro 2- Parâmetros de classificação RMR.

A - Parâmetros de Classificação								
1	Resistência do material intacto	Índice de resistência a carga pontual (MPa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Somente para compressão simples	
		Resistência a compressão uniaxial (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5 < 1
	Peso		15	12	7	4	2	1 0
2	Qualidade do testemunho - RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25	
	Peso		20	17	13	8	3	
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2 m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm	
	Peso		20	15	10	8	5	
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas, descontinuas, fechadas, paredes duras	Superfícies pouco rugosas, abertura <1mm, paredes duras	Superfície pouco rugosa, abertura <1mm, paredes moles	Superfícies estriadas ou preenchimento < 5mm ou abertura de 1-5mm, contínuas	Preenchimento mole >5mm ou abertura > 5mm, contínuas	
	Peso		30	25	20	10	0	
5	Água Subterrânea	Infiltração em 10 m de túnel (L/min)	0	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125	
		Pressão da água na fratura/tensão principal	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5	
		Condições gerais	seco	Umedecido	Úmido	Gotejamento	Fluxo abundante	
	Peso		15	10	7	4	0	

B - Ajuste para orientação das descontinuidades						
direção e mergulho das descontinuidades		Muito Favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito Desfavorável
Peso	Túneis	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60
C - Classe de Maciços Rochosos determinada pela somatória dos pesos						
Somatória dos Pesos		100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Classe nº		I	II	III	IV	V
Descrição		Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito Pobre
D- Significado das classes de maciços						
Classe nº		I	II	III	IV	V
Stand-up Time Médio		20 anos para abertura de 15 m	1 ano para abertura de 10 m	1 semana para abertura de 5 m	10 horas para abertura de 2,5 m	30 minutos para abertura de 1 m
Coesão da massa rochosa (kPa)		> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
Ângulo de atrito (graus)		> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15

Quadro 3- Detalhamento dos parâmetros do RMR.

Persistência	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Abertura	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Liso	Polido
Peso	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Quadro 4- Classificação indireta de resistência uniaxial em rocha sã.

Grau	Denominações	Identificação de Campo	Resistência (Mpa)
R0	Rocha extremamente fraca	Marcada pela unha	0,25 - 1,00
R1	Rocha muito fraca	Esmigalha-se sob o impacto do martelo de geólogo, pode ser raspada por canivete.	1,00 - 5,00
R2	Rocha fraca	Pode ser raspada por canivete com dificuldade, marcada por firme pancada com a ponta do martelo	5,00 - 25,00
R3	Rocha com resistência média	Não pode ser raspada por canivete, amostras podem ser fraturadas com um único golpe do martelo	25,00 - 50,00
R4	Rocha resistente	Amostras requerem mais de um golpe de martelo para fraturar-se	50,00 - 100,00
R5	Rocha muito resistente	Amostras requerem muitos golpes de martelo para fraturar-se	100,00 - 250,00
R6	Rocha extremamente resistente	Amostras podem apenas ser lascadas com o martelo de geólogo	> 250,00

Fonte: ISRM (1981)

3.1.4. Cinemática de Taludes

A análise cinemática dos taludes de rocha e solo é baseada no modo de ruptura. Na maioria dos casos, as rupturas dos maciços rochosos são governadas por juntas e ocorrem em superfícies formadas por uma ou várias fraturas. Os modos mais comuns de rupturas encontrados no campo são as rupturas planares (translacional), em cunha 3D, tombamentos e circulares (aleatórias ou rotacional), visualizadas na figura 8 (SINGH & GOEL, 2011).

Os rompimentos planares ocorrem quando o plano da fratura principal mergulha na mesma direção que o plano do talude, e a diferença de mergulho se aproxima de 15° . Assim, uma massa de rocha se desprende e desliza sobre a fratura ao longo do talude. Para se evitar esse tipo de rompimento, o ângulo da fratura crítica deve ser menor que o ângulo de mergulho do talude e a força cisalhante da fratura mobilizada (SINGH & GOEL, 2011).

Os rompimentos em cunha ocorrem ao longo de duas juntas de conjuntos diferentes que se interseccionam obliquamente em toda a face do talude e sua linha de interseção se sobressai visualmente (Hoek & Bray, 1981). A ruptura em cunha é mais frequente do que a ruptura planar, e o fator de segurança da cunha para deslizar aumenta significativamente com a diminuição do ângulo para qualquer mergulho da interseção de seus dois planos conjuntos (SINGH & GOEL, 2011).

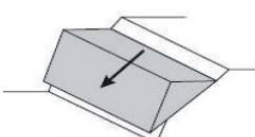
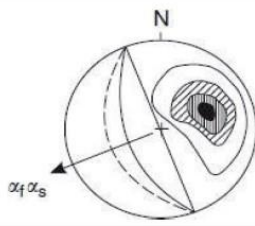
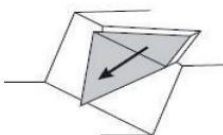
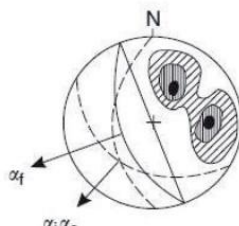
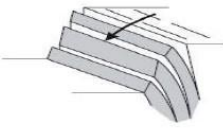
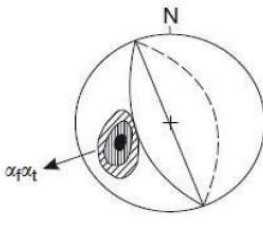
A ruptura circular (rotacional) só pode acontecer em massas rochosas fortemente articuladas com um tamanho de bloco muito pequeno e/ou massa rochosa muito fraca ou fortemente intemperizada. É essencial que todas as juntas sejam orientadas favoravelmente, de forma que não seja possível a ocorrência de rupturas planas, em cunha ou tombamento (SINGH & GOEL, 2011).

A ruptura de tombamento acontece quando a fratura principal mergulha contra o talude, e com a direção quase paralelo à face da encosta. Na prática podem existir dois tipos de instabilidade, uma pequena queda ocorrendo perto da superfície da encosta ou um tombamento profundo que pode produzir grandes deformações. Em ambos os casos, as falhas se desenvolvem lentamente. O tombamento da superfície pode causar quedas de rochas, mas o

tombamento profundo raramente falha repentinamente. A diferença entre os valores de direção do mergulho do talude e da junta é mais de 90° . O tombamento da cunha (ou direct toppling) ocorre ao longo de uma cunha de rocha, onde um terceiro conjunto de juntas cruza uma cunha com mergulhos em direção ao lado do talude, assim, finas cunhas de rocha tombam sucessivamente (ROMANA, 1993).

O tombamento (toppling) envolve um mecanismo diferente de movimentação de grandes blocos rochosos, no qual, os blocos, quando tombam, rotacionam sobre eixos fixos, na direção da face livre do talude. As condições mais favoráveis para tal, ocorrem quando duas famílias de descontinuidades se entrecruzam, com mergulho de alto ângulo contra a face livre do talude e a outra com mergulho de baixo ângulo no mesmo sentido do talude (HOEK; BRAY, 1981).

Figura 8- Representações dos tipos de rupturas de taludes

Tipo de Ruptura	Estereograma	Condições Estruturais
Planar 		- Descontinuidade apresenta ângulo de mergulho menor que o do talude e direção paralela à face do talude. - Mergulho da descontinuidade maior que o ângulo de atrito.
Em Cunha 		- Direção da intersecção dos planos de descontinuidade próxima da direção do mergulho do talude. - O mergulho da intersecção menor que o mergulho do talude e maior que o ângulo de atrito.
Tombamento 		- Rocha resistente contendo descontinuidades com mergulho alto para dentro do talude. - Normal ao plano de tombamento com mergulho menor que a inclinação do talude e menor que o ângulo de atrito
Legenda:  Concentração dos polos  Grande círculo representando a face do talude  Grande círculo representando as descontinuidades. α_f Direção do mergulho da face do talude α_s Direção de deslizamento α_t Direção de tombamento α^i Direção do mergulho da linha de intersecção		

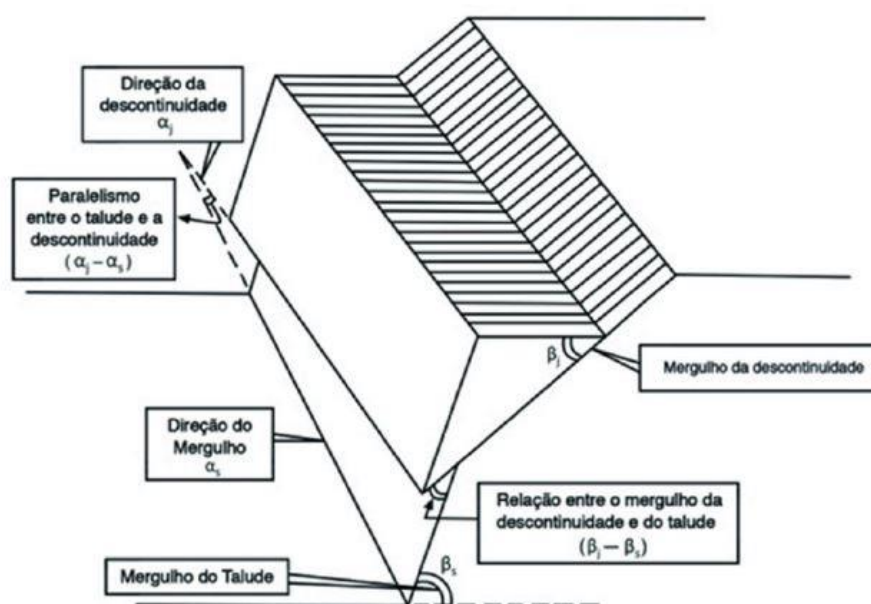
3.1.5. Sistema de Classificação Slope Mass Rating (SMR)

Para avaliar a estabilidade de taludes rochosos, Romana (1985) propôs uma classificação sistemática denominado sistema de “Slope Mass Rating” (SMR), pois o autor defende que a correção das orientações do sistema RMR não é ideal para os taludes. Assim, o SMR é obtido de classificação do maciço rochoso (RMRb) pela subtração dos fatores de ajuste da relação junta-talude e adição de um fator que depende do método de escavação (ROMANA, 1993).

Neste sistema é adicionado ao RMRb um ajuste referente à orientação relativa entre as descontinuidades e o talude (ver figura 9), e outro referente ao método de escavação, segundo a equação (Romana et al., 1993):

$$SMR = RMRb + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

- RMRb é calculado de acordo com Bieniawski (1993);
- F1 depende do paralelismo entre as descontinuidades e a direção do talude, de acordo com a equação $F1 = (1 - \sin A)^2$, sendo A o ângulo entre a direção do talude (α_s) e as descontinuidades (α_j);
- F2 representa o ângulo de mergulho da descontinuidade no modo de ruptura planar e em cunha, segundo a equação $F2 = \tan \beta_j$, onde β_j é o ângulo de mergulho da descontinuidade. Para rupturas do tipo tombamento, o valor de F2 é constante e igual a 1,00;
- F3 reflete a relação entre a face do talude e o mergulho da descontinuidade, segundo a fórmula $F3 = \beta_j - \beta_s$ para rupturas planares e em cunha e $F3 = \beta_j + \beta_s$ para tombamentos; e
- F4 é o fator de ajuste para o método de escavação, determinado empiricamente (ver quadro 5).

Figura 9- Relações angulares do talude e fratura.

Fonte: Pires et al. (2016)

Quadro 5- Determinação dos fatores F1, F2, F3 e F4 da classificação SMR.

