

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA

CURSO DE GEOLOGIA

GEOVANNE OLIVEIRA MARCOLA

**CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E MODELAGEM 3D DO SETOR NORDESTE
DA MINA MORRO REDONDO – SÃO JOSÉ DOS PINHAIS (PR)**

CURITIBA

2018

GEOVANNE OLIVEIRA MARCOLA

**CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E MODELAGEM 3D DO SETOR NORDESTE DA
MINA MORRO REDONDO – SÃO JOSÉ DOS PINHAIS (PR)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia
como requisito parcial à obtenção do
grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Prof^a Dr^a Adriana
Ahrendt Talamini

CURITIBA

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Márcia e Otávio, por todo apoio, carinho, confiança, prestígio e incentivo ao longo de toda minha vida. Sem vocês eu não seria nada.

Agradeço aos meus avós, Maria e José, pelo carinho e zelo que vocês me proporcionaram em minha trajetória. Além do agradecimento, dedico esse trabalho à vocês.

Agradeço à minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Adriana Ahrendt Talamini, por compartilhar sua experiência no mundo da geotecnia, pela sua orientação e pelo incentivo na trajetória acadêmica.

Agradeço à equipe da Engeluz Iluminação e Eletricidade, pela disponibilização de preciosas horas para o desenvolvimento do presente trabalho.

Agradeço aos amigos que me proporcionaram incríveis momentos ao longo desses cinco anos. “Belo”, Hugo, “Theusminha”, Laís, Rafaella, “Vitinho”, “Restart” e “Britinha”, guardo cada momento compartilhado com vocês no fundo do coração. Obrigado por todas as sequelas e infinitas risadas.

Agradeço à mineração Guaricana, por cederem livremente as dependências da mina para a realização deste estudo.

Agradeço ao LECOST, pela disponibilização do RTK e em especial, à Geóloga Fernanda Avelar, por me acompanhar na realização do levantamento topográfico.

Agradeço ao amigo e arquiteto Gabriel Walski, pelos conhecimentos compartilhados nos mais diversos *softwares* “da vida”.

RESUMO

O avanço da exploração no setor nordeste da mina Morro Redondo, uma lavra a céu aberto, localizada em São José dos Pinhais – Paraná - Brasil, encontra-se limitado por fatores geomorfológicos, fazendo com que a estratégia para a progressão da lavra, seja adotar uma nova direção de corte nos taludes nos próximos anos, configurando a necessidade de uma nova avaliação estrutural e geotécnica neste setor da mina. A caracterização do maciço consistiu na descrição das características intrínsecas das descontinuidades, como: orientação espacial, espaçamento, continuidade, alteração, preenchimento, rugosidade, abertura e presença da água; por meio da análise setorizada de trinta zonas, localizadas nas quatro bancadas superiores, com espaçamento variando de 17 m a 23 m, delimitadas pela contagem de passos. O processamento das medidas anotadas permitem classificar 10 famílias de fraturas, que fornecem informações que subsidiaram as classificações geomecânicas por meio dos sistemas RMR (*Rock Mass Rating*) e SMR (*Slope Mass Rating*). As notas obtidas para a classificação RMR correspondem as Classes III e IV, caracterizadas como regular e pobre, respectivamente. A análise pelo sistema SMR foi realizada apenas para as zonas de Classe IV do sistema RMR, em que foram obtidas notas de Classe IV e V, caracterizadas, respectivamente, como ruim e muito ruim. A variação entre as notas obtidas pelas duas classificações é evidenciada pela ênfase do sistema SMR na relação das geometrias das descontinuidades e do talude. A aplicação das classificações geomecânicas fornecem importantes parâmetros para a análise cinemática das descontinuidades presentes, como a coesão e o ângulo de atrito interno (Φ). A análise cinemática foi proposta para a possível configuração futura dos taludes no setor nordeste, em que se utilizou os ângulos de atrito de 20° e 30°, oriundos da classificação RMR, correspondendo às zonas de Classe IV e Classe III. A atitude dos taludes em N80E/80SE foi proposta para a possível configuração futura da mina. Foram constatados deslizamentos planares para quatro famílias de fratura e deslizamentos em cunha entre sete famílias de fratura. Por meio do levantamento topográfico via sistema RTK, uma modelagem tridimensional do terreno e a espacialização tridimensional das famílias de fraturas que configuram possíveis deslizamentos, comprovados pela análise cinemática, foi proposta. A modelagem confere o realce para as estruturas que estão susceptíveis às instabilizações. A direção dos taludes sugerida neste trabalho mostrou-se adequada e exequível quanto as limitações geomorfológicas da mina, uma vez que na configuração proposta, os deslizamentos estão relacionados às fraturas visualizadas em menor quantidade e em zonas localizadas, inferindo sua menor quantidade em todo o maciço.

Palavras-chave: classificações geomecânicas, mecânica das rochas, modelagem 3D.

ABSTRACT

Advances in the northeast sector of the Morro Redondo mine, an open-pit mine, located in São José dos Pinhais – Paraná - Brazil, are limited by geomorphological factors, so the strategy for the progression of mining is to adopt a new cutting direction in the slopes in few coming years, setting the need for a new structural and geotechnical assessment in this sector of the mine. The characterization of rock mass consisted in describing the intrinsic characteristics of the discontinuities, such as: spatial orientation, spacing, continuity, alteration, filling, roughness, aperture and presence of water; through the sectorized analysis of thirty zones, located in the four upper pit benches, with spacing ranging from 17 m to 23 m, delimited by step counting. The processing of the structural measures, classified in 10 joints sets, which provide information that subsidized the geomechanical classification through RMR (Rock Mass Rating) and SMR (Slope Mass Rating) systems. The grades obtained for the RMR classification correspond to Classes III and IV, characterized as regular and poor, respectively. The SMR system analysis was performed only for the Class IV areas of the RMR system, where Class IV and V grades were obtained, characterized as respectively bad and very bad. The variation between the grades obtained by the two classifications is evidenced by the emphasis of SMR system between the relation of the discontinuity and slope geometries. The application of the geomechanical classifications provide important parameters for kinematic analysis of discontinuities, such as cohesion and the internal friction angle (Φ). The kinematic analysis was proposed for the future configuration of slopes in the northeast sector, where the friction angle of 20° and 30° from the RMR classification were used, corresponding to Class IV and Class III zones. The slope attitude (N80E/80SE) was proposed for the possible future configuration of the mine. Planar sliding were observed for four joints sets and wedge sliding were noticed among seven fracture families. Through the RTK topographic survey, a 3D terrain modeling and 3D spatialisation of joints sets that configure possible slidings, proved by kinematic analysis, was proposed. Modeling gives the enhancement to structures that are susceptible to instabilities. The slope direction suggested in this work was adequate and feasible regarding the geomorphological limitations of mine, since in the proposed configuration, slidings are related to joints seen in smaller amounts and in localized zones, inferring their smaller amount in the whole rock mass.

Keywords: geomechanical classifications, rock mechanics, 3D modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Figura de Localização da mina Morro Redondo (Fonte: Digital Globe WorldView-3).	2
Figura 1.2: Imagens multitemporais mostrando a evolução das aberturas das bancadas na mina Morro Redondo. As setas brancas indicam o setor que possui maior avanço graças à extração do agregado. (Fonte: Google Earth).	3
Figura 2.1: Sucessão estratigráfica da Bacia Guaratubinha. Fonte: Modificado de Castro (1993 <i>apud</i> Barão 2016).	5
Figura 2.2: Mapa Geológico simplificado da Bacia do Guaratubinha. Fonte: Modificado de MINEROPAR (2006 <i>apud</i> Barão 2016).	6
Figura 2.3: Orientação de uma descontinuidade desfavorável em relação à obra. Fonte: Vallejo (2002).	9
Figura 2.4: Representação esquemática das propriedades das descontinuidades. Fonte: Adaptado de Hudson (1989 <i>apud</i> Vallejo 2002).	10
Figura 2.5: Classificação Geomânica de Bieniawski. Fonte: Traduzido de Bieniawski (1989).	13
Figura 2.6: Figura esquemática exemplificando os elementos de plotagem estereográfica para a análise cinemática. α_1 : Rumo de mergulho da Família 1 (J1); α_2 : Rumo de mergulho da Família 2 (J2); α_{12} : Direção da linha de interseção. Fonte: Modificado de Raghuvanshi (2017).	18
Figura 2.7: Exemplos de deslizamentos planares e em cunha. A) Demonstração de um deslizamento planar juntamente à sua projeção estereográfica. B) Deslizamento em cunha, juntamente à sua projeção estereográfica. L_1 : Rumo de mergulho da família J1. L_{12} : Direção da linha de interseção entre as famílias J1 e J2. Fonte: Adaptado de Hocking (1976 <i>apud</i> Yoon et al. 2002).	18
Figura 3.1: Setor Nordeste da mina Morro Rendondo. A) Fotografia do setor nordeste. B) Imagem esquemática evidenciando a diferenciação da coloração do setor nordeste com o restante da mina.	19

Figura 3.2: Zoneamento das bancadas estudadas no setor nordeste da mina Morro Redondo.....	21
Figura 3.3: Relação trigonal de funcionamento do Sistema RTK. Fonte: Disponível em: https://www.anatumfieldsolutions.com/RTK-GPS-Explained_b_6.html	22
Figura 3.4: Composição do GPS RTK Stonex S8 Plus e sua utilização. A) Base do RTK instalada, medida e nivelada em relação ao terreno. B) Rover do RTK, acoplado a um bastão com nível. C) Estação coletora. D) Caminhamento na base de um talude.....	23
Figura 4.1: Amostra macroscópica do riolito da mina Morro Redondo	25
Figura 4.2: Fluxograma referente às fases de classificação adotadas para a separação de famílias de fraturas a partir das medidas de campo. Exemplificação referente a duas famílias visualizadas na zona 26, localizada na 4ª bancada.	26
Figura 4.3: Estereogramas das famílias de fraturas classificadas.....	28
Figura 4.4: Planos vetorizados das famílias de fraturas.	30
Figura 4.5: Zonas de dano com espaçamento constante, localizada na zona 14.	31
Figura 4.6: Evidências de transcorrência. A) Estrias paralelas à direção apontada; B) Zona de influência cominuida de aproximadamente 1,5 m de extensão.	32
Figura 4.7: - Interseção das famílias C e D gerando feições em cunha. A) Fotografia demonstrando a cicatriz do deslizamento já ocorrido. B) Materialização das famílias C e D.....	32
Figura 4.8: Zonas de alteração. A) Zona de alteração na parede de uma fratura, com água percolando; B) Zona de alteração ao longo de toda a face do talude.	33
Figura 4.9: Zona 05, onde as fraturas apresentam aberturas de até 6 cm.	33
Figura 4.10: Preenchimento na família B. A) Espessura do preenchimento de aproximadamente 2 cm; B) Preenchimento constituído por calcita e fluorita.	34
Figura 4.11: Blocos suspensos na iminência do tombamento. A) Fotografia de dois blocos na iminência do tombamento, localizado na zona 30. B) Imagem esquemática de dois	

blocos localizados na zona 30 na iminência do tombamento pela interseção das famílias de fratura B e G.....	35
Figura 4.12: Fluxo de água em famílias sub-horizontais. A) Figura esquemática de toda a zona 28, sendo compreendida por 4 famílias de fraturas. B) Fluxo de água possivelmente relacionada à interseção das famílias D e G.	35
Figura 4.13: Classificação RMR do setor nordeste da mina Morro Redondo.	37
Figura 4.14: Análise cinemática para deslizamentos em cunha em planares. Os ângulos de atrito interno correspondem à 20° e 30.....	42
Figura 4.15: Modelo tridimensional digital de terreno. A) Modelo da configuração atual da mina, com os taludes a leste com direção de corte média N75W; B) Modelo proposto com direção de corte médio dos taludes a leste de N80E.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Critérios avaliativos dos subfatores do Sistema SMR. α_j : direção da descontinuidade; α_s : direção do talude; β_j : mergulho da descontinuidade; β_s : mergulho do talude. Fonte: Romana (1985).....	16
Tabela 2: Sistema SMR. Fonte: Adaptado de Romana (1996 <i>apud</i> Freitas 2011).....	16
Tabela 3: Síntese das famílias de fraturas	29
Tabela 4: Valores dos parâmetros da classificação geomecânica de Biewiawski, para as 30 zonas.....	36
Tabela 5: Notas obtidas pelo Índice de Diaclasmaneto Volumétrico para as 30 zonas.....	38
Tabela 6: Classificação SMR para as zonas de Classe IV pela classificação RMR. F_1 – Estabelece a relação entre a direção da descontinuidade e do plano do talude. F_2 – Depende do ângulo de mergulho da descontinuidade. F_3 – Depende da favorabilidade da relação entre o ângulo de mergulho da descontinuidade e do talude. F_4 – É definido a partir do método de desmonte utilizado.....	39

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Índice de Diaclasamento Volumétrico	13
Equação 2: Relação entre RQD e J_v para valores maiores que 4,5	14
Equação 3: Relação entre RQD e J_v para valores menores ou iguais à 4,5	14
Equação 4: Índice de Diaclasamento Volumétrico estimado bidimensionalmente	14
Equação 5: Sistema SMR	15

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS.....	3
2. REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1. GEOLOGIA DA ÁREA	5
2.2. MECÂNICA DAS ROCHAS	7
2.2.1. DESCONTINUIDADES.....	8
2.2.1.1. CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES.....	9
2.3. CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS	10
2.3.1. CLASSIFICAÇÃO DE BIENIAWSKI - SISTEMA RMR.....	11
2.3.2. ÍNDICE DE QUALIDADE DE ROCHA – SISTEMA RQD.....	13
2.3.3. CLASSIFICAÇÃO DE ROMANA – SISTEMA SMR	15
2.3.4. ANÁLISE CINEMÁTICA DE TALUDES	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1. DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	19
3.2. AQUISIÇÃO DE DADOS	20
3.2.1. AQUISIÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS ESTRUTURAIS	20
3.2.2. AQUISIÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS	20
3.2.3. AQUISIÇÃO DE DADOS TOPOGRÁFICOS.....	21
3.2.4. TRATAMENTO E PROCESSAMENTO DOS DADOS ADQUIRIDOS	23
3.2.5. ANÁLISE CINEMÁTICA DE ESTABILIDADE DOS TALUDES	24
4. RESULTADOS	25
4.1. PETROGRAFIA	25
4.2. APRESENTAÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS E SEU PROCESSAMENTO.....	25

4.3. FAMÍLIAS DE FRATURAS	29
4.4. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA – RMR	36
4.5. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA – SMR	38
4.6. ANÁLISE CINEMÁTICA	39
4.7. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL	42
5. DISCUSSÃO DOS DADOS	44
6. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	49
ANEXO I: Modelagem tridimensional das descontinuidades, em ordem: Deslizamentos planares das famílias B, E, G e J. Cunhas entre as famílias: G x C, J x I, E x J, J x B	52

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a mineração do estado do Paraná é conhecida, no contexto nacional, pela baixa ocorrência de minerais metálicos, fazendo com que haja, conseqüentemente, uma menor extração desse material, quando comparada a estados que dominam esse mercado. De acordo com o ITCG, entre os anos de 1989 e 1995, na Região Metropolitana de Curitiba foram declaradas 16 pedreiras em atividade, que em sua totalidade, produzem cerca de 250.000 metros cúbicos por mês (m³/mês) de pedra britada.

Mesmo que a lavra desses materiais não seja realizada num corpo específico; como é no caso da lavra de um veio aurífero, por exemplo, deve ser executada de forma técnica e organizada, visando uma maior efetividade no processo de produção e segurança dos funcionários que atuam no processo de extração. Estudos realizados por Candia et al. (2009), entre os anos de 2000 a 2008, no Peru, demonstram que 531 acidentes ocorreram em atividades mineiras, em que 194 estão relacionados à queda de rochas, correspondendo à 36,53% da totalidade dos acidentes em quase uma década. Mesmo que os índices de acidentes tenham diminuído gradativamente com o avanço planejado e técnico de minas a céu aberto, é necessário que o conhecimento de parâmetros geológicos, reológicos e estruturais da região seja priorizado e utilizado por um corpo técnico com o intuito de prevenir acidentes de trabalho.

A mina Morro Redondo, pertencente à mineração Guaricana, localiza-se em São José dos Pinhais - (PR) a cerca de 40 km do centro de Curitiba e possui fácil acesso via BR-376 no sentido Curitiba – Garuva. Existem duas estradas de terra principais que conectam a mina Morro Redondo à BR-376, localizadas antes e após o pedágio, em ambos os sentidos da via (Figura 1.1).

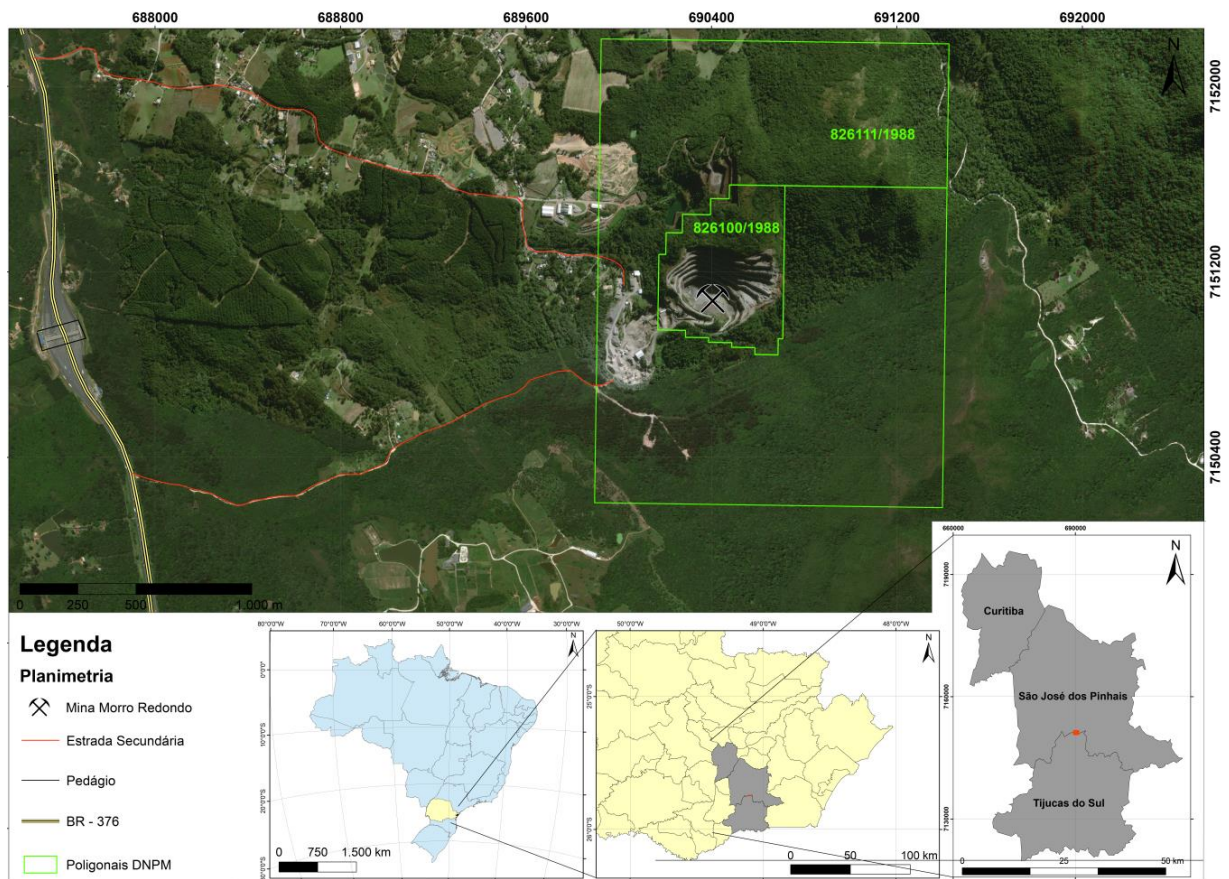


Figura 1.1: Figura de Localização da mina Morro Redondo (Fonte: Digital Globe WorldView-3).