Fatores de ajustamento para as descontinuidades (F1,F2,F3,F4)		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Rotura planar $ \alpha_i - \alpha_s $		>30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	<5°
Rotura por tombamento $ \alpha_j - \alpha_s - 180 $						
Relação F1		$F1 = (1 - \text{sen } \alpha_i - \alpha_s)^2$				
Valor de F1		0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
$ \beta_j $		<20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	>45°
Relação F2		$F2 = \text{tg}^2 \beta_i$				
Valor de F2	Rotura planar	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
	Tombamento	1,00				
F3	Rotura planar $\beta_j - \beta_s$	>10°	10°- 0°	0°	0° a -10°	< -10°
	Tombamento $\beta_j + \beta_s$	<110°	110°-120°	>120°	--	--
Valor de F3		0	-6	-25	-50	-60
Fator de ajuste para o método de desmonte, F4		Talude natural	Pré-corte	Smooth blasting	Detonações adequadas ou desmonte mecânico	Detonações inadequadas
		+15	+10	+8	0	-8
α_i = Direção da descontinuidade; α_s = Direção do talude; β_j = inclinação da descontinuidade; β_s = inclinação do talude						

Fonte: Fontinhas (2012) modificado de Romana (1993)

Romana (1985) definiu cinco classes de estabilidade, que podem ser visualizadas no quadro 6, e as medidas corretivas a serem tomadas para suportar um talude, apresentadas no quadro 7.

Quadro 6- Descrições das classes do SMR.

Classes	SMR	Descrição	Estabilidade	Rotura	Contenção
I	81 – 100	Excelente	Totalmente estável	Nenhuma	Nenhuma
II	61 - 80	Bom	Estável	Alguns blocos	Ocasional
III	41 - 60	Razoável	Parcialmente estável	Pequenas planares ou muitas por cunha	Sistemática
IV	21 - 40	Fraco	Instável	Planar ou grandes por cunha	Corretiva
V	0 - 20	Muito fraco	Totalmente instável	Grandes planares ou circulares	Reescavar

Fonte: Fontinhas (2012) modificado de Romana (1993)

Quadro 7- Métodos de tratamento dos taludes por classe do SMR.

Classe	SMR	Técnicas de contenção
Ia	91 -100	Nenhum
Ib	81-90	Nenhum; saneamento de blocos e reperfilamento
Ila	71-80	Nenhum; Valas de pé de talude; proteções flexíveis; pregagens esporádicas
Ilb	61-70	Valas de pé de talude ou proteções flexíveis. Redes metálicas Pregagens esporádicas ou sistemáticas
IIla	51-60	Valas de pé de talude e/ou redes metálicas Pregagens esporádicas ou sistemáticas Betão projetado esporádico
IIlb	41-50	Valas de pé de talude ou redes metálicas Pregagens sistemáticas ou ancoragens Betão projetado sistemático Muro de contenção no pé do talude e/ou betão de enchimento
IVa	31-40	Ancoragens Betão projetado sistemático Muro suporte no pé do talude e/ou vigas de betão (Reescavação) drenagem
IVb	21-30	Betão projetado sistemático Muro suporte no pé do talude e/ou vigas de betão Reescavação ou drenagem interna
Va	11-20	Muro de gravidade ou muro ancorado Reescavação

Fonte: Fontinhas (2012) modificado de Romana (1993)

3.2. Princípios da Fotogrametria

De acordo com a American Society of Photogrammetry – ASP (1980), a fotogrametria é definida como a arte, ciência e tecnologia de se obter uma informação fidedigna de objetos ou meio físico por meio de processos de

gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas ou padrões de radiação eletromagnética.

Objetos gravados em duas imagens ligeiramente diferentes captadas a partir de uma câmera, e de acordo com o fato da perspectiva central, é possível obtenção de informações tridimensionais (3D) de imagens 2D (fotos), denominado visão estereoscópica. Em resumo, o principal recurso da fotogrametria é o cálculo de coordenadas 3D de qualquer objeto ou terreno a partir de qualquer ponto do objeto que esteja repetido em pelo menos duas fotos, denominadas par estereoscópico. A fotogrametria pode ser subdividida de acordo com os métodos de aquisição de fotos, que podem ser terrestres ou aéreos (LINDER, 2009).

Remondino et al (2014) apontam que até 2014, as técnicas de fotogrametria não eram capazes de gerar nuvens de pontos 3D densas e detalhadas como os sensores de alcance e, posteriormente, os sensores se tornaram a tecnologia dominante para geração de nuvens 3D densas.

Os mesmos autores apontam que a estagnação dos estudos sobre procedimentos automatizados de tecnologias fotogramétricas ocorreu, pois, muitos cientistas mudaram seus campos de pesquisa para laser scanning. Porém, melhorias significativas em hardwares e algoritmos (por exemplo, Structure-from-Motion (SfM) ou algoritmos de correspondência de imagens inovadores) estão tornando a fotogrametria uma tecnologia competitiva e um ressurgimento de métodos automatizados de fotogrametria.

A Structure-from-Motion (SfM) é uma técnica rápida, automática e de baixo custo para obtenção de dados 3D em alta resolução, adequada para aplicação em áreas remotas e em projetos de baixo orçamento. Seus princípios são basicamente os mesmos utilizados na fotogrametria estereoscópica. Porém, ao invés do par de fotografias, a técnica SfM utiliza múltiplas fotografias e respectivas sobreposições como dados de entrada que possibilitam a obtenção de características de precisão a partir de modelos 3D (WESTOBY ET AL., 2012).

A total automatização do processo de reconstrução da cena 3D, desde a identificação e extração dos pontos de correspondência até a reconstrução

precisa da geometria da cena, é uma vantagem clara da fotogrametria SfM em relação à fotogrametria convencional (WESTOBY ET AL., 2012).

Westoby et al. (2012) considerou o método de fotogrametria SfM como uma técnica emergente, pouco utilizada dentro das geociências e com poucas avaliações sobre a qualidade dos produtos de terreno derivados dessa técnica. Desde então, a aplicação da fotogrametria SfM mostrou-se mais presente nos estudos acadêmicos e de grande interesse por parte da comunidade de geomorfologia e sensoriamento remoto.

Na fotogrametria convencional, a geometria da cena é construída a partir de uma rede de alvos que possuem posições 3D previamente conhecidas. A aplicação da fotogrametria em ambiente digital é realizada por meio de técnicas que geram nuvens de pontos 3D obtidas pelo cálculo de equações de colinearidade e, portanto, estabelece uma relação matematicamente rigorosa entre imagem e objeto, a partir de um elevado número de pontos conjugados. Esses pontos são identificados durante a fase de correlação automática de um conjunto de imagens sobrepostas que foram adquiridas de modo não estruturado (TOMÁS ET AL. 2020).

A análise das nuvens de pontos 3D fornece informações geométricas da superfície de um talude e possui grande utilidade na geotecnia, uma vez que permite a identificação da orientação, quantidade, espaçamento, persistência, rugosidade e outras propriedades das discontinuidades presentes no maciço rochoso (TOMÁS ET AL. 2020).

Atualmente há diversos de softwares livres e comerciais para o processamento da fotogrametria digital. Um software comercial, amplamente utilizado é o Agisoft Metashape, mas existem outros como exemplificados no quadro 8.

Quadro 8 - Síntese dos softwares utilizados para processamento de dados de VANT.

Software	Indicado	Produtos	Custo (dolares)
Agisoft Metashape (PhotoScam)	Indicado para iniciantes no mercado de mapeamento aéreo. O software é intuitivo e oferece um workflow simples e muito eficiente, com destaque para o algoritmo de processamento	Mosaico de Ortofotos, Modelo Digital da Superfície e Modelo Digital do Terreno	3499
Pix4d Mapper Pro	Usuários que estão iniciando no mercado. O software conta com uma interface amigável e workflow intuitivo. Um grande diferencial são alguns recursos como filmes imersivos na nuvem de pontos e cálculos com bandas multiespectrais (NDVI)	Mosaico de Ortofotos, Modelo Digital de Superfície e Modelo Digital do Terreno	3.504, porem há licenças de 1 mês por 350
Trimble UAS Master	Projetos de topografia, volumetria, corte e aterro, e outros projetos que envolva a manipulação dos dados altimétricos	Mosaico de Ortofotos, o Modelo Digital de Superfície e o Modelo Digital do Terreno	15.000, há porem há licenças de 4 mese por 2250

Segundo a empresa DroneEng, o Agisoft Metashape (PhotoScam) possui o melhor custo benefício para projetos de mapeamento, devido ao algoritmo de processamento (busca dos pontos homólogos) que consegue gerar produtos com ótima qualidade, mesmo com um voo deteriorado.

3.2.1 Utilização de Drones

Segundo Matthews (2008), para se obter uma boa resolução da imagem, a câmera fotográfica do drone utilizada deve ser do tipo portátil e possuir resolução mínima entre 8 e 10 megapixels, junto com um sensor de dimensões semelhantes às de um filme de 35 mm. O controle manual de foco, abertura, velocidade de obturador e ISO são desejáveis nas câmeras aeronaves não tripuladas. As opções de autoestabilização de imagem e otimização de parâmetros de imagem deverão ser mantidas desligadas.

Quanto ao formato da imagem digital, o recomendado é que seja do tipo RAW, sem processamento. Desta forma o software de imagens pode corrigir com mais eficácia valores de exposição e ruídos. O quadro 9 lista os principais modelos de drones disponíveis no mercado para mapeamento e suas características.

Quadro 9 - Síntese dos principais drones utilizados no mercado.

Modelo	Marca	Área Coberta (ha/300m de alt)	Câmera (MP)	Tempo de voo (mins)	Custo (reais)
Phanton 3 Professional	DJI	130	12	25	6.470
Phanton 4 Pro	DJI	150	20	30	9.700
3DR Solo	3D Robotics	110	A parte	20	3.500
Ar Drone 2.0	Parrot	66	5	12	2.370
Mavic Air	DJI	115	12	21	3.500
GQ45	G drones	250	20	45	13.000

Os modelos que melhor se qualificam para o mapeamento disponível no mercado são o Phantom 3 Professional, Phantom 4 Pro e Mavic Air.

Para o efeito estereoscópico das fotografias ocorrer, a câmera deve estar sempre orientada de forma perpendicular ao plano horizontal. Neste caso, o drone deve estar em voo nivelado enquanto obtém as imagens, o que não corresponde à realidade, visto que é impossível em baixa altitude evitar condições atmosféricas turbulentas. Assim, o drone deve se apresentar de forma mais estável possível para que o erro seja minimizado, embora o aumento da capacidade computacional e sofisticação dos softwares de processamento consigam localizar e corrigir possíveis fontes de erros, desde que ao menos três pontos de controle estejam localizados na região sobreposta (JECHEV, 2004).

Segundo Delacourt et al. (2009), as desvantagens do método de imageamento com drone são a dependência da estabilidade das plataformas de voo utilizadas e a limitação de equipá-las com aparatos de localização de elevada precisão. Mozas- Calvache et al. (2012) recomendam que a inclinação da câmera em levantamentos aerofotogramétricos não exceda 3 a 5 graus. Como resultado, os parâmetros externos de cada imagem são insatisfatoriamente definidos caso a inclinação ultrapasse este limite.

Mesmo com a dificuldade de manter a estabilidade da câmera para a ortofoto, o drone tem se mostrado muito eficiente em mapeamentos,

substituindo os métodos tradicionais (topografia e aerolevantamentos), como observado no trabalho de Rodrigues e Gallardo (2018). Os autores ressaltam as vantagens do uso do drone no mapeamento de aterros sanitários, onde obtiveram uma grande quantidade de dados para uma determinada área com alta qualidade e precisão.

O uso do drone apresenta algumas vantagens quando comparados aos métodos tradicionais de levantamento topográfico. A primeira vantagem é no quesito segurança, pois através dos dados gerados pelo drone não é necessário percorrer a área total, sendo apenas necessário a implantação dos pontos de apoio que podem ser realizados em locais que não apresentam nenhum perigo ou risco à saúde do profissional. Outras vantagens estão relacionadas ao ganho de tempo e a diminuição de custos para a execução deste tipo de trabalho, o que possibilita uma maior repetibilidade destes estudos no decorrer da rotina.

No âmbito da geomecânica, o drone tem uma função única, pois consegue captar grande quantidade de medidas de fraturas e coletar dados de regiões inacessíveis. Como por exemplo, o alto de taludes, principalmente taludes com mais de 5 metros, pois a altura de coleta convencional não ultrapassa os 2 metros e, portanto, neste caso a maior parte do talude não consegue ser amostrada e a generalização para todo o maciço pode ter falhas.

Pode-se citar dois trabalhos com drone para uma análise de estruturas de taludes e captura ampla de medidas de uma área. O primeiro é o trabalho de Araújo et al (2020), que teve como objetivo apresentar uma alternativa para melhor coletar planos de descontinuidade e representar a visualização tridimensional dos blocos de partição. Em suma, o uso do drone possui diversas vantagens como um melhor tratamento do scanface, possibilidade de destacar as descontinuidades de interesse e identificar aquelas com a espessura desejada, sem a necessidade de um corpo técnico presente nas bancadas para medição das atitudes (direção, sentido e mergulho), e a caracterização das possíveis continuidades dos segmentos dos planos.

O segundo trabalho a ser citado é o de Martini (2018), cujo objetivo foi a caracterização de descontinuidades com o auxílio de VANT aplicada à

pesquisa de rocha ornamental no Complexo Metamórfico Palma, São Gabriel (RS). Neste estudo, ressaltou-se a importância da interpretação das fotografias aéreas pela possibilidade de determinar as principais descontinuidades e facilitar a coleta e reconhecimento em campo em menor tempo. Além disso, foi possível obter um diagnóstico prévio das áreas alvo e determinar as zonas com menores fraturamentos.

4. Materiais e Métodos

A pesquisa foi organizada em quatro etapas, incluindo pesquisa bibliográfica, trabalho de campo, análise dos dados e interpretação dos dados obtidos.

4.1. Levantamento de Campo

Foi realizada uma viagem de campo para reconhecer as estruturas presentes, como falhas normais e brechas, análise do fraturamento dos taludes e a divisão preliminar das unidades geomecânicas.

Foram realizadas duas viagens de campo para a obtenção de fotos de drones ortogonais e frontais. As fotos da primeira viagem já foram processadas e transformadas em modelos fotográficos 3D de alta resolução.

Para o levantamento sistemático, foi realizado um reconhecimento preliminar, visando a identificação de trechos com características geomecânicas semelhantes. Assim, utilizando o critério visual, foram observadas características como litotipo, grau de fraturamento, número e tipo de descontinuidades. Uma vez individualizados, cada trecho recebeu o nome de “janela” e foi numerado em ordem crescente. Para um bom resultado, optou-se por janelas homogêneas e trechos que mais penalizaram o maciço rochoso. Os parâmetros analisados foram espaçamento, frequência, persistência, rugosidade, abertura e de juntas e resistência ao cisalhamento do material que as preenche (BIENIAWSKI, 1989).

4.2. Processamento dos dados

4.2.1. Processamento das fotos de drone

Após a aquisição das fotografias em campo com o drone, os dados foram processados pelo software *Agisoft Metashape Professional* (ou *Agisoft Photo scan*), no qual foram adicionadas todas as imagens obtidas, um total de 935 fotos.

Logo após, todas as fotos foram alinhadas usando a ferramenta *Aligning*, então foi criada uma nuvem de pontos esparsa e, subsequentemente, uma nuvem de pontos densa na ferramenta *Build Dense Cloud*. Em seguida, foi realizada a classificação automática dos elementos da nuvem de pontos densa, separando árvores, terreno e construções através da ferramenta *Classify Ground Points*, contudo, necessitou-se de uma revisão manual, pois algumas construções e árvores foram classificadas como terreno. Após isso, foram criadas as malhas na ferramenta *Build Mesh*, gerados os MDTs (Modelo Digital do Terreno) e os ortomosaicos a partir da ferramenta *Build DEM* e a *Build Ortomosaic*, respectivamente. Na ferramenta *Build Ortomosaic*, há a opção de gerar o ortomosaico propriamente dito e a construção do ortomosaico inclinado, que no caso é utilizado para gerar o modelo 3D dos taludes. Por fim, o ortomosaico foi levado para o software *ArcGis 10.5* para a produção do mapa utilizado.

4.2.2. Extração automática de planos via plugin Facets

Para a identificação e extração dos planos de discontinuidades foi utilizado o software gratuito *Cloud Compare*. Nesta etapa do trabalho, os modelos tridimensionais gerados anteriormente no *Agisoft Metashape*, foram importados para o *Cloud Compare* como um arquivo *.las*, onde foi aplicado o plug-in *Facets*.

O plug-in *Facets* permite a identificação e a extração automática de faces planas a partir de uma nuvem de pontos. O algoritmo, denominado *kd tree*, é responsável por dividir a nuvem de pontos em pequenos fragmentos planares e posteriormente reagrupá-las em facetas maiores, assim,

identificando todas as feições planares contidas na nuvem de pontos, conforme os parâmetros definidos.

Após a identificação automática dos planos, foi utilizada a função “classify facets by orientation”, que agrupa os planos em famílias conforme sua orientação, para uma melhor visualização do produto gerado.

A fim de reduzir a grande quantidade de dados obtidos, foi necessário filtrar os planos conforme seu tamanho para utilizar apenas os planos mais representativos. Os planos foram avaliados quanto sua real validade comparada com o modelo 3D. Após essa verificação manual, foram reduzidos de 1400 medidas de 36 famílias para 716 medidas de 13 famílias, pois muitos planos eram referentes ao corte dos taludes e de pilhas de rejeito no topo e pé do talude que proporcionavam planos não válidos.

Por fim, os dados obtidos foram exportados em forma de arquivo (csv), foram organizados com intuito de deixar somente as informações referentes a atitude dos planos de descontinuidades para importação no software Stereonet, para realização das análises.

4.2.3. Processamento dos dados estruturais e geomecânicos

Foram trabalhadas as medidas coletadas para gerar os estereogramas de populações de juntas, falhas e acamamento através do software Stereonet, a fim de compreender a disposição das falhas, juntas, acamamentos e separar em diferentes unidades com atitudes preferenciais. Os diagramas estruturais foram construídos em equi-área projetado no Hemisfério Inferior. Para as juntas e acamamentos, foram calculados os polos dos planos para definir a concentração representante das atitudes. Já para as falhas, foram representadas as projeções ciclográficas dos seus planos e as respectivas estrias.

Para a análise cinemática dos taludes foram utilizados os resultados das atitudes preferenciais de cada família de fraturas (juntas + acamamento) e a atitude dos taludes no software Rocscience Dips, com a ferramenta *Kinetic Analysis*, considerando o limite lateral sempre igual a 20. A ferramenta mostrou

as relações angulares das fraturas entre si e com o talude para determinar qual é o movimento predominante em cada setor.

5. Resultados e Discussões

5.1. Resultados Obtidos a partir do Drone

Após o sobrevoo na cava Monte Olimpo e voos frontais nos taludes, e o processamento dos dados no Agisoft Metashape e ArcGis, foram obtidas uma ortofoto atual da respectiva localidade e dois modelos 3D fotográficos com resolução espacial de centímetros, observados nas figuras 10 e 11.

A ortofoto é de suma importância para se obter as coordenadas, logo, foi preparado um mapa da área de estudo na escala 1:800 (figura 12). Já os modelos 3D frontais dos taludes permitem sua visualização como um todo e em áreas específicas, e promove o reconhecimento de falhas e juntas, divisões de setores de acordo com o acamamento e a compartimentação do talude.

Figura 10- Modelo 3D Fotográfico com a visão em N225.

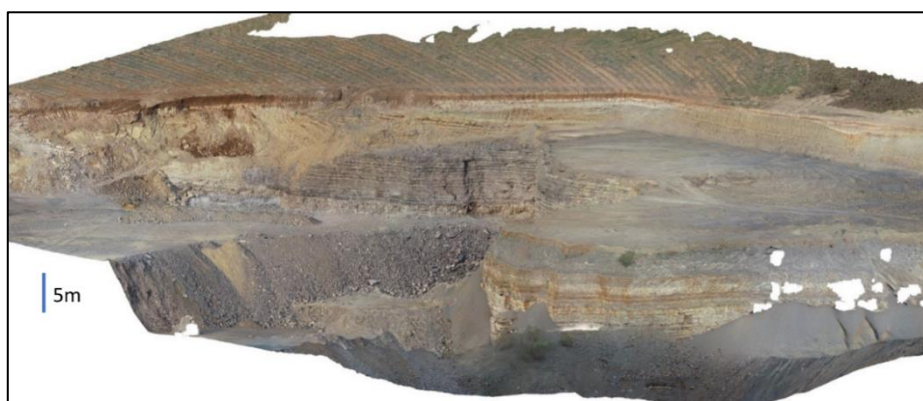


Figura 11- Modelo 3D Fotográfico com a visão em N310.

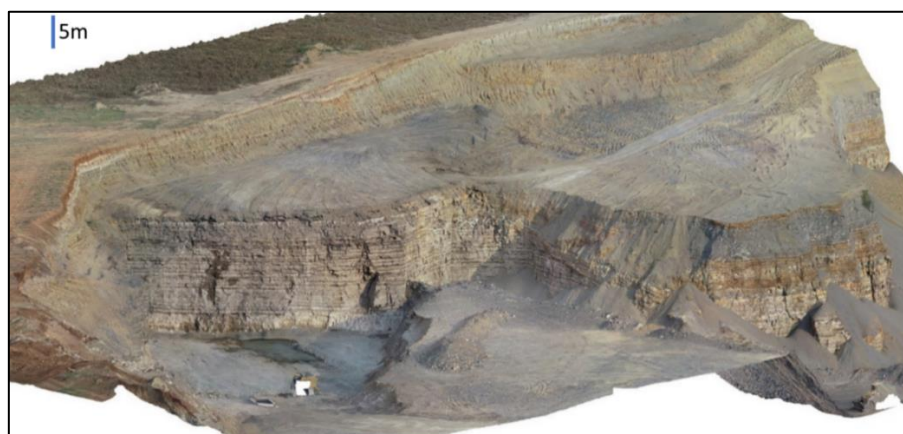


Figura 12 – Mapa da cava provinda da ortofoto.



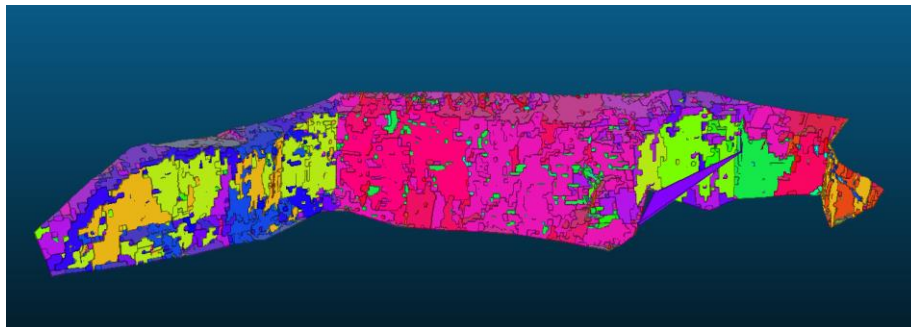
5.2. Resultados obtidos pela extração automática de planos via plugin Facets

A nuvem densa dos taludes foi importada para o Software CloudCompare (ver figura 13) e aplicada a metodologia do plugin Facets. Para a nuvem de pontos, foram identificados cerca de 1400 planos de descontinuidades e, posteriormente, foi aplicado a função para classificação das famílias, gerando ao todo 36 famílias, que estão representadas na figura 14.

Figura 13- Nuvem densa do talude do setor B no software CloudCompare.