A mineração Guaricana é detentora dos processos minerários 826100/1988, de 32,16 ha e 826111/1988 e 267,77 ha, ambos em fase de concessão de lavra desde 1988, atuando na extração de riolito para a comercialização como agregado. Todo o processo, incluindo a extração, beneficiamento, britagem e logística do material são realizados pela mineração, sendo esses efetuados por maquinário próprio nos arredores da mina. Desde o início da exploração dos riolitos na região, utiliza-se o método de *Open-Pit Mining*, setorizando a extração, de cima para baixo, por bancadas, porém, a partir de 2004, nota-se o avanço da progressão da lavra no sentido NE, priorizando a maior produtividade e extração nesse setor, assumindo um caráter de expansão horizontalizado (Figura 1.2). A adoção da expansão horizontal é uma consequência do nível freático elevado na porção mais basal da mina, evidenciado pelo início da aparição de corpos da água nessa região.

Entretanto, os limitadores geomorfológicos no setor nordeste impedem que a estratégia de expansão horizontal no avanço da lavra continue sendo adotada,

fazendo com que, ao progredir a extração nesse setor, uma nova direção de corte nos taludes deverá ser implantada nos próximos anos.

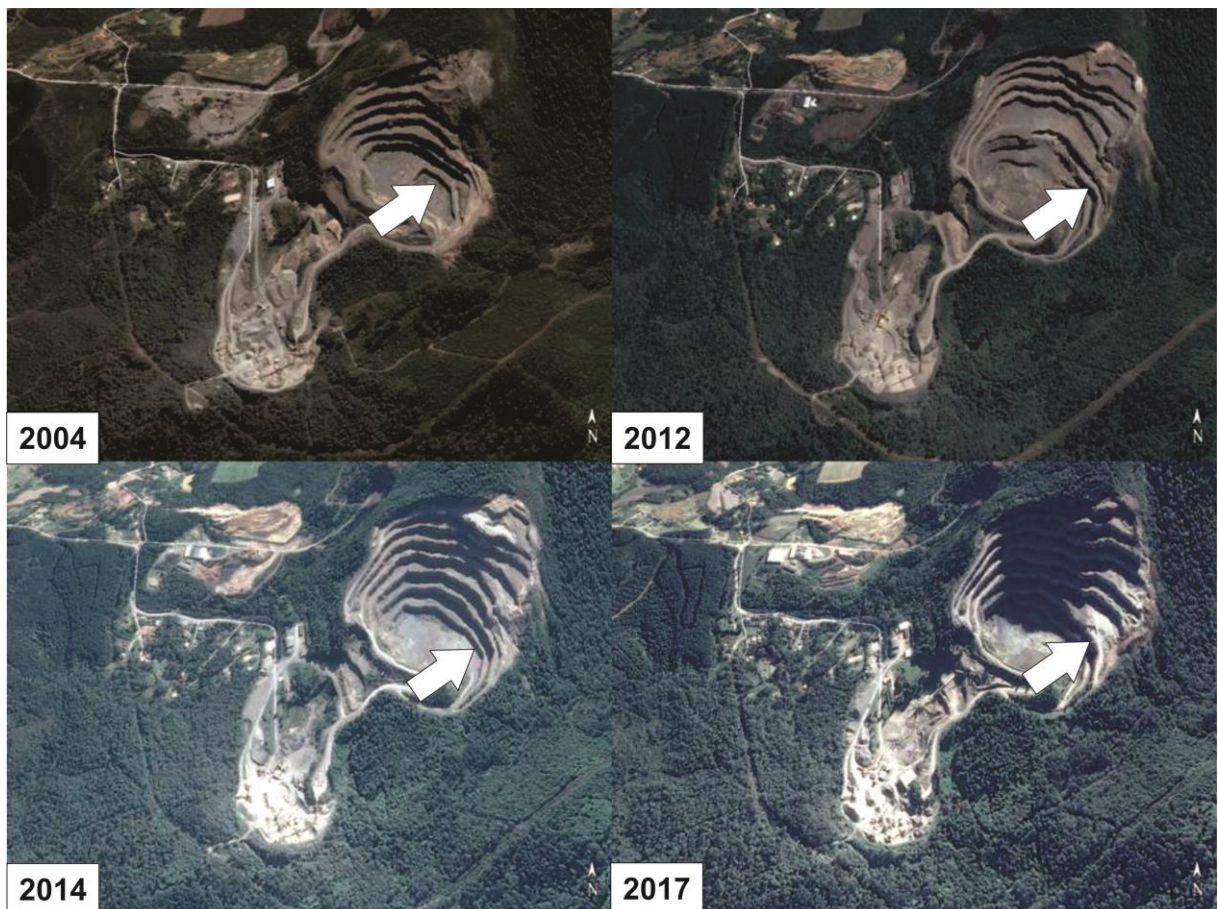


Figura 1.2: Imagens multitemporais mostrando a evolução das aberturas das bancadas na mina Morro Redondo. As setas brancas indicam o setor que possui maior avanço graças à extração do agregado. (Fonte: Google Earth).

1.1. OBJETIVOS

Considerando o exposto no tópico anterior, o objetivo geral deste trabalho consiste na avaliação geomecânica do maciço na mina Morro Redondo, visando o zoneamento das áreas que estarão mais susceptíveis à instabilizações na possível futura configuração da mina.

Mais especificamente, podem se destacar os seguintes objetivos:

- Mapeamento das descontinuidades para avaliação das características estruturais do maciço;

- Avaliação geomecânica via sistema RMR (*Rock Mass Rating*) e SMR (*Slope Mass Rating*) na atual configuração da mina, com o intuito de definir a qualidade mecânica do maciço para projetar e realizar previsões em relação às quais zonas estarão susceptíveis às instabilizações na configuração projetada;

- Modelagem tridimensional do maciço no setor nordeste da mina; bem como modelar as descontinuidades tridimensionalmente com o intuito de visualizar suas interseções adentro do maciço.

Este último objetivo específico busca elucidar como é a estruturação das principais descontinuidades e a conectividade entre elas, bem como a espacialização desses planos pode ser prejudicial à estabilidade dos taludes nas atuais configurações da mina e também na sua provável configuração futura. Para tal, o levantamento topográfico foi realizado via sistema RTK (*Real Time Kinematic*), obtendo a configuração mais atualizada do setor, uma vez que a alta dinamicidade no processo de extração proporciona alterações constantes nas direções dos taludes em cada bancada.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. GEOLOGIA DA ÁREA

A mina Morro Redondo encontra-se localizada na Bacia do Guaratubinha, com cerca de 200 km² e idades Neoproterozóicas de 604.6±8.6Ma, através da datação U-Pb via método SHRIMP (Siga Jr. et al. 2000). A formação da bacia está associada a um estágio pós-colisional do paleocontinente Gondwana, e que de acordo com Daitx (1979), encontra-se relacionada à tectônica transtrativa de direção NE-SW e distensão NW-SE, formando a atual disposição e a definindo como uma bacia de tipologia *Pull-Apart*, sendo que as interpretações quanto à tipologia são oriundas da análise da geometria romboédrica associadas às falhas de alto ângulo presentes pela extensão da bacia. Quanto à disposição estratigráfica, a mina Morro Redondo situa-se na interface das associações clástica grosseira e vulcânica ácida, como definida por Castro et al. (1993) (Figura 2.1).

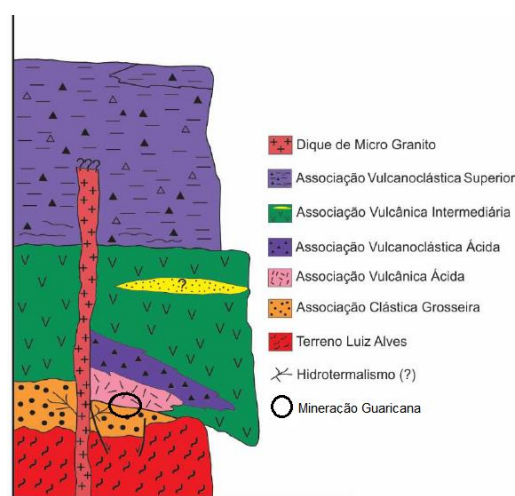


Figura 2.1: Sucessão estratigráfica da Bacia Guaratubinha. Fonte: Modificado de Castro (1993 *apud* Barão 2016).