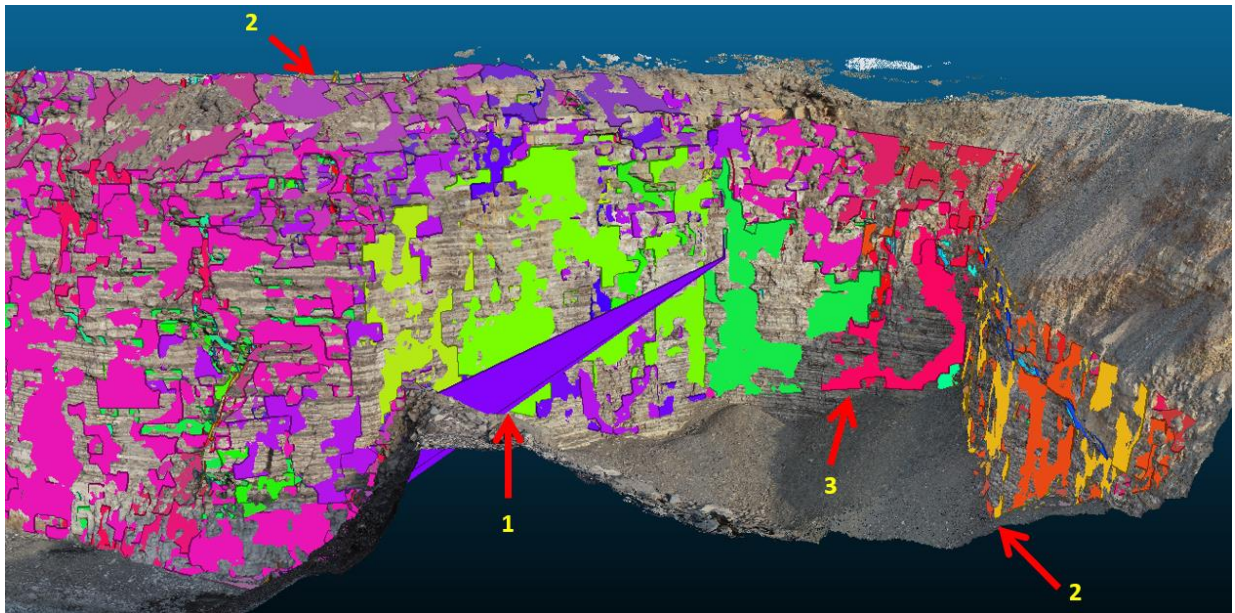


Figura 14- Planos de fraturas da nuvem densa do talude do setor B no software CloudCompare.



Dentre essas 36 famílias classificadas pelo plugin Facets com 1400 medidas, foi observado que 23 famílias não são de origem geológica, sendo alguns planos em detritos acumulados no pé e topo do talude, outros planos criados pela frente de mineração e alguns planos que não se encaixam em nada, podendo ser observado na figura 15.

Figura 15- Planos de fraturas não geológicas. 1- Plano errado. 2- Planos de detritos no pé e topo dos taludes. 3- Plano da facie do talude.

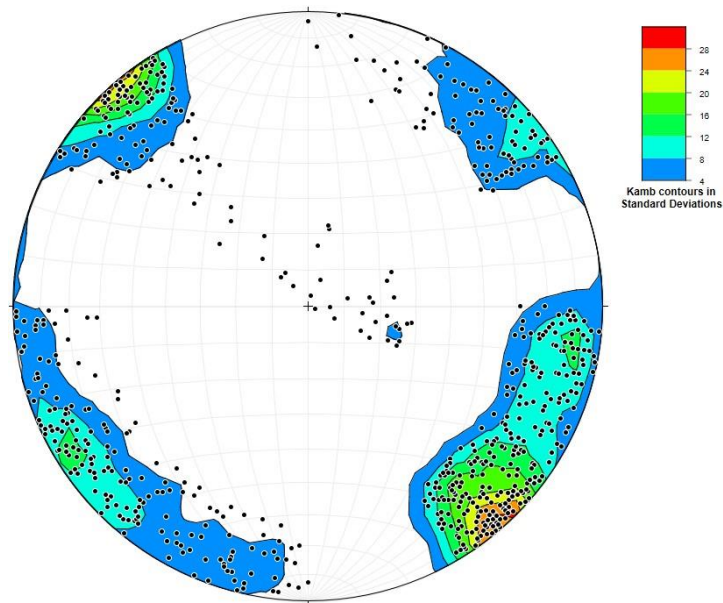


Após a filtragem dos planos, foram obtidas 13 famílias com 716 medidas e percebeu-se que há três padrões dominantes (um plano vertical NE-SW e dois planos NW-SE) e uma leve concentração de planos sub-horizontais NE-SW, visualizado nas figuras 16 e 17.

Figura 16- Planos de fraturas da nuvem densa do talude do setor B filtradas.



Figura 17- Estereograma de contorno dos polos das fraturas obtidas pela extração automática. 716 medidas.

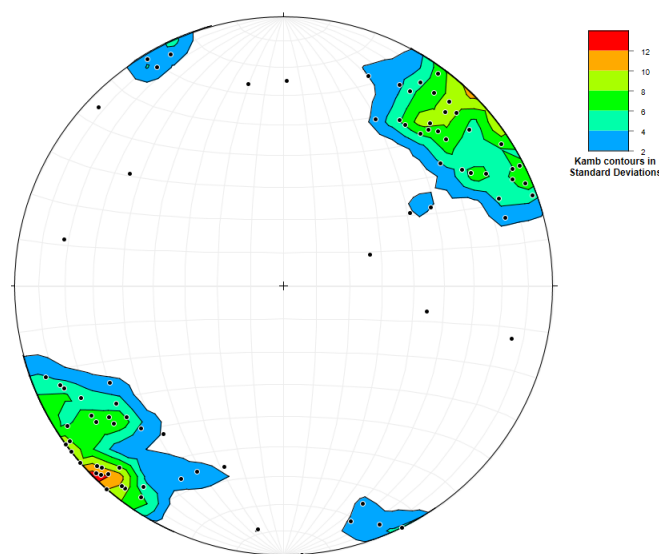


5.3. Resultados obtidos pelos dados de campo

5.3.1. Juntas

Foram coletadas 83 medidas de juntas para determinar o padrão de fraturamento da frente de lavra, sendo tal padrão representado através de diagramas de concentração dos polos dos planos na figura 18.

Figura 18- Estereograma de contorno dos polos das juntas. 83 medidas.



Com essa representação, podemos observar que há duas principais famílias (S) de juntas, sendo um NW-SE e uma NE-SW. Assim, as atitudes são S1 245/83 e S2 64/85.

Uma das características importantes para a classificação geomecânica é o tipo de preenchimento das juntas, que neste caso apresentam bastante variedade. Pode-se encontrar fraturas preenchidas por hidrocarbonetos, calcita e apenas com espaços abertos, como visto na figura 19.

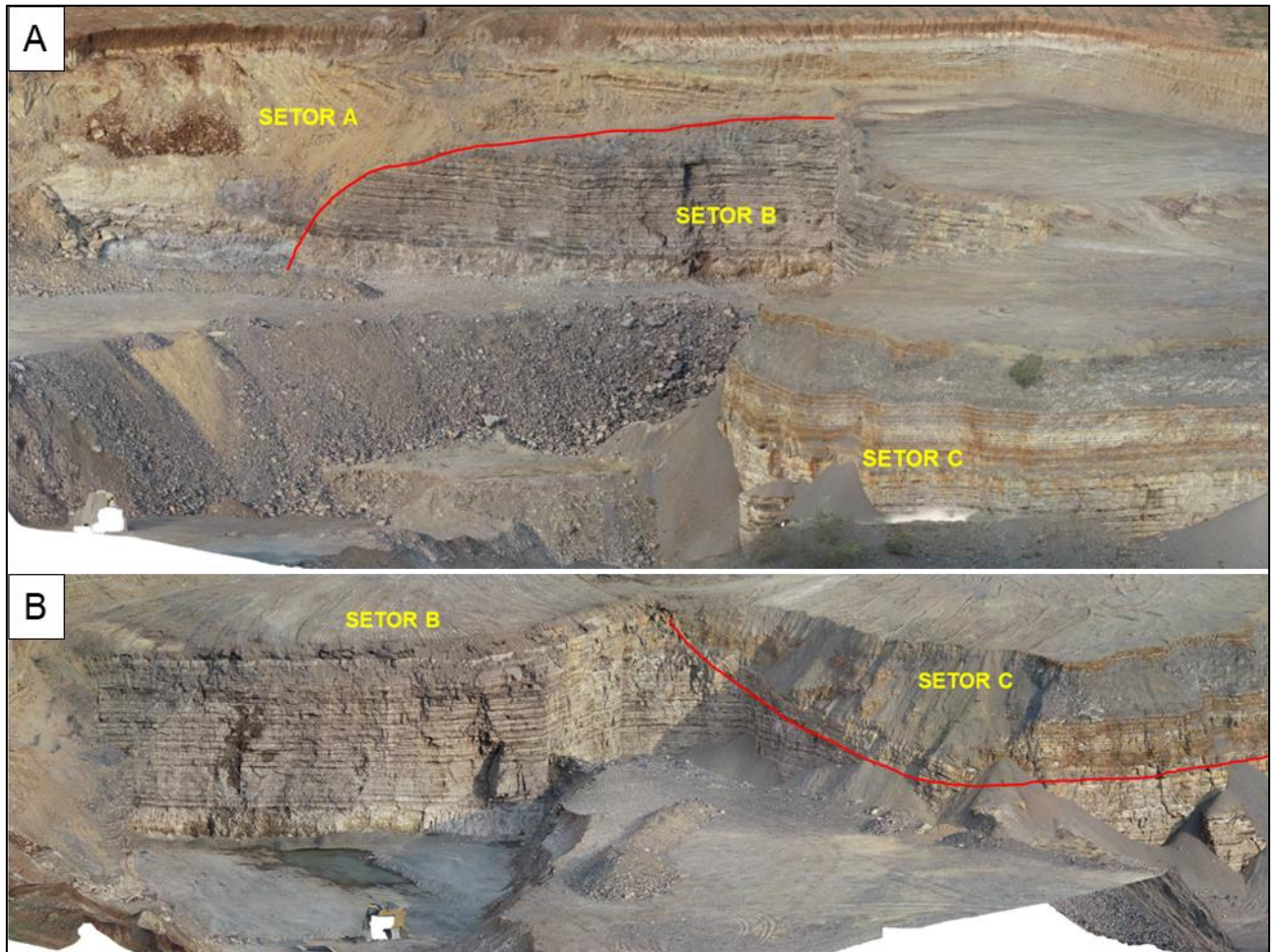
Figura 19- Presença de hidrocarbonetos em juntas.



5.3.2. Acamamento

Foram coletadas 28 medidas do acamamento e foi visto que há 3 direções principais devido presença de falhas delimitando o talude. Assim, pode-se dividir a cava em 3 setores conforme o comportamento do acamamento, contudo em um desses setores não foi possível obter as medidas por estar inacessível. A divisão pode ser vista na figura 20.

Figura 20- Divisão dos setores de acordo as atitudes do acamamento. A: Visão em N225. B: Visão em N310.



No setor A foi visto que o comportamento do acamamento está fora do padrão sub-horizontal, mostrando uma atitude principal de 230/60, com uma amostragem de 5 medidas, visto na figura 21.

Já no setor B, o comportamento do acamamento com 23 medidas apresenta uma atitude principal 301/14, e uma pequena acumulação de pontos na região dos 18/15, visto na figura 22. Essa pequena acumulação ocorre na região do setor B próximo ao setor A, já que existe uma falha responsável por bascular aquela região.

Figura 21- Estereograma de contorno dos polos do acamamento do setor A. 5 medidas.

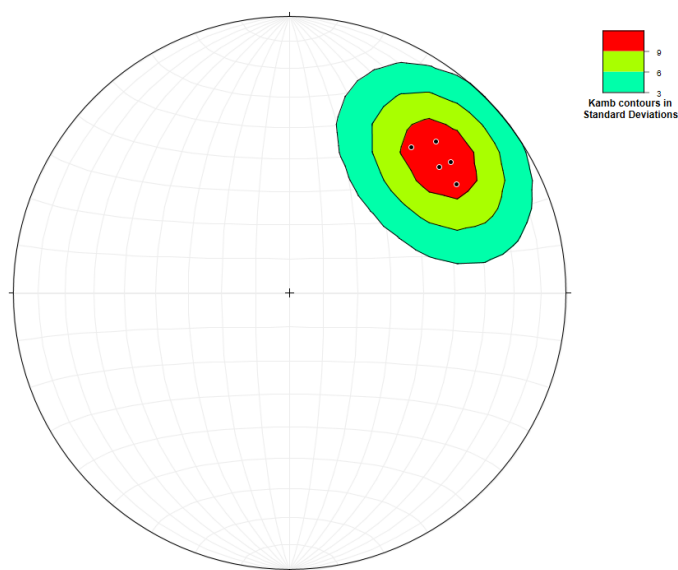
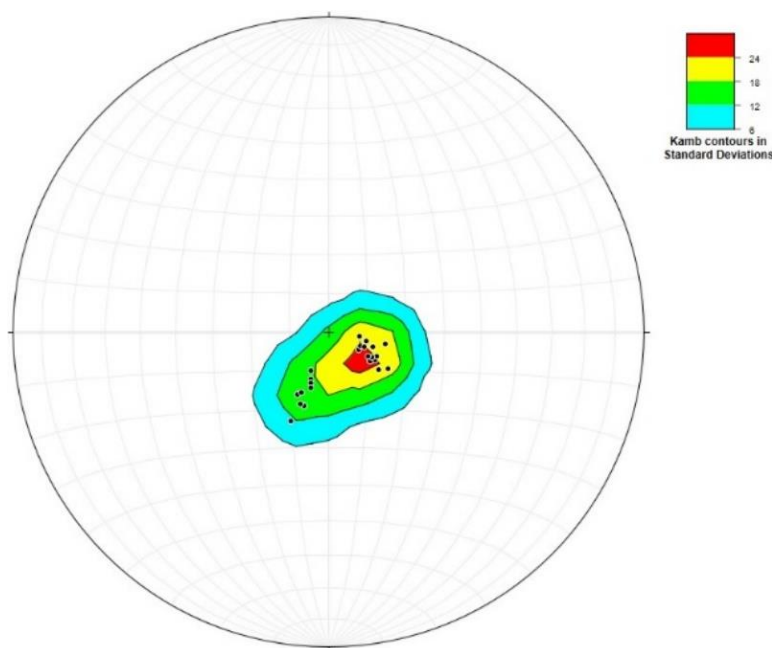


Figura 22- Estereograma de contorno dos polos do acamamento do setor B. 23 medidas.