A bacia do Guaratubinha é constituída por rochas sedimentares pelíticas, conglomerados, rochas vulcanoclásticas, rochas vulcânicas ácidas e intermediárias, como riolitos e andesitos, respectivamente (Fuck et al. 1967). A bacia encontra-se limitada, em quase toda sua extensão, por falhas e zonas cataclásticas, que assumem direções predominantemente NE, N-S e EW, estando inserida entre terrenos ígneos e metamórficos Arqueos e Neoproterozóicos. De acordo com Almeida (2010), o

evento distensional, formador da bacia Guaratubinha, também foi responsável pela formação de outras bacias que assumem a mesma direção de alongação NE-SW, como é o caso das bacias de Campo Alegre, Corupá, Camapuã, Itajaí e Castro.

A mina Morro Redondo localiza-se na porção centro-sudoeste da bacia, onde estão mapeadas três principais falhas, uma definida, de direção NW-SE, e duas aproximadas, de direção NW-SE e outra NE-SW, de acordo com o mapa disponibilizado pela MINEROPAR (2006) (Figura 2.2).

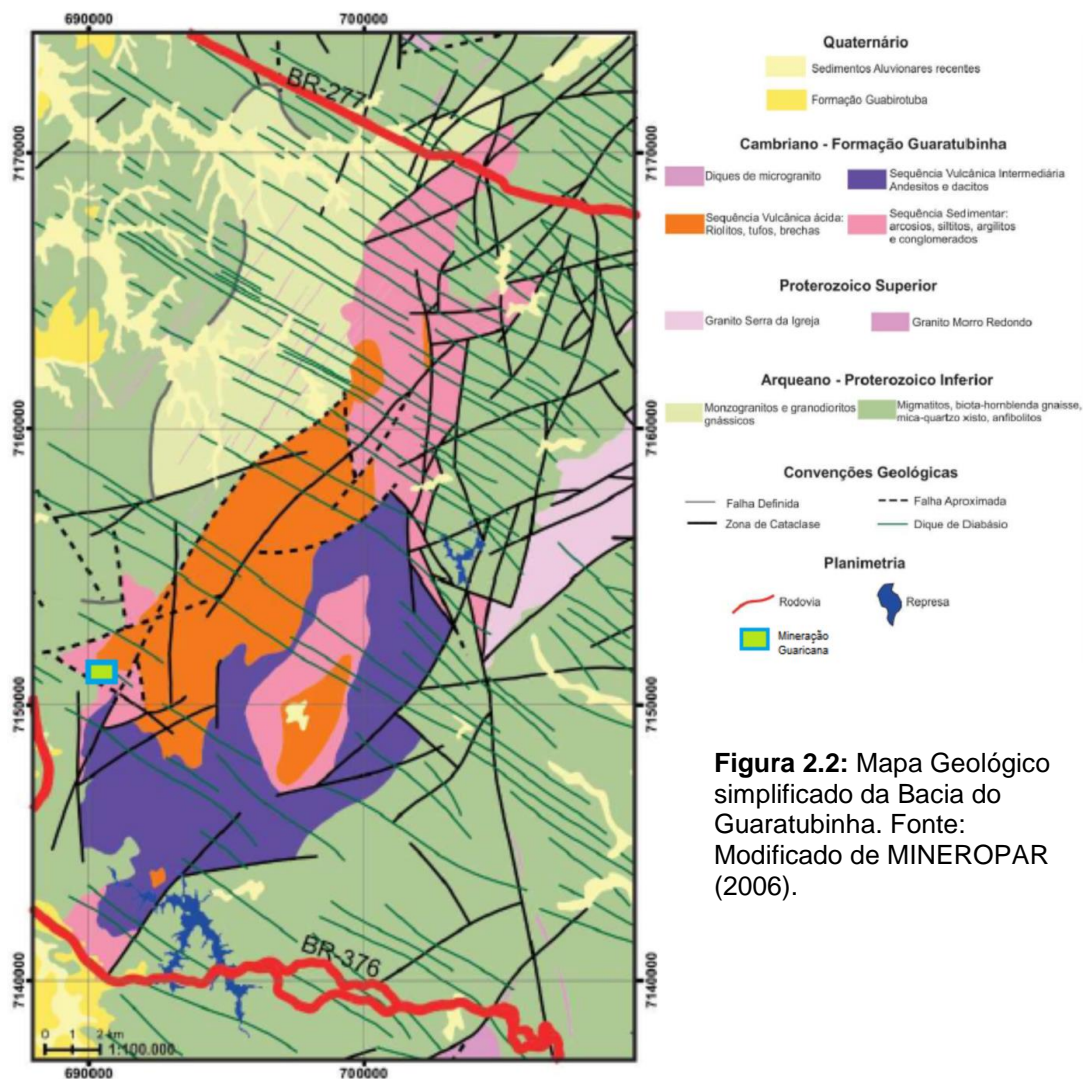


Figura 2.2: Mapa Geológico simplificado da Bacia do Guaratubinha. Fonte: Modificado de MINEROPAR (2006).

De acordo com Barão (2016), três eventos tectônicos foram os principais responsáveis pela atual conjuntura da bacia: o primeiro, oriundo de esforços NE-SW, causando a abertura da bacia e a nucleação de duas principais estruturas, a Falha Mestra Guaratubinha, a nordeste da bacia e a Zona de Cisalhamento Guaricana, a sudeste, ambas de direção N20-45E, formadas num contexto transtraccional. No

estágio final da evolução do primeiro evento, foram instaladas falhas transcorrentes concordantes às duas primeiras falhas. O segundo evento é caracterizado por falhas de cavalgamento de variadas direções, entre ENE-WSW, no início do Cambriano. O terceiro evento está relacionado à instalação de diques mesozoicos e falhas dextrais de direção N5-50W.

2.2. MECÂNICA DAS ROCHAS

O estudo do comportamento mecânico das rochas, na década de 1960, ganhou um grande enfoque nos cursos de engenharia, graças ao amplo avanço de obras superficiais e subterrâneas (Goodman, 1989), principalmente onde as rochas constituem a estrutura de sustentação da obra, como é o caso de túneis, taludes e galerias subterrâneas ou então como suportes de outras estruturas, como é o caso das fundações; e nos casos de utilização das rochas para a construção de outras estruturas, como aterros e etc. Judd (1964 *apud* Hoek 1981) define que a mecânica das rochas é a ciência teórica e aplicada relacionada à resposta da rocha frente aos campos de esforços do meio físico em que está inserida.

De acordo com Jaeger et al. (2007) o estudo da orientação e das propriedades das descontinuidades e o estudo das propriedades da matriz rochosa entre as descontinuidades estão sempre presentes nas investigações aplicadas aos setores de construção civil e mineração. Para Zhao et al. (2018), genericamente, as propriedades mecânicas das rochas referem-se às características de tensão e deformação a qual a massa rochosa está submetida; bem como as suas características de fraturamento, envolvendo características de resistência, deformação e estabilidade. As características intrínsecas da matriz rochosa (mineralogia, densidade, estrutura, textura, etc.) são compreendidos como os produtos gerados pelos processos geológicos e tectônicos deformacionais do corpo rochoso em seu estado atual, e que de acordo com Fiori e Carmignani (2009), afetam de forma significativa a resistência e a deformabilidade do material rochoso. Para Bell (1992), os estudos dos fatores intrínsecos são importantes para o entendimento do comportamento mecânico de uma rocha, mas planos de fraqueza presentes no maciço e o grau de alteração mineral são frequentemente mais importantes. As condicionantes extrínsecas (hidrogeologia, clima, ambiente, intemperismo e

alteração) são de suma importância nas obras de engenharia, uma vez que são capazes de modificar suas propriedades iniciais, transformando suas características resistivas e conseqüentemente gerando zonas comprometidas (Vallejo, 2002).

O estudo de um maciço rochoso envolve o entendimento e caracterização de propriedades geológicas, como: sua litologia e estratigrafia, estruturas geológicas, descontinuidades tectônicas ou diagenéticas, estudos de esforços *in situ* e etc. Para Fiori e Carmignani (2009), um maciço rochoso é uma massa de rocha interrompida por descontinuidades, constituídas por blocos discretos. Complementando tal conceituação, Gonçalves (2016) define o maciço rochoso como uma entidade constituída por duas parcelas: material-rocha e descontinuidades que o compartimentam, subentendendo, que o material-rocha é um meio sólido contínuo, isotrópico, homogêneo e elástico.

Nas obras de engenharia, o estudo das descontinuidades e estruturas geológicas é fundamental, uma vez essas estruturas pré-existentes, controlam os processos de deformação e ruptura, em que planos debilitados se manifestarão, podendo gerar uma condição patológica à obra, causando instabilizações e acidentes.

2.2.1. DESCONTINUIDADES

De acordo com Bell (2007), uma descontinuidade representa um plano de fraqueza presente num maciço rochoso em que o material rochoso é estruturalmente descontinuado. No âmbito da geologia e geologia aplicada a engenharia as descontinuidades caracterizam-se como falhas, estratificações, foliações, diaclases, xistosidades, contatos geológicos, etc.

As descontinuidades são estudadas com muita particularidade no âmbito da Geotecnia devido aos riscos que representam à execução e a implementação de um bom projeto de engenharia, uma vez que representam planos preferenciais de intemperização, fraturamento, alteração e permitem o fluxo de água. De acordo com Fiori (2015), na avaliação geotécnica, todos esses fatores acoplam-se e são os principais controladores da resistência e da deformabilidade de um maciço. Entretanto, a estabilidade de uma obra de engenharia, como por exemplo, num talude, depende de dois principais fatores, a orientação da descontinuidade frente à

orientação assumida pela obra e a resistência da descontinuidade (Vallejo, 2002) (Figura 2.3).



Figura 2.3: Orientação de uma descontinuidade desfavorável em relação à obra. Fonte: Vallejo (2002).

2.2.1.1. CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES

Distinguem-se, de acordo com Hudson (1997), nove fatores para a caracterização de uma descontinuidade, dentre eles: A orientação, o espaçamento, a continuidade, a rugosidade, a ondulação, a abertura, o preenchimento, as famílias de descontinuidades e o tamanho do bloco. A espacialização desses fatores encontra-se na Figura 2.4.

A orientação corresponde à espacialização de um plano no espaço, sendo constituído por uma direção geográfica e um ângulo de mergulho.

O espaçamento é caracterizado pela distância média perpendicular entre os planos de uma mesma família. A relação entre o espaçamento e a resistência do maciço é diretamente proporcional.

A continuidade diz respeito à extensão do plano de descontinuidade, conforme observado em afloramento.

A rugosidade e a ondulação contribuem para uma maior resistência ao cisalhamento. Representam uma medida da irregularidade relativa ao plano médio da descontinuidade. No presente trabalho, a categorização da rugosidade foi feita a partir da classificação de Barton e Choubey (1977).

A abertura representa a distância perpendicular que separam as paredes da descontinuidade quando não existe preenchimento. Variam de acordo com o grau de observação do maciço.

O preenchimento corresponde a todo material encontrado nas paredes da descontinuidade de natureza distinta à do maciço rochoso. A presença de preenchimento diminui consideravelmente a resistência de uma descontinuidade.

As famílias relacionam-se a um agrupamento das descontinuidades de acordo com sua orientação a partir da sua característica genética, adensando descontinuidades de acordo com suas relações de paralelismo ou subparalelismo.

O tamanho do bloco depende de todas as características apresentadas acima. Em escavações e fundações é de suma importância ter o tamanho e a distribuição de cada bloco estimados.

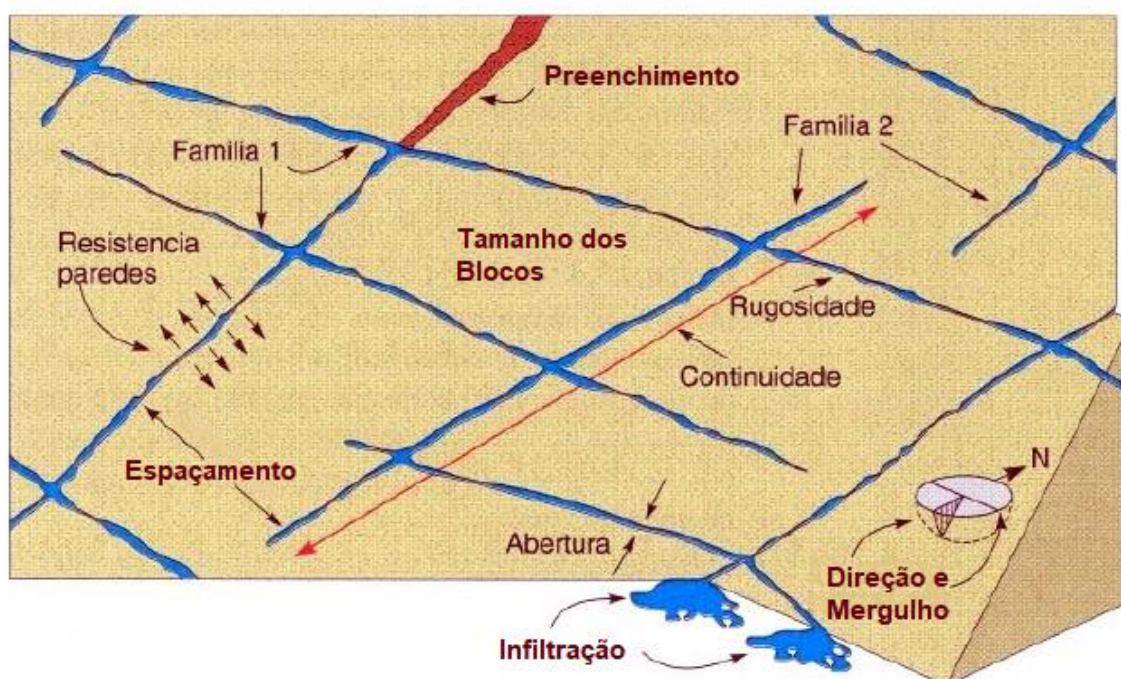


Figura 2.4: Representação esquemática das propriedades das descontinuidades. Fonte: Adaptado de Hudson (1989 *apud* Vallejo 2002).

2.3. CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS

As classificações geomecânicas buscam a categorização e qualificação de um maciço rochoso através de diversos parâmetros que definam as propriedades mecânicas da rocha em questão. Para a simplificação, são atribuídos valores numéricos ponderados a esses parâmetros, que elucidam e padronizam sua utilização. Mesmo que tenham sido idealizadas como propostas de contenção em subsuperfície, como é o caso de túneis e escavações, atualmente possuem uma vasta

gama de aplicações em atividades mineiras de superfície e também no planejamento e construção de estradas.

Para uma classificação mais prática e sucinta, serão abordados os sistemas RMR (*Rock Mass Rating*), proposto por Bieniawski (1974), e o SMR (*Slope Mass Rating*), proposto por Romana (1985).

2.3.1. CLASSIFICAÇÃO DE BIENIAWSKI - SISTEMA RMR

O Sistema RMR, proposto com o intuito de aplicação em túneis e obras subterrâneas, baseia-se na caracterização de seis parâmetros geológicos e geotécnicos, que assumem diferentes notas ponderadas e quando somadas caracterizam o comportamento mecânico do maciço rochoso, refletindo a sua qualidade geotécnica. São eles: resistência à compressão uniaxial; Índice de Qualidade de Rocha (RQD), proposto por Deere (1964); padrão das descontinuidades (persistência, abertura, rugosidade, resistência do preenchimento e alteração); espaçamento das descontinuidades; presença da água e orientação das descontinuidades; fator de correção relacionando a orientação e mergulho das principais descontinuidades ao tipo da obra e ao corte (Figura 2.5). Quanto às características das descontinuidades, Bieniawski (1989) sugere níveis de classificação para cada parâmetro, em que cada um desses níveis assume uma determinada nota, conforme consta no item E da Figura 2.5. A partir da qualificação do maciço, e com os referidos parâmetros calculados, obtêm-se três importantes informações sobre a classe do maciço, como: o tempo de sustentação médio, a coesão da massa rochosa (kPa) e o ângulo de atrito interno (em graus); conforme consta no item D da Figura 2.5.

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, descontínuas, 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 e minas	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		I	II	III	IV	V			
Descrição		Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito Pobre			
D- Significado das classes de maciços									
Classe		I	II	III	IV	V			
Tempo de Sustentação 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			

E - Guia de determinação do padrão das descontinuidades						
Característica		Valores				
4	Persistência (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	>20
	Peso	6	4	2	1	0
	Abertura (mm)	Sem Abertura	< 0,1	0,1 a 1	1 a 5	> 5
	Peso	6	5	4	1	0
	Rugosidade	Muito Rugosa	Rugosa	Pouco Rugosa	Lisa	Superfície com Estrias
	Peso	6	5	3	1	0
	Resistência do preenchimento/Espessura (mm)	Sem Preenchimento	Duro / < 5	Duro / > 5	Mole / < 5	Mole / < 5
	Peso	6	4	2	2	0
	Alteração/Intemperismo	Inalterada	Levemente Alterada	Moderadamente Alterada	Fortemente Alterada	Decomposta
	Peso	6	5	3	1	0

Figura 2.5: Classificação Geomânica de Bieniawski. Fonte: Traduzido de Bieniawski (1989).

2.3.2. ÍNDICE DE QUALIDADE DE ROCHA – SISTEMA RQD

Proposto por Deere (1964), o sistema RQD surge com o intuito de fornecer uma medida qualitativa referente a qualidade de um maciço rochoso *in situ*. O RQD analisa o grau de fraturamento de um maciço rochoso e é utilizado como componente constituinte do cálculo no sistema RMR. Comumente, o RQD é estimado via testemunhos de sondagens. Todavia, quando não há testemunhos disponíveis para a avaliação, utiliza-se o Índice de Diaclasamento Volumétrico (J_v), proposto por Palmstrom (1975), que em escala de afloramento, é utilizado como parâmetro visual, que corresponde à contagem do número total de fraturas por metro cúbico. Para o cálculo do J_v utiliza-se a seguinte equação:

Equação 1: Índice de Diaclasamento Volumétrico.

$$J_v = \frac{1}{\sum_{i=1}^n Esp(i)}$$

Em que:

J_v – Índice de Diaclasamento Volumétrico;

n – número de descontinuidades;

Esp(i) – espaçamento.

Em 1975, Palmstrom propôs que através de uma expressão, o valor RQD pode ser calculado a partir do J_v , em que:

Equação 2: Relação entre RQD J_v maiores que 4.5.

$$RQD = 115 - 3.3 \times J_v \rightarrow J_v > 4.5$$

Equação 3: Relação entre RQD J_v menores ou iguais à 4.5.

$$RQD = 100 \leftrightarrow J_v \leq 4.5$$

Em que:

RQD – Índice de Qualidade de Rocha;

J_v – Índice de Diaclasamento Volumétrico.