Comparando os estereogramas obtidos através das medidas de campo e via plugging facets, é possível ver que o padrão geral da mina, principalmente do setor B, são bem representados, mas mesmo com a filtragem, ainda

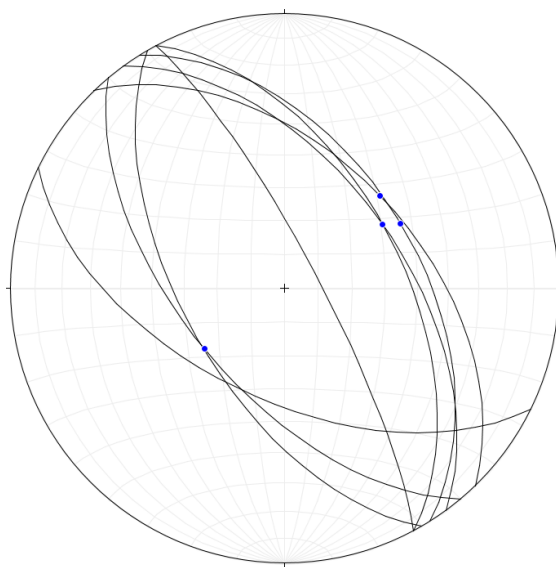
existem planos da extração automática que não apareceram no levantamento de campo.

Além disso, o acamamento, pouco aparece na extração, sendo visível apenas na parte superior do talude e, portanto, não é representado como uma medida importante no estereograma.

5.3.3. Falhas

Nos taludes da cava, foram mapeadas 7 falhas normais, com orientação principal NW-SE e estrias no rumo do mergulho (Down Dip), além de uma transcorrente de atitude principal NW-SE, representado na figura 23.

Figura 23- Estereograma com a projeção ciclográfica dos planos das falhas e as estrias. 8 medidas.



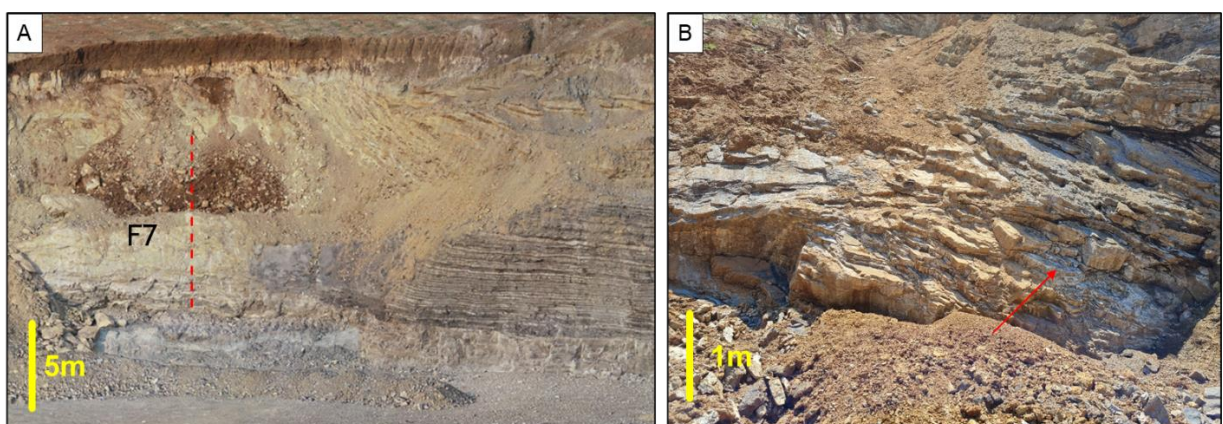
As falhas F1 (240/60) e F7 (230/60) são as principais estruturas regionais condicionantes do cenário estrutural, uma vez que elas delimitam a mudança de atitude do acamamento. Além disso, essas falhas apresentam atitudes muito semelhantes, consideradas sintéticas e possuem rejeitos métricos, visualizadas nas figuras 24 e 25. Ainda na F7, é possível observar a presença de brechas e folhelhos cominuídos no plano de falha, somado ao arrasto que o acamamento sofreu naquela região, representado na figura 20.

As demais falhas no conjunto não apresentam grandes mudanças no comportamento do acamamento, possuem rejeitos centimétricos e na grande maioria são antitéticas ao movimento das duas grandes falhas, apesar de algumas serem sintéticas.

Figura 24 – F1 bem marcada e delimitando a separação do setor B do C.



Figura 25 – A: Plano de falha da F7 representada. B: Brecha de falha encontrada no limite entre os setores A e B.



Na figura 26 é possível observar a F2 e a F3. A F2 apresenta um par conjugado, sendo a 2 uma falha sintética com atitude de 206/57 e a 2' uma falha antitética com atitude de 54/54. Já a F3 é uma falha antitética com o rejeito centimétrico bem visto e com atitude principal de 58/50.

A falha 4 apresenta um pequeno movimento de arrasto que pode representar o movimento gerado pela F7. A F4 é antitética e possui atitude de 46/50, representada pela figura 27.

Figura 26 – A: F2 apresentando um par conjugado sendo a 2 sintética e a 2' antitética. B: F3 antitética com rejeito centimétrico bem marcado.

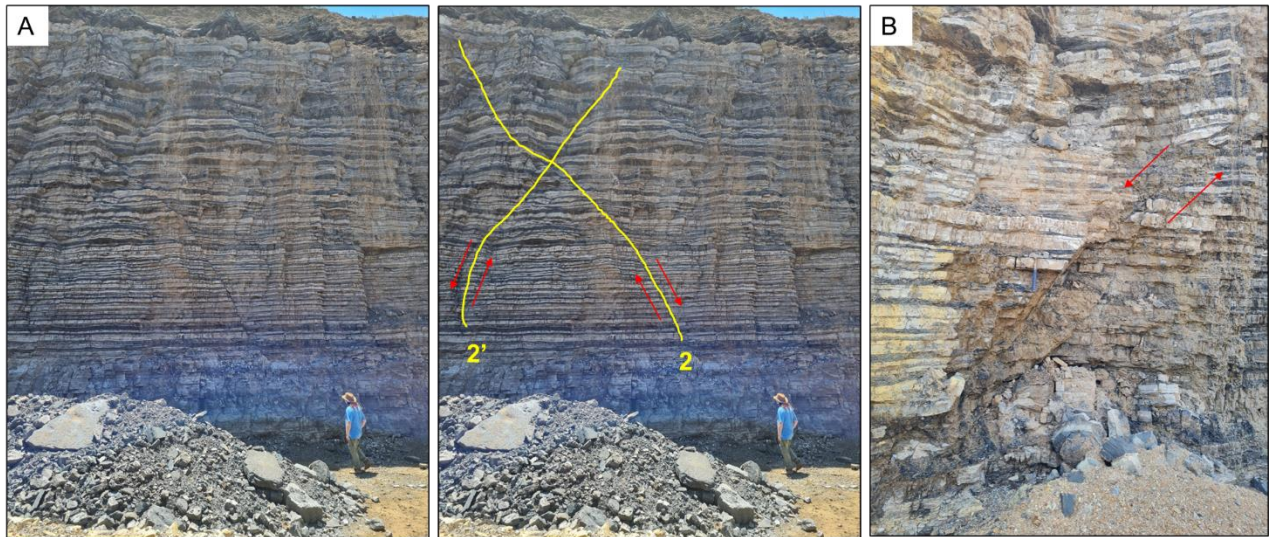
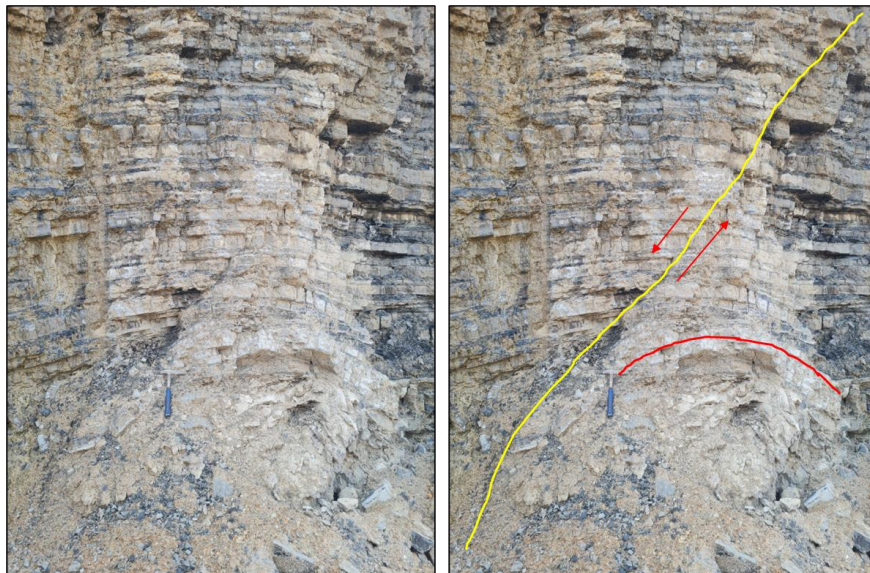


Figura 27 – F4 apresentando uma dobra de arrasto em pequena escala.



5.3.4. Cinemática dos taludes

Utilizando a direção dos taludes, as famílias de juntas e o acamamento, foi possível calcular em quais situações os taludes estão propensos a ocorrer.

Assim, calculou-se a cinemática tanto para o setor A, quanto para o setor B, já o setor C não entrou devido à falta da medida do acamamento. O setor A tem o talude com atitude 225/65, enquanto no setor B, a atitude é de 310/80.

No setor A, devido ao talude e acamamento possuírem atitudes muito semelhantes, tem-se uma situação de um deslizamento planar (figura 28), enquanto o talude do setor B possui comportamento cinemático preferencialmente de um direct toppling (tombamento direto), representado na figura 29. O que ocasiona esse comportamento do setor B são as intersecções das juntas verticais com o acabamento sub-horizotal inclinado levemente para dentro do talude. Isto promove uma condição de formação de blocos, que variam de poucos centímetros a dezenas de centímetros e, eventualmente, caem do talude.

Figura 28 – Estereograma de cinemática do talude do setor A. O acamamento está representado pelo ponto bege dentro da zona vermelha, crítica para deslizamento planar.