De acordo com Vallejo (2002), frente à dificuldade de observar as descontinuidades tridimensionalmente, sugere-se que o valor J_v pode ser estimado a partir da quantidade de descontinuidades de cada família que interceptam um determinado comprimento, medido perpendicularmente à direção de cada uma das famílias. Em que se obtém:

Equação 4: Índice de Diaclasamento Volumétrico estimado bidimensionalmente.

$$J_v = \sum \frac{J_n}{L} \mid \frac{J_1}{L} + \frac{J_2}{L} + \frac{J_3}{L} \dots \frac{J_{n+1}}{L}$$

Em que:

J_v - Índice de Diaclasamento Volumétrico;

J_n - número de descontinuidades por família;

J_1 - Número de descontinuidades da família 1;

J_2 - Número de descontinuidades da família 2;

J_3 - Número de descontinuidades da família 3;

L - Comprimento de observação.

2.3.3. CLASSIFICAÇÃO DE ROMANA – SISTEMA SMR

O sistema SMR surge como uma complementação ao sistema RMR, com o propósito de gerar previsões de instabilidade de taludes e propor medidas de contenção para cada tipo de instabilização. O SMR conta com a adição de quatro subfatores, que atuam como fatores de correção, sendo três deles dependentes da orientação e atitude das descontinuidades e um relacionado ao método de escavação ou desmonte utilizado (Freitas, 2011). Os subfatores possuem valores fixos atribuídos a cada um e dependem da disposição e relação entre os componentes de cada parâmetro. A classificação pelo sistema SMR é expresso pela seguinte equação:

Equação 5: Sistema SMR.

$$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

Em que:

RMR - *Rock Mass Rating*;

F₁ - Estabelece a relação angular entre a direção da descontinuidade e do plano do talude;

F₂ - Depende do exclusivamente do ângulo de mergulho da descontinuidade;

F₃ - Depende da favorabilidade da relação entre o ângulo de mergulho da descontinuidade e do talude;

F₄ - É definido a partir do método de desmonte ou escavação utilizado.

Obtém-se a nota final classificatória no sistema SMR a partir de níveis predefinidos para cada uma das condições, assim como no RMR, porém avaliando diferentes critérios, conforme são demonstrados por F₁, F₂, F₃ e F₄. A avaliação sugerida por Romana (1985) encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1: Critérios avaliativos dos subfatores do Sistema SMR. α_j : direção da descontinuidade; α_s : direção do talude; β_j : mergulho da descontinuidade; β_s : mergulho do talude. Fonte: Romana (1985).

Fator	Situação	Muito Favorável	Favorável	Normal	Desfavorável	Muito Desfavorável	
F1	P	$\alpha_j - \alpha_s$					
	T	$\alpha_j - \alpha_s - 180$	> 30	20 - 30	10 - 20	5 - 10	< 5
	VALOR		0,15	0,4	0,7	0,85	1
F2	Ruptura Plana (β_j)		< 20	20 - 30	30 - 35	35 - 45	> 45
	VALOR (Ruptura Plana)		0,15	0,4	0,7	0,85	1
	VALOR (Tombamento)		1	1	1	1	1
F3	Ruptura plana ($\beta_j - \beta_s$)		> 10°	10° - 0°	0	0 - (-10°)	< (-10°)
	Tombamento ($\beta_j + \beta_s$)		< 110°	110° - 120°	> 120°	-	-
	VALOR		0	-6	-25	-50	-60

A partir dos resultados calculados com base na Tabela 1 e na formulação sugerida por Romana (1985) obtém-se o resultado classificatório para o maciço rochoso, em que são atingidas notas e divisões quanto aos parâmetros: Descritivos, de estabilidade, de ruptura e de tratamento; conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Sistema SMR. Fonte: Adaptado de Romana (1996 *apud* Freitas 2011).

Classe	V	IV	III	II	I
Coesão (MPa)	< 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,3	0,3 – 0,4	0,4
Ângulo de Atrito	15	15 – 25	25 – 35	35 – 45	> 45
SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Descrição	Muito Ruim	Ruim	Normal	Boa	Muito Boa

Estabilidade	Totalmente Instável	Instável	Parcialmente Instável	Estável	Totalmente Estável
Ruptura	Grandes rupturas por planos contínuos	Grandes rupturas planares ou em cunha	Algumas rupturas planares e muitas cunhas	Alguns Blocos	Nenhuma
Tratamento	Retaludamento	Correção	Sistemático	Ocasional	Nenhum

2.3.4. ANÁLISE CINEMÁTICA DE TALUDES

Os métodos de análise cinemática baseiam-se na condição geométrica assumida para que um bloco rochoso se movimente ao longo de uma descontinuidade, sem que nenhuma força seja diretamente responsável pelo deslizamento (Raguvanshi, 2017). Caracterizada como puramente geométrica, a análise determina quais modelos de deslizamentos em taludes são possíveis em um maciço rochoso, uma vez que a relação angular entre as descontinuidades presentes e a direção da face do talude são aplicadas para a determinação de possíveis deslizamentos (Kliche 1999 *apud* Yoon et al. 2002).

Proposto inicialmente por Markland (1972) e refinado por Hocking (1976), o método convencional de análise cinemática envolve a utilização de parâmetros que englobam a plotagem de grandes círculos via rede estereográfica, relacionados aos planos de descontinuidades mais representativos num talude; a plotagem da face do talude e também a plotagem de um círculo, a partir do centro da rede estereográfica, correspondente ao ângulo de atrito interno. A zona demarcada entre a face do talude e o círculo de atrito interno delimitará a zona potencial ao deslizamento (Figura 2.6).

A análise para o deslizamento planar é realizada a partir do rumo de mergulho de cada plano, uma vez que, o rumo esteja projetado entre os limites dessa zona, este representará um potencial deslizamento. A análise para deslizamentos em cunha é realizada a partir da linha de interseção projetada entre dois planos, em que, se o ponto de interseção estiver inserido na zona potencial de deslizamento, o deslizamento possivelmente ocorrerá ao longo da direção da linha projetada

perpendicularmente à interseção. A Figura 2.7 exemplifica os deslizamentos planares e em cunha.

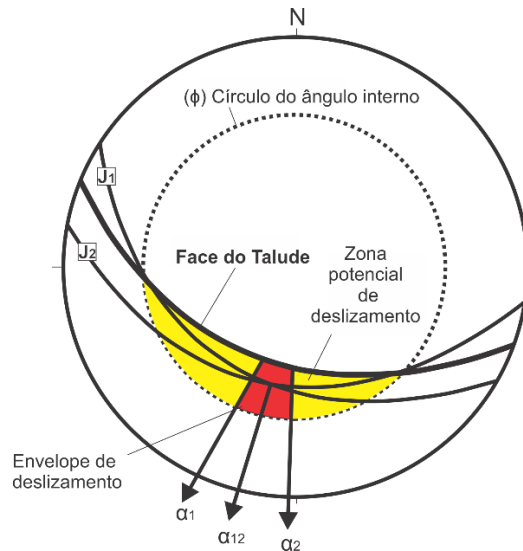


Figura 2.6: Figura esquemática exemplificando os elementos de plotagem estereográfica para a análise cinemática. α_1 : Rumo de mergulho da Família 1 (J_1); α_2 : Rumo de mergulho da Família 2 (J_2); α_{12} : Direção da linha de interseção. Fonte: Modificado de Raghuvanshi (2017).

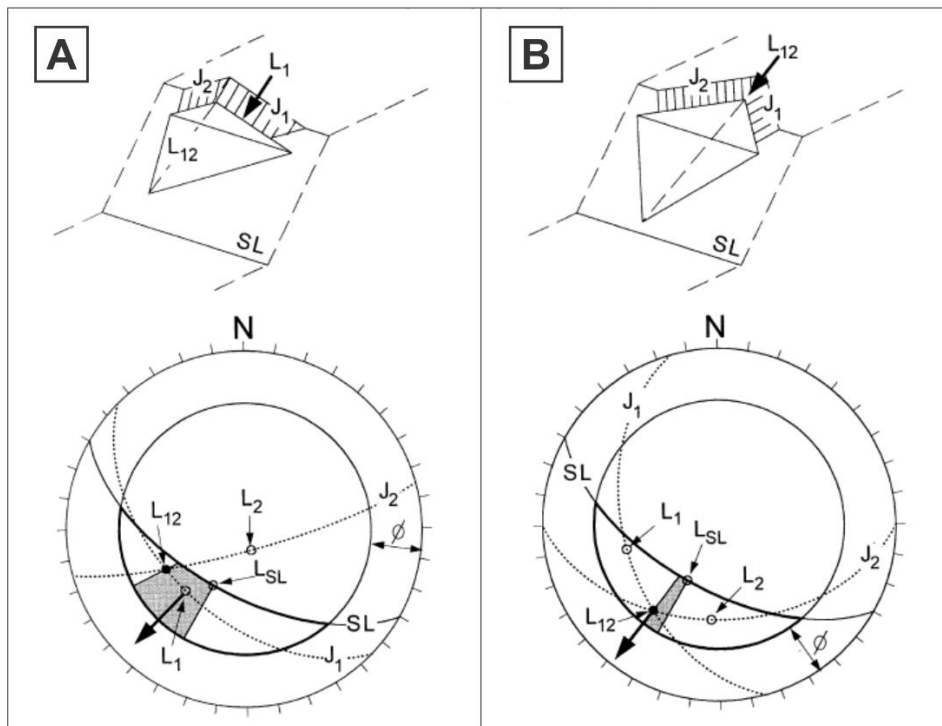


Figura 2.7: Exemplos de deslizamentos planares e em cunha. A) Demonstração de um deslizamento planar juntamente à sua projeção estereográfica. B) Deslizamento em cunha, juntamente à sua projeção estereográfica. L_1 : Rumo de mergulho da família J_1 . L_{12} : Direção da linha de interseção entre as famílias J_1 e J_2 . Fonte: Adaptado de Hocking (1976 *apud* Yoon et al. 2002).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi embasado no aprofundamento no tema por meio de pesquisas às referências bibliográficas de base e de maior enfoque na classificação geomecânica de maciços rochosos e estabilidade de taludes. A classificação geomecânica do maciço foi realizada por meio dos sistemas RMR e SMR, visando definir o comportamento mecânico do maciço e identificar zonas de susceptibilidade à instabilizações do maciço rochoso da mina que está em franco avanço no setor nordeste. Nota-se uma clara diferenciação do setor nordeste com o restante da mina pela coloração do maciço, em que a coloração mais clara, corresponde à rocha exposta há um menor período de tempo (Figura 3.1).

O método de trabalho envolve as etapas de aquisição, processamento e interpretação dos dados coletados, que serão descritas nos itens a seguir.



Figura 3.1: Setor Nordeste da mina Morro Redondo. A) Fotografia do setor nordeste. B) Imagem esquemática evidenciando a diferenciação da coloração do setor nordeste com o restante da mina.

3.1. DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A seleção da área de estudo embasou-se na demanda de produtividade do setor operacional da mina Morro Redondo, uma vez que os planos de expansão e continuidade da produção, em longo prazo, estão restritos ao setor nordeste da mina. Desta forma, as quatro bancadas superiores foram escolhidas para o presente trabalho, uma vez que os projetos de expansão serão realizados de cima para baixo. Ao longo das quatro bancadas, foram analisados e descritos 635 metros de rocha

aflorante. As bancadas apresentam altura variável entre 11 m e 14 m. A altura da bancada foi definida com auxílio do levantamento topográfico via RTK.

3.2. AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição dos dados estruturais, geotécnicos e topográficos foi realizada por meio de quatro saídas de campo, com o intuito de identificar, classificar e descrever as discontinuidades presentes no setor nordeste da mina Morro Redondo, bem como observar características referentes ao maciço rochoso e contou com o auxílio de diferentes equipamentos. Na quarta saída, além do mapeamento estrutural, dedicou-se meio período para a realização do levantamento topográfico via sistema RTK, realizado nas quatro bancadas superiores, objeto de estudo deste trabalho. O processamento foi realizado via organização dos dados estruturais, produção de estereogramas e modelagem tridimensional em etapas.

3.2.1. AQUISIÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS ESTRUTURAIS

A aquisição das atitudes das estruturas geológicas foi realizada majoritariamente por bússolas do tipo Clar e Brunton. Além dos métodos convencionais, a aquisição digital foi realizada via *FieldMove Clino*, um aplicativo que registra atitudes estruturais ao posicionar o *smartphone* paralelo à estrutura que se pretende medir. A utilização deste aplicativo depende apenas de um *smartphone* composto por giroscópio, acelerômetro e GPS (*Global Positioning System*); e proporciona uma abordagem mais prática no manejo de um banco de dados com um grande número de informações. Entretanto, o aplicativo apresentou limitações quanto à tomada de atitude de estruturas de alto ângulo, sendo utilizado, nesse caso, apenas como GPS; uma vez que os pontos cotados assumem coordenadas geográficas georreferenciadas, contendo um raio de imprecisão de acordo com o GPS acoplado ao *smartphone*.

3.2.2. AQUISIÇÃO DE DADOS GEOTÉCNICOS

A aquisição dos dados geotécnicos, referentes aos parâmetros intrínsecos e extrínsecos do maciço rochoso e das discontinuidades presentes, baseia-se na

descrição de determinadas características do maciço rochoso e das discontinuidades presentes ao longo de um caminhamento nas bancadas visando obter-se a classificação geomecânica do maciço para um espaçamento pré-determinado. O espaçamento foi determinado a partir da contagem por passos, realizado por uma única pessoa, em que a amplitude de cada passo foi medida como sendo aproximadamente 70 cm, arbitrando-se 30 passos para cada sub-divisão ou zona. O comprimento obtido para cada zona variou entre 17 m e 23 m, conforme pode ser constatado posteriormente com base nas coordenadas obtidas dos pontos. A configuração obtida a partir da aplicação do caminhamento, arranjada em ordem crescente numérica, encontra-se na Figura 3.2. A análise das quatro bancadas, para a realização da classificação geomecânica, foi fragmentada em trinta zonas, cada qual com sua respectiva classificação.

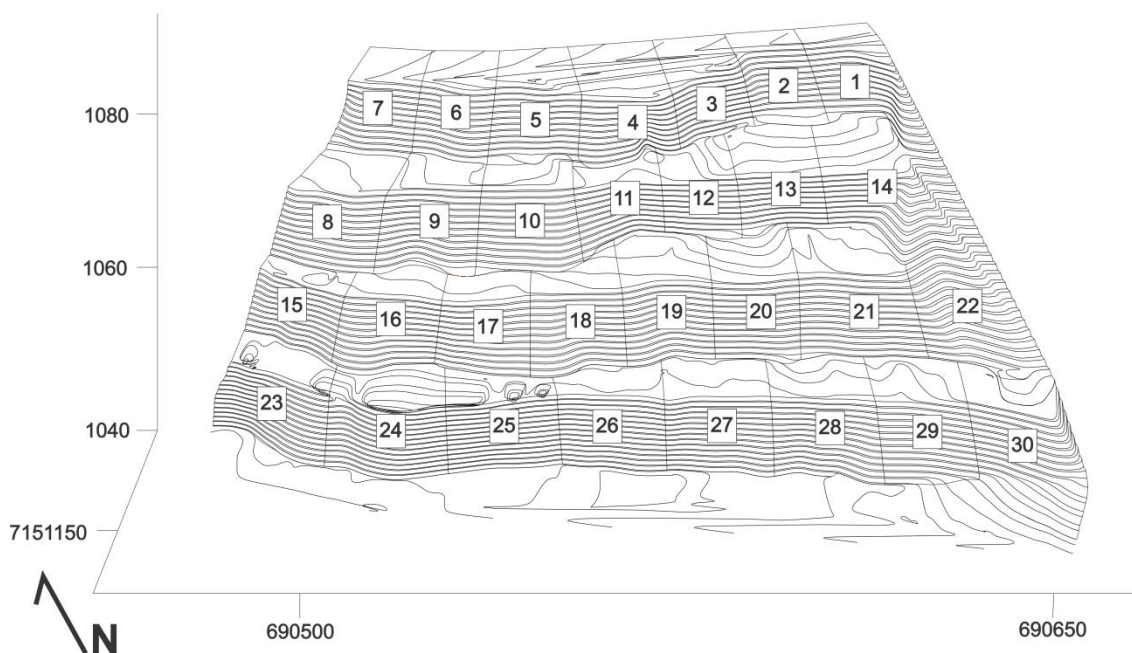


Figura 3.2: Zoneamento das bancadas estudadas no setor nordeste da mina Morro Redondo.

3.2.3. AQUISIÇÃO DE DADOS TOPOGRÁFICOS

O propósito do levantamento topográfico é obter a configuração mais atualizada da mina para a geração do modelo digital de terreno (MDT), uma vez que sua geometria é constantemente alterada com a evolução do aproveitamento do maciço. O levantamento topográfico foi realizado em escala de detalhe por meio da utilização de um GPS de alta precisão via sistema RTK. O funcionamento do sistema

RTK baseia-se na conectividade entre o aparelho e satélites de posicionamento, que atuam de maneira diferenciada ao GNSS (*Global Navigation Satellite System*), configurando uma rede trigonal de informações (Figura 3.3).

O sistema RTK possui uma variada gama de conectividade e métodos de posicionamento, sendo, no presente estudo, integralmente aplicado o método via UHF (*Ultra High Frequency*). Esse método utiliza a implantação de antenas a uma estação base e ao *rover*, que se comunicam via ondas de rádio. O método possui uma limitação quanto à conectividade, uma vez que ambos os receptores precisam estabelecer uma conexão direta entre si, sem a interferência do meio.

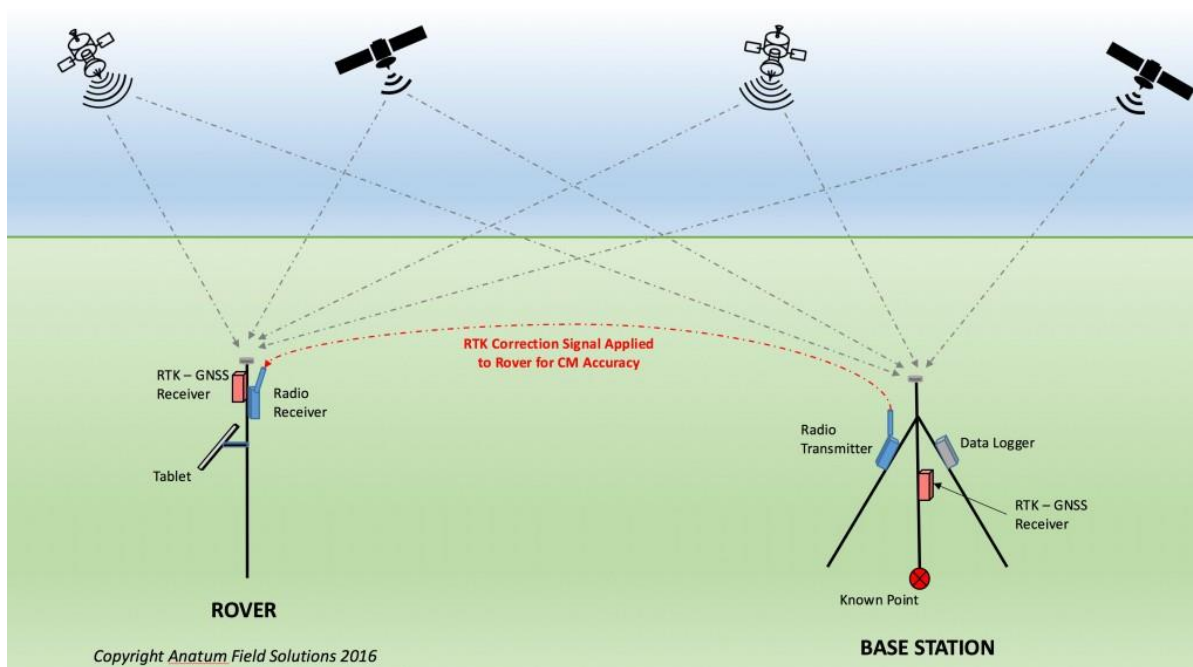


Figura 3.3: Relação trigonal de funcionamento do Sistema RTK. Fonte: Disponível em: https://www.anatumfieldsolutions.com/RTK-GPS-Explained_b_6.html.