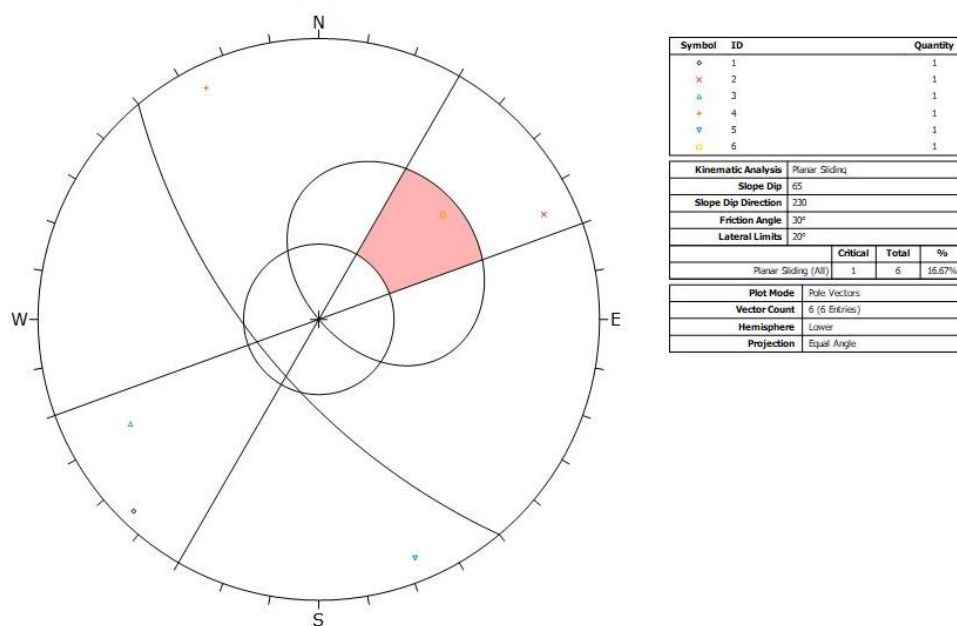
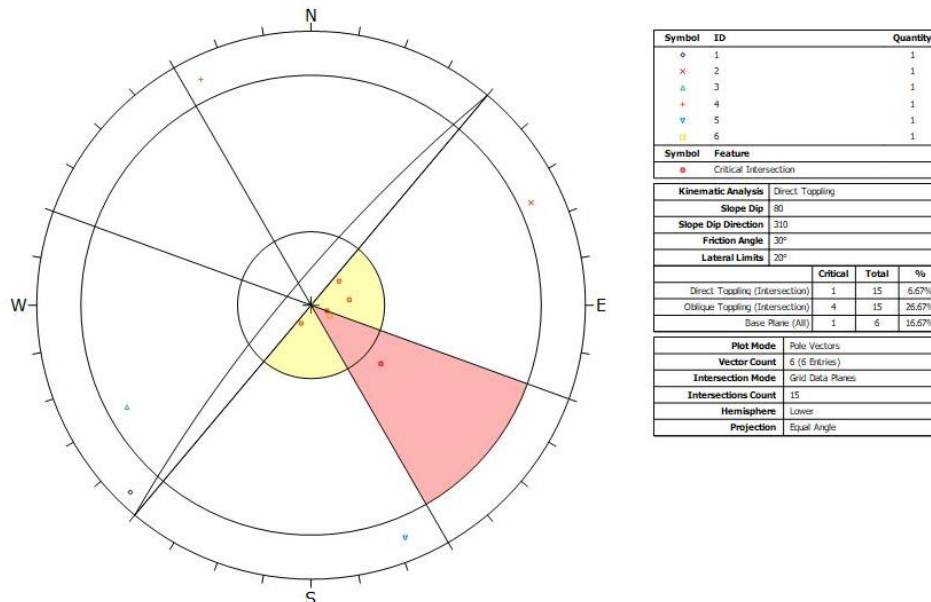


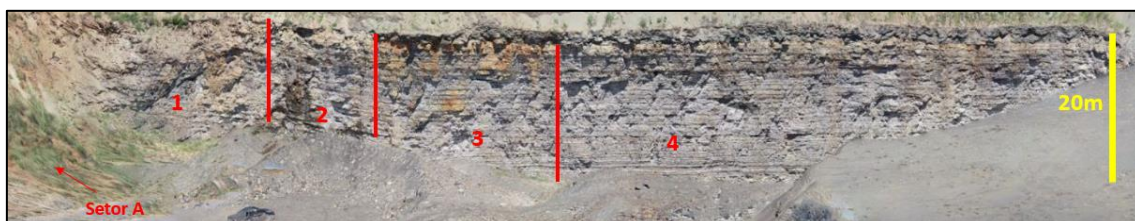
Figura 29 – Estereograma de cinemática do talude do setor B. A zona crítica é representada em vermelho para Direct Toppling e dentro há uma intersecção de planos das juntas.



5.3.5. Compartimento Geomecânico

Através da aplicação de um levantamento sistemático com o método da janela, foram coletadas as medidas e condições das discontinuidades para a aplicação do RMR. Ao total foram realizadas 4 janelas no setor B, vistas na figura 30. Não foi realizado janelas no setor A, pois o talude foi explodido e soterrado com detritos e vegetação.

Figura 30- Localização das janelas no setor B.



A janela 1 se encontra na divisão entre o setor A e B, já as outras janelas estão inseridas no contexto do setor B. Na questão de atitudes das discontinuidades, a janela 1 apresenta 3 principais famílias de fraturas, representadas por 54/48, 158/87 e 250/45, visualizadas na figura 31. Enquanto as janelas de 2 a 4, apresentam as mesmas três famílias só que com atitudes

distintas da janela 1, representadas por 230/88, 300/10 e 202/57, sendo a última referente às falhas associadas, observadas na figura 32.

Figura 31- Estereograma de contorno dos polos das famílias da janela 1. 12 medidas.

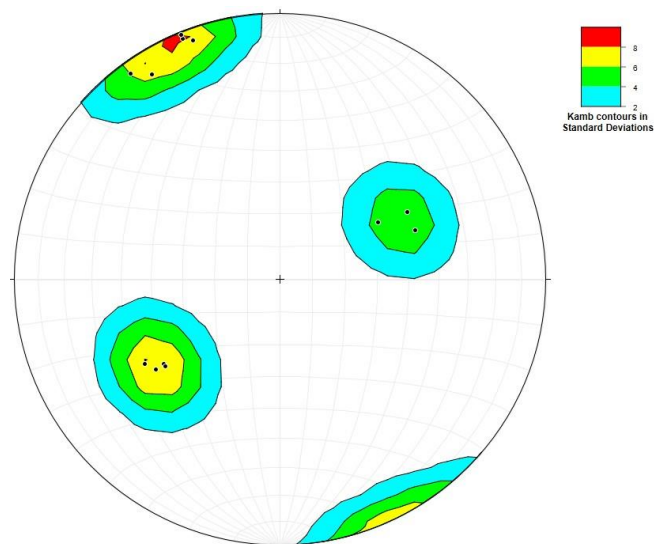
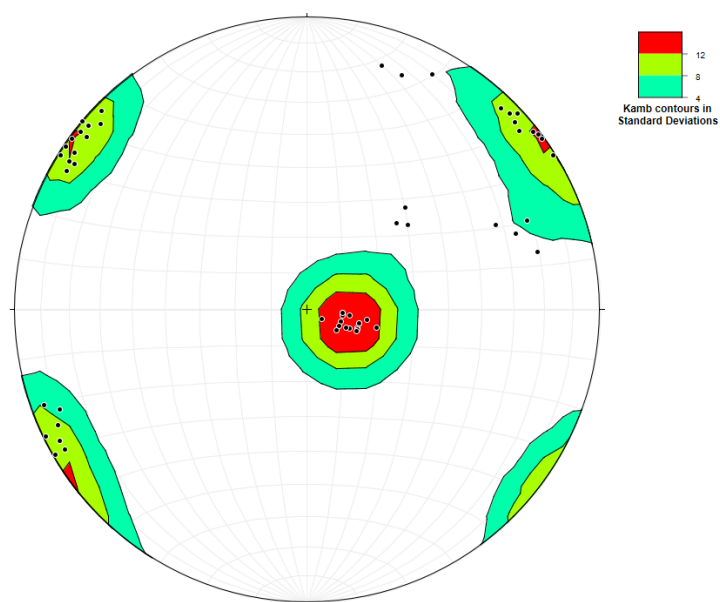


Figura 32- Estereograma de contorno dos polos das famílias da janela 2 a 4. 60 medidas.



Nos quadros 10 e 11 é possível ver as descrições das descontinuidades de cada janela e suas respectivas pontuações da classificação RMR. Para o cálculo do RQD, foi utilizada a fórmula de Palmstrom (1982) de índice volumétrico de fraturamento e os resultados encontram-se no quadro 12.

Quadro 10- Descrição dos parâmetros das famílias nas janelas.

Janela 1			
Parâmetros	Plano de falha	Vertical 1	Vertical 2
Espaçamento (m)	0,06	0,2	0,2
Persistência (m)	13	< 1	< 1
Abertura (mm)	> 5	0,5	0,5
Rugosidade	rugoso	rugoso	rugoso
Preenchimento	argila	argila	argila
Intemperismo	moderadamente intemperizado	moderadamente intemperizado	moderadamente intemperizado
Água	úmido	úmido	úmido
Orientação	favorável	favorável	favorável
Janela 2			
Parâmetros	Plano de falha	Horizontal	Vertical
Espaçamento (m)	1	0,5	0,06
Persistência (m)	15	>20	< 1
Abertura (mm)	> 5	> 5	> 5
Rugosidade	rugoso	rugoso	rugoso
Preenchimento	argila	argila	nada
Intemperismo	muito intemperizado	muito intemperizado	muito intemperizado
Água	gotejando	gotejando	gotejando
Orientação	favorável	favorável	favorável
Janela 3			
Parâmetros	Plano de falha	Horizontal	Vertical
Espaçamento (m)	3	0,5	0,06
Persistência (m)	8	>20	< 1
Abertura (mm)	> 5	> 5	> 5
Rugosidade	rugoso	rugoso	rugoso
Preenchimento	nada	argila	nada
Intemperismo	moderadamente intemperizado	levemente intemperizado	levemente intemperizado
Água	molhado	úmido	úmido
Orientação	favorável	favorável	favorável
Janela 4			
Parâmetros	Plano de falha	Horizontal	Vertical
Espaçamento (m)	3	0,5	0,06
Persistência (m)	2	>20	< 1
Abertura (mm)	> 5	> 5	> 5
Rugosidade	rugoso	rugoso	rugoso
Preenchimento	nada	argila	nada
Intemperismo	levemente intemperizado	levemente intemperizado	levemente intemperizado
Água	úmido	úmido	úmido
Orientação	favorável	favorável	favorável

Quadro 11- Pontuação dos parâmetros das famílias das janelas.

Janela 1				Janela 2			
Parâmetros	Plano de falha	Vertical 1	Vertical 2	Parâmetros	Plano de falha	Horizontal	Vertical
Espaçamento	8	8	8	Espaçamento	15	10	8
Persistência	1	6	6	Persistência	1	0	6
Abertura	0	4	4	Abertura	0	0	0
Rugosidade	5	5	5	Rugosidade	5	5	5
Preenchimento	0	2	2	Preenchimento	0	0	6
Intemperismo	3	3	3	Intemperismo	1	1	1
Água	10	10	10	Água	4	4	4
Orientação	-5	-5	-5	Orientação	-5	-5	-5
Janela 3				Janela 4			
Parâmetros	Plano de falha	Horizontal	Vertical	Parâmetros	Plano de falha	Horizontal	Vertical
Espaçamento	20	10	8	Espaçamento	20	10	8
Persistência	2	0	6	Persistência	4	0	6
Abertura	0	0	0	Abertura	0	0	0
Rugosidade	5	5	5	Rugosidade	5	5	5
Preenchimento	6	0	6	Preenchimento	6	0	6
Intemperismo	3	5	5	Intemperismo	5	5	5
Água	7	10	10	Água	10	10	10
Orientação	-5	-5	-5	Orientação	-5	-5	-5

Quadro 12- Classificação RQD das janelas calculadas pelo RQD volumétrico de Palmstrom (1982).

RQD		
Janelas	Índice	Pontuação
1	27	8
2	33,6	8
3	35,8	8
4	35,8	8

Para a determinação do parâmetro de força de compressão uniaxial, foi escolhido o método in situ proposto pela ISRM (1981), uma vez que a maior parte do talude é composto por ritmitos e este ao ser submetido a um teste laboratorial se romperia na camada do folhelho. Isto pode ser visto no próprio talude, em que essas camadas de folhelho servem como camadas

desagregadoras da rocha, ao se contrair e expandir, e assim deixam relevos negativos nos taludes. Para maior segurança, a força de compressão uniaxial determinada foi a dos folhelhos que se encaixam na categoria R1 – rochas que se esmigalham sob o impacto do martelo geológico e pode ser raspada por canivetes (entre 1 a 5 Mpa). Além disso, a determinação de uma baixa pontuação de preenchimento e abertura das fraturas, principalmente a horizontal, devem-se ao mesmo fato. Já o calcário, foi categorizado na R2 (entre 5 a 25 Mpa). No quadro 13, é observada a classificação RMR.

Quadro 13- Classificação RMR das janelas.

RMR				
Janelas	P	H	V1	V2
1	31	-	42	42
2	30	24	34	-
3	47	34	44	-
4	54	34	44	-

Utilizando os valores de RMR, conclui-se que todas as janelas possuem classe 4 (ruim). Mas ao observar os valores, podemos inferir que quanto mais próximo da falha principal, tanto os planos de falha principal quanto associadas, tornam-se mais influentes no comportamento geomecânico.

Na janela 1, o plano de falha é o principal condicionante, enquanto na janela 2, tanto o plano de falha como a fratura horizontal são os condicionantes. Já a partir da janela 3, o plano de falha não possui tanta relevância, o condicionante é a fratura horizontal.

Outra questão que não é evidenciada pela classificação RMR são as espessuras da camada de calcário, em que na base são finas e no topo são grossas, visualizado na figura 33. Um perigo relacionado a essa condição e ao grau de fraturamento, são as zonas de queda de blocos. Essas zonas são formadas pela camada de folhelho uma vez que são responsáveis por desagregar blocos decimétricos na região molhada da janela 2, visualizado na figura 34.

Figura 33- Diferença do tamanho de blocos da base e do topo.

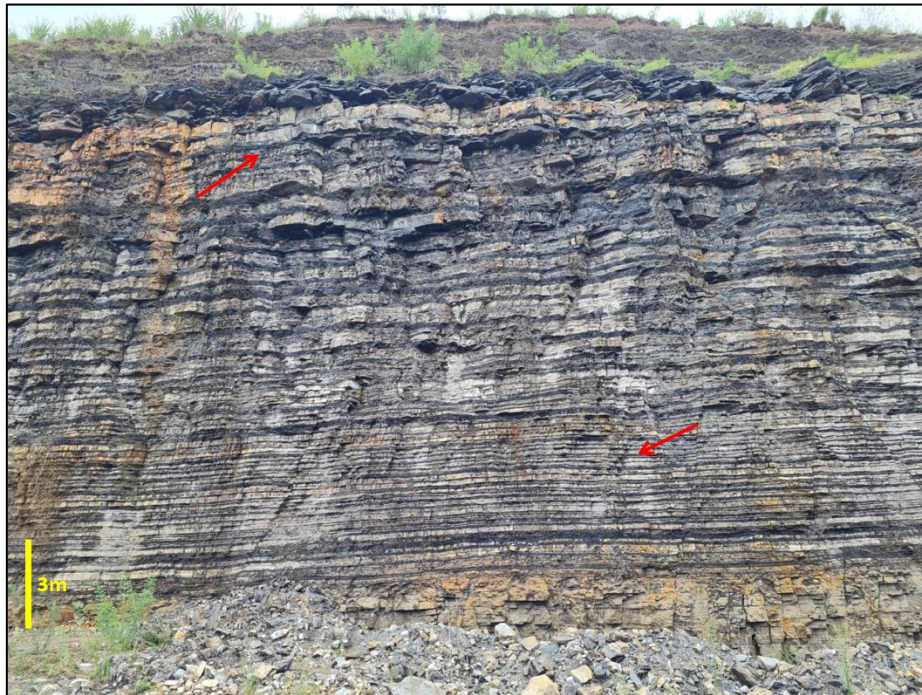


Figura 34- Zonas de queda de blocos



Quanto ao calcário na base que aparece nas janelas 2 e 3, as descrições dos parâmetros são muito semelhantes ao de ritmito. A principal diferença é na abertura e preenchimento, pois não há o folhelho agindo como camada desagregadora. Os quadros 14 e 15 evidenciam as descrições e

pontuações dos parâmetros do RMR das fraturas e o quadro 16 evidencia o valor do RMR.

Quadro 14- Descrição dos parâmetros das famílias no calcário nas janelas.

Janela 2			
Parâmetros	Plano de falha	Horizontal	Vertical
Espaçamento (m)	1	0,5	0,06
Persistência (m)	15	>20	< 1
Abertura (mm)	2	1	1
Rugosidade	rugoso	rugoso	rugoso
Preenchimento	argila	argila	nada
Intemperismo	muito intempereizado	muito intempereizado	muito intempereizado
Água	gotejando	gotejando	gotejando
Orientação	favorável	favorável	favorável
Janela 3			
Parâmetros	Plano de falha	Horizontal	Vertical
Espaçamento (m)	3	0,5	0,06
Persistência (m)	8	>20	< 1
Abertura (mm)	2	1	1
Rugosidade	rugoso	rugoso	rugoso
Preenchimento	nada	nada	nada
Intemperismo	moderadamente intempereizado	levemente intempereizado	levemente intempereizado
Água	molhado	úmido	úmido
Orientação	favorável	favorável	favorável

Quadro 15- Pontuações dos parâmetros das famílias no calcário nas janelas.

Janela 2			
Parâmetros	Plano de falha	Horizontal	Vertical 1
Espaçamento	15	10	8
Persistência	1	0	6
Abertura	1	1	1
Rugosidade	5	5	5
Preenchimento	2	2	2
Intemperismo	1	1	1
Água	4	4	4
Orientação	-5	-5	-5
Janela 3			
Parâmetros	Plano de falha	Horizontal	Vertical 1
Espaçamento	20	10	8
Persistência	2	0	6
Abertura	1	1	1
Rugosidade	5	5	5
Preenchimento	6	6	6
Intemperismo	3	5	5
Água	7	10	10
Orientação	-5	-5	-5

Quadro 16- Classificação RMR do calcário.

RMR			
Janela	P	H	Vertical
2	34	28	32
3	49	42	46

Observa-se que, longe da zona de falha e da janela 2, onde há um alto grau de fraturamento e percolação de água, o calcário sai da classe 4 (ruim) e vai para a base da classe 3 (regular). Além disso, o principal condicionante é a camada horizontal.

Como o levamento sistemático só ocorreu no setor B, local em que predomina o tombamento direto (tombamento de bloco), cujos fatores F1, F2 e F3 se aproximavam de correção zero, e o desmonte de lavra foi feito com explosivos controlados (fator F4 é 0). Quando se aplica a classificação SMR, as alterações nos valores são mínimas e são classificados no mesmo grupo do RMR, ou seja, grupo 4 (ruim).

Com a falta de detalhes que o RMR e o SMR oferecem para separar melhor os compartimentos geomecânicos, esses compartimentos foram separados pelo grau de fraturamento, litologia e atitude das camadas apresentadas em diferentes pontos. Assim, a cava foi dividida em 11 compartimentos (figura 35).

I: Solo

II: Saprólito de folhelhos da Formação Corumbataí

III: Folhelho preto com espessura de 0,5 a 1,5 m (Membro assistência)

IV: Ritmito com camadas bem grossas de calcário fraturado (blocos decimétricos)

V: Ritmito com baixo grau de fraturamento

VI: Ritmito com alto grau de fraturamento e camadas de calcário finas (blocos centimétricos)

VII: Região muito fraturada, com a presença de várias falhas e muita percolação de água

VIII: Ritmito bastante interferência de falhas

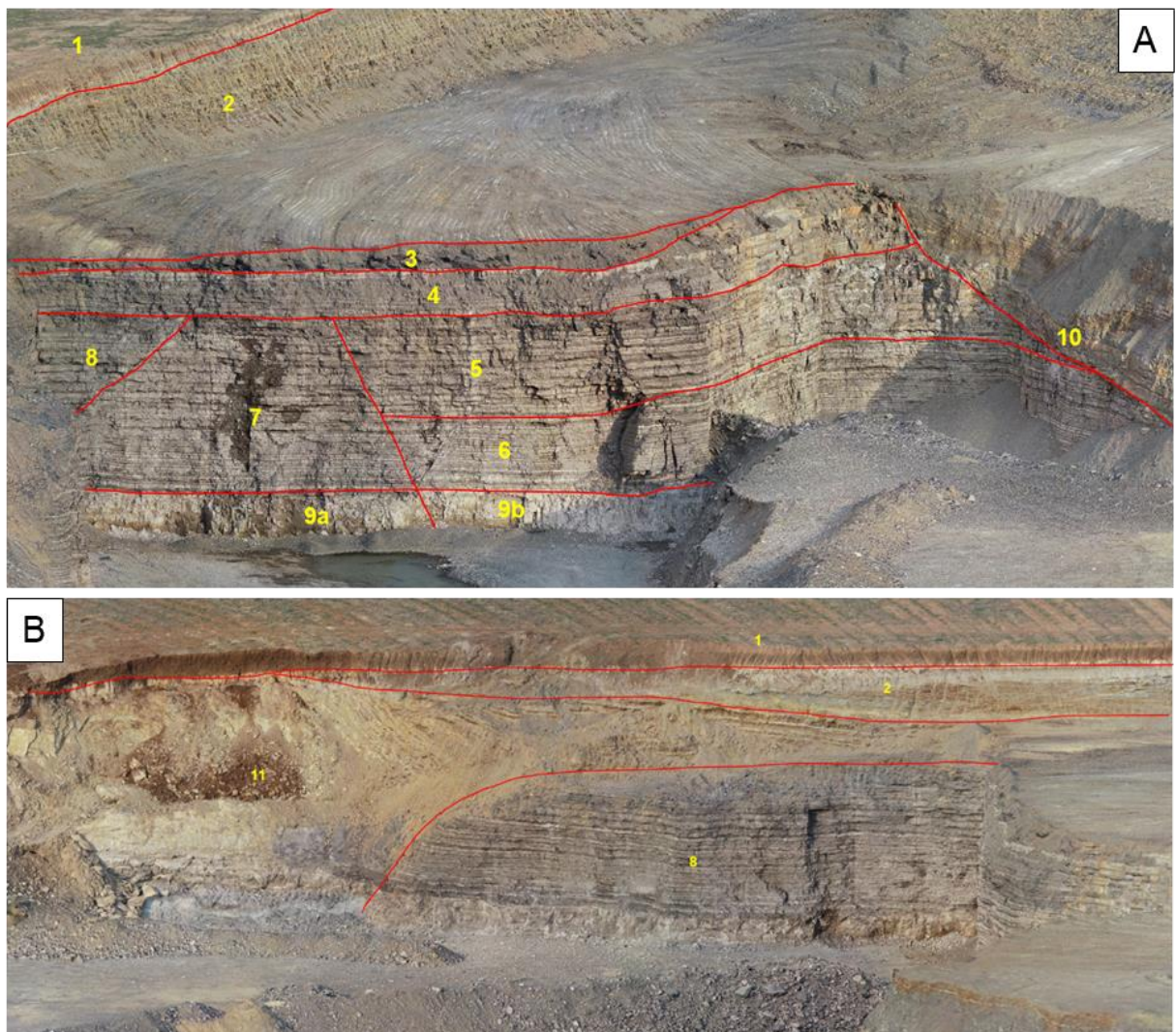
IX A: Calcário mais fraturado

IX B: Calcário menos fraturado

X: Ritmito fraturado e inclinado (NW-SE com mergulho para NE)

XI: Ritmito falhados com inclinação de 60°, orientações de juntas basculados, junto com brechas e folhelhos cominuídos

Figura 35- Compartimentação geomecânica da frente de lavra.



Em comparação entre as classificações RMR e SMR e a separação de compartimentos geomecânicos, foi observado que essas classificações não foram capazes de proporcionar o detalhamento necessário para compreender uma das principais frentes de lavras da mineração. O RMR e SMR acusa que toda frente de lavra possui as mesmas características, enquanto a compartimentação geomecânica mostrou a presença de compartimentos mais fraturados, com zonas de quedas de blocos e a questão da fratura dominante. Esse detalhamento pode auxiliar no tratamento específico de uma determinada região da frente de lavra para mitigar os problemas encontrados enquanto o RMR e SMR não indicariam tais regiões.

6. Conclusão

A utilização do drone para realizar o modelamento 3D da frente de lavra e o ortomosaico foram essenciais para ter uma boa compreensão e espacialização das estruturas encontradas nas cavas. Além disso, através do modelo 3D foi possível reconhecer o comportamento das fraturas da região, antes de um levantamento com grande precisão de estruturas pós filtragem. Contudo, a extração automática apresentou duas limitações referentes ao acamamento e a presença de planos não geológicos, mesmo com a filtragem.

A partir dos resultados do acamamento, juntas e falhas, foi possível dividir a cava Monte Carlo em três setores distintos: o setor A possui acamamento mergulhando em alto ângulo (60°); o setor B possui o menor ângulo de mergulho ($\sim 10^\circ$); e o setor C não foi possível coletar os dados. Assim, cada setor tem seus próprios desafios quanto a cinemática de taludes, no setor A predomina o deslizamento planar, enquanto no setor B predomina o direct toppling.

Através do levantamento sistemático de fraturas para a realização das classificações geomecânicas RMR e SMR, foi possível inferir que, dentro do setor B, o papel das falhas como condicionante principal do talude vai perdendo relevância para o acamamento, da janela 1 para 4. Além disso, o fator responsável pelo acamamento ser o condicionante principal é a presença das finas camadas de folhelhos intercaladas com calcário. Estes folhelhos acabam servindo como camadas desagregadoras, por possuírem resistência a compressão uniaxial muito baixa, o que promove os pontos de ruptura do maciço, intemperiza e forma preenchimentos de argila expansível entre as camadas de calcário.

Em relação à classificação RMR e SMR, não houve um resultado expressivo para separar o talude de maneira apropriada a fim de realçar as diferenças, uma vez que todas as janelas obtiveram a classe 4 (ruim) com exceção do calcário na janela 3, que apresentou classe 3 (regular).

A compartimentação geomecânica com intuito de separar as zonas que requerem maior atenção baseado no grau de fraturamento, foi muito importante nessa área, visto que o RMR e SMR não cumpriram tal intuito. Logo as zonas

7, 8 e 10 necessitam de maior atenção, por possuírem maior grau de fraturamento, além de falhas e percolação de água. Ademais, a zona 11 também requer atenção, uma vez que possui um ângulo de mergulho de 60° e a cinemática principal é de deslizamento planar junto com as camadas de folhelho desagregadores.

Por fim, vale ressaltar que na pesquisa de petróleo, em que o estudo das rochas em profundidade é caro e limitado, utilizar análogos para entender o padrão de fraturamento, condicionantes e particularidades se mostra como uma ótima opção de se obter grande quantidade de informações sobre a migração do óleo e o plano de exploração, de maneira rápida e com um custo expressivamente menor.

7. Bibliografia

American Society of Photogrammetry – ASP. Manual of Photogrammetry. 4 ed. Falls Church: ASP Press, p.1056, 1980.

ARAUJO, A. C. V.; VASCONCELOS, S. L. D.; MARIZ, J. L. V.; SOUZA, J. C.; BARROS, M. L. S. C. Determinação de blocos de partição em maciços rochosos através de planos de descontinuidades com uso de VANTs. *Tecnologia Material Mater Mineração*, v. 17, n. 4, 2020.

ARAÚJO, L. M.; TRIGUIS, J. A.; CERQUEIRA, J. R.; FREITAS, L. C. da S. The atypical Permian Petroleum System of the Paraná Basin, Brazil. In M.R. Mello & B.J. Katz (eds.) *Petroleum systems of South Atlantic margins*. AAPG Memoir, v. 73, p 377-402, 2000.

AQUAROLI, L. H. S. Papel da tectônica rúptil na possível migração de hidrocarbonetos: estudo da porção noroeste da estrutura de Pitanga, região central do estado de São Paulo. Trabalho de Conclusão de Curso. UNESP. 57 p, 2013.

AMARAL S. E. Geologia e Petrologia da Formação Irati (Permiano) no Estado de São Paulo. *Bol. Instituto de Geociências e Astronomia*, v.2, p.3-81,1971.

AKSOY, C.O. 2008. Review of rock mass rating classification: Historical developments, applications, and restrictions. *Journal of Mining Science*, v. 44, n.1, p 51-63.

BATISTA, M.J. Caracterização Estrutural do Alto de Jibóia, Região Central do Estado de São Paulo, Relatório Técnico – Científico Final, UNESP, ANP PRH-05, 2002.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering classification of jointed rock masses. *Transactions of the South African Institution of Civil Engineers*, v.15, n. 12, p. 335–344, 1973.

BIENIAWSKI, Z. T. In: Hudson, J. A. Classification of rock masses for engineering: The RMR system and future trends. Comprehensive Rock Engineering, New York: Pergamon Press. v. 3, p. 553–574, 1993.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Geologia e Recursos Minerais do Estado de São Paulo: Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Brasília: MME, Programa Geologia do Brasil: Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais. Escala 1:750000, CD-ROM. 2006.

DAEMON, R. F. & FRANÇA, A. B. Sedimentos do Westfaliano (Carbonífero Médio) na Formação Lagoa Azul, Grupo Itararé. In: Simpósio sobre Cronoestratigrafia da Bacia do Paraná, v. 1, 1993.

DEERE, D. U. Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes. Rock Mechanition (RQD) after Twenty Years. ncs and Engineering Geology, v. 1, n. 1, p. 16- 22, 1963.

DEERE D.U. Geological considerations. Rock mechanics in engineering practice, K.G, Stagg & O.C. Zienkiewics (eds), John Viley & Sons, London, UK, p. 1-20, 1969.

DELACOURT, C.; Allemand, et al. DRELIO: An Unmanned Helicopter for Imaging Coastal Areas, Journal of Coastal Research, v. 56, p 1489- 1493, 2009.

FONTINHAS, A. M. P. Aplicação do SMR na avaliação da estabilidade de taludes de escavação em grauvacas da Formação de Mértola. Dissertação de Mestrado, UNL, 97p, 2012.

FRIES, M. Estudo dos altos estruturais de Pitanga, Artemis, Pau D'Alho e Jibóia (flanco nordeste da bacia sedimentar do Paraná), através dos métodos geofísicos da gravimetria e magnetometria terrestres. Tese de Doutorado da Universidade Estadual Paulista - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 238 p, 2008.

Hoek, E., & Bray, J. W. Rock slope engineering (revised 3rd ed., p. 358). The Institution of Mining and Metallurgy. London: Maney Publishing. 1981.

ISRM. Description of discontinuities in a rock mass. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences—Geomechanics Abstracts, v. 15, p. 319–368, 1981.

JECHEV, D. Close-range photogrammetry with amateur camera. XX Congress of ISPRS, Istanbul. Internal Archive of Photogrammetry, v. 35, Part D8, Comm. II, 2004.

LACERDA, K. C. Práticas de análise estrutural no membro assistência - Formação Irati, em Saltinho-SP: estudos de campo e aplicação de tomografia elétrica. Tese de Conclusão de Curso em Geologia. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. 75 p., 2022.

LUCAS, M. Caracterização de descontinuidades com o auxílio de Vant aplicada à pesquisa de rocha ornamental no Complexo Metamórfico Palma, São Gabriel (RS). Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Geologia, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 43 p., 2018.

MATTHEWS, N. A. Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation, and Preservation. Technical Note 428. U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Operations Center, Denver, Colorado, 42 p., 2008.

MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do Gondwana Sul – ocidental. Tese de Doutorado em Geociências - Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 255 p, 1997.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUSA, P. A.; FERNANDES, L. A. FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 15, n. 2, p. 265–287, 2007.

PERINOTTO, J. A. J. e ZAINÉ, J. E. 2008. Coluna Estratigráfica da Região de Rio Claro.

MELO, M. S. A Formação Rio Claro e Depósitos Associados: Sedimentação Neocenoica na Depressão Periférica Paulista. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo Instituto de Geociências, 1995.

MOLRON, J.; LINDE, N.; BARON, L.; SELROOS, J.; DARCEL, C.; DAVY, P. Which fractures are imaged with Ground Penetrating Radar? Results from an experiment in the Äspö Hardrock Laboratory, Sweden. *Engineering Geology*, 21p, 2020.

MOZAS-CALVACHE, A. T; et al. Method for photogrammetric surveying of archaeological sites with light aerial platform. *Journal of Archaeological Science*, v. 39, p 521-530, 2012.

PALMSTROM, A. The Volumetric Joint Count – A Useful and Simple Measure of the Degree of Rock Mass Jointing. In: *IAEG Congress*, New Delhi, p. 221-228, 1982.

REMONDINO, F., SPERA, M. G., NOCERINO, E., MENNA, F., NEX, F. C. State of the art in high density image matching. *Photogrammetric record*, v.29(146), p. 144-166, 2014.

RICCOMINI, C. Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*; n. 27, v. 2, p. 153-162, 1997.

RIFFEL. S. H. Modelo de trapa estrutural em carbonatos fraturados com falhas selantes: exemplo da Formação Irati em Saltinho – SP. *Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro, UNESP, Rio Claro*. 111 p., 2020.

RODRIGUES, D. A. & GALLARDO, A. L. C. Vantagens da aerofotogrametria por drone na obtenção de dados topográficos em estudos de lixões e aterros sanitários. *VII Simpósio de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade*, São Paulo, 15 p., 2018.

ROMANA, M. R. A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating. In: *HUDSON, J. A. Comprehensive Rock Engineering*. London: 1 ed. Pergamon Press, v.3, 45p, 1993.

SANTOS, R. V.; SOUZA, P. A.; ALVARENGA, C. J. S.; DANTAS, E. L.; PIMENTEL, M. M.; OLIVEIRA, C. G.; ARAÚJO, L. M. Shrimp U-Pb Zircon dating and palinology of bentonitic layers from the Permian Irati Formation, Paraná Basin, Brazil. *Gondwana Research*, Osaka, v. 9, p. 456-463, 2006.

SANTOS, R. V. Aplicação do método GPR (Ground Penetrating Radar) no estudo de vazios em rochas carbonáticas. Tese de Conclusão de Curso em Geologia. Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador. 84 p., 2019.

SCHNEIDER, R. L. et al. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. Porto Alegre - RS-28º Congresso Brasileiro de Geologia. 1974.

SINGH, B. & GOEL, R K. Engineering Rock Mass Classification. 1. ed. Waltham: Elsevier, 2011. 382p.

SOARES, P. C. Elementos estruturais da parte nordeste da Bacia do Paraná: classificação e gênese. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: SBG, v.4, p.107-121, 1974.

SOARES, P.C. e LANDIM, P.M.B. Comparison between the tectonic evolution of the intracratonic and marginal basins in South Brazil. An. Acad. Bras. Science, Rio de Janeiro, v. 48 (supl.), p 313-324, 1975.

SOUSA, M. O. L. Caracterização Estrutural dos altos estruturais de Pitanga, Artemis, Pau D'Alho e Jibóia, centro do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro, UNESP, Rio Claro, 206 p., 2002.

THOMAZ-FILHO, A., MIZUZAKI, A. M. P.; ANTONIOLI, L. Magmatismo nas bacias sedimentares brasileiras e sua influência na geologia do petróleo. Revista Brasileira de Geociências. V.38(2). p128-137, 2008.

TOMÁS, R., RIQUELME, A., CANO, M., PASTOR NAVARRO, J. L., PAGÁN, J. I., ASENSIO, J. L., e RUFFO, M. Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado. Revista de Teledetección, v. 55, p. 1-15, 2020.

WESTOBY, M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J., e REYNOLDS, J. M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, v.179, p. 300-314, 2012.

ZAINE, J. E. Mapeamento de geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP). Tese de Doutorado do Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP. 148 p, 2000.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T. ZANOTTO, O. A. Bacia do Paraná. In: GABAGLIA, G. P. R.; MILANI, E. J. (Coord.). Origem e evolução de bacias sedimentares. Rio de Janeiro: PETROBRÁS, p. 135-168, 1990.

ZALÁN, P.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T. ZANOTTO, O. A. P. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, Curitiba. Atas. Curitiba: SBG, 441p, 1987.