O equipamento RTK utilizado para o levantamento foi o *Stonex S8 Plus*, disponibilizado pelo Laboratório de Estudos Costeiros da UFPR (LECOST) e é composto por duas redes receptoras, que são configuradas em campo como base e *rover*. A base é alocada como um ponto estático e caracteriza-se como o receptor do sinal do satélite, armazenando sua localização em tempo real em relação ao satélite. Na sua instalação, um tripé é utilizado e sua altura em relação ao nível do terreno é medida, assegurando a confiabilidade das informações adquiridas via satélite. O *rover* possui conectividade com a base e é com ele que o levantamento, via caminhamento, é realizado. Para sua utilização, um bastão composto de um nível é acoplado. A

configuração do equipamento, aquisição e manejo dos dados é toda programada numa estação de mídia móvel, denominada como coletora. A composição do equipamento utilizado e um registro fotográfico do posicionamento do *rover* no momento da aquisição encontram-se na Figura 3.4.



Figura 3.4: Composição do GPS RTK Stonex S8 Plus e sua utilização. A) Base do RTK instalada, medida e nivelada em relação ao terreno. B) Rover do RTK, acoplado a um bastão com nível. C) Estação coletora. D) Caminhamento na base de um talude.

Para a aquisição de dados, foi realizado o caminhamento nas cristas e nas bases dos taludes de cada bancada, via método *Stop and Go* ou semicinemático. O método baseia-se na coleta automática de pontos durante um determinado caminhamento, em que o espaçamento entre cada ponto é definido previamente.

3.2.4. TRATAMENTO E PROCESSAMENTO DOS DADOS ADQUIRIDOS

O tratamento e a análise dos dados estruturais foram fundamentados na organização análise via estereogramas, com enfoque na rede de Schmidt-Lambert. Estas análises facilitaram a subdivisão dos dados em famílias de fratura com padrões definidos. Posteriormente as informações sobre as características geotécnicas das descontinuidades foram analisadas para cada uma das famílias, de acordo com o

método de classificação geomecânica RMR de Bieniawski. A classificação geomecânica SMR foi utilizada exclusivamente para as zonas que obtiveram uma nota equivalente a Classe IV pela classificação RMR.

A modelagem tridimensional do terreno foi efetuada em três etapas:

A primeira, caracterizada pela geração de curvas de nível a partir dos pontos cotados via RTK, em plataforma GIS (*Geographic Information System*); a segunda, foi realizada pela importação e tratamento em plataforma CAD (*Computer Aided Design*); e a última, que engloba a modelagem tridimensional do setor nordeste da mina Morro Redondo no *software SketchUp*.

A modelagem e vetorização dos planos das discontinuidades foram realizadas em duas etapas que compreendem, em um primeiro momento, a utilização da plataforma GIS, correlacionando e interpolando os pontos cotados, via *FieldMove Clino*, obtendo retas como produtos; e num segundo momento, onde as retas foram retrabalhadas e especializadas tridimensionalmente, assumindo a configuração proposta nesse trabalho.

3.2.5. ANÁLISE CINEMÁTICA DE ESTABILIDADE DOS TALUDES

Para análise cinemática, o *software Dips* foi utilizado. Seu funcionamento envolve basicamente a inserção das atitudes estruturais das discontinuidades, a direção da face do talude em questão e também o ângulo de atrito estimado para o trecho em análise. A análise das medidas obtidas foi realizada para cada família de fratura presente na região onde estima-se que o talude adote uma nova direção. A definição da direção projetada dos taludes é estimada para um avanço contínuo da lavra, em que foi adotado 25° de diferença em relação à direção atual. O ângulo de atrito foi estimado a partir das notas obtidas pela classificação geomecânica de Bieniawski. Foram realizadas análises para deslizamentos planares e em cunha exclusivamente na configuração projetada do setor nordeste.

4. RESULTADOS

4.1. PETROGRAFIA

Todo o setor nordeste da mina Morro Redondo é constituído exclusivamente por riolito, salvo a porção mais basal, que pode estar em contato com os conglomerados da associação clástica grosseira, como é notado nas proximidades da entrada da mina Morro Redondo. A classificação modal foi realizada apenas em macroescala. O riolito possui coloração rosa claro, granulação variando de muito fina a fina e é constituído por 40% de Quartzo, 55% de Feldspato Alcalino e 5% de Plagioclásio. Possui estrutura maciça e textura fanerítica fina. Ocasionalmente, em afloramento, visualizam-se veios de quartzo de até 2 cm de espessura e também distingue-se fraturas preenchidas por Calcita e Fluorita. Encontram-se poucas alterações em macroescala, exceto nas regiões próximas às zonas de fratura, em que pode haver percolação de água alterando a matriz da rocha. (Figura 4.1)



Figura 4.1: Amostra macroscópica do riolito da mina Morro Redondo.

4.2. APRESENTAÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS E SEU PROCESSAMENTO

Ao todo, 244 medidas foram utilizadas para a organização e definição de 10 famílias de fraturas. A análise e organização das atitudes estruturais, surgiu frente à

necessidade de classificar e subdividir, em famílias de fraturas, a densa quantidade de dados obtidos em campo.

A Figura 4.2 apresenta como as etapas de classificação e reclassificação ocorreram a partir dos dados obtidos em campo.



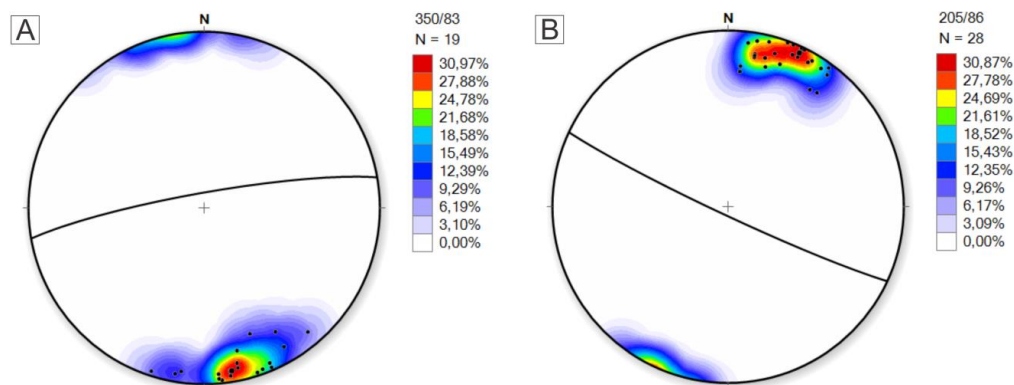
Figura 4.2: Fluxograma referente às fases de classificação adotadas para a separação de famílias de fraturas a partir das medidas de campo. Exemplificação referente a duas famílias visualizadas na zona 26, localizada na 4ª bancada.

Numa primeira fase, o tratamento dos dados ocorreu com a transcrição dos dados anotados em caderneta, até a referida data, para uma plataforma digital de planilhas. Numa tentativa inicial de subdivisão das informações estruturais, o conjunto

de dados foi classificado exclusivamente pela sua atitude estrutural (direção geográfica e ângulo de mergulho), por meio de médias aritméticas entre elas, em que foram obtidas 20 famílias de fraturas.

Numa segunda fase, houve a reclassificação das 20 famílias de fraturas obtidas, a partir do seu plano máximo, obtidos dos estereogramas da rede de Schmidt-Lambert e também quanto às características descritivas das discontinuidades por ponto anotado. A análise visual dos planos máximos obtidos tornou possível a redução na quantidade total de famílias de fratura, uma vez que os planos que se dispuseram com uma determinada proximidade puderam ser reclassificados como pertencentes a uma mesma família. A quantidade total de famílias de fraturas passou de 20 para 10. As características referentes às discontinuidades enaltecem a classificação de apenas 10 famílias de fratura, uma vez que a similaridade das características constituintes de cada uma corrobora para a atual classificação.

Foram construídos diagramas que representam graficamente a disposição de cada família de fratura, em que são apresentados os planos máximos e a distribuição dos polos para cada família em conjunto com o contorno obtido. A atitude apresentada na legenda representa a atitude do plano máximo da respectiva família em um determinado estereograma. O “N” representa a quantidade de dados agrupados nessa mesma família (Figura 4.3).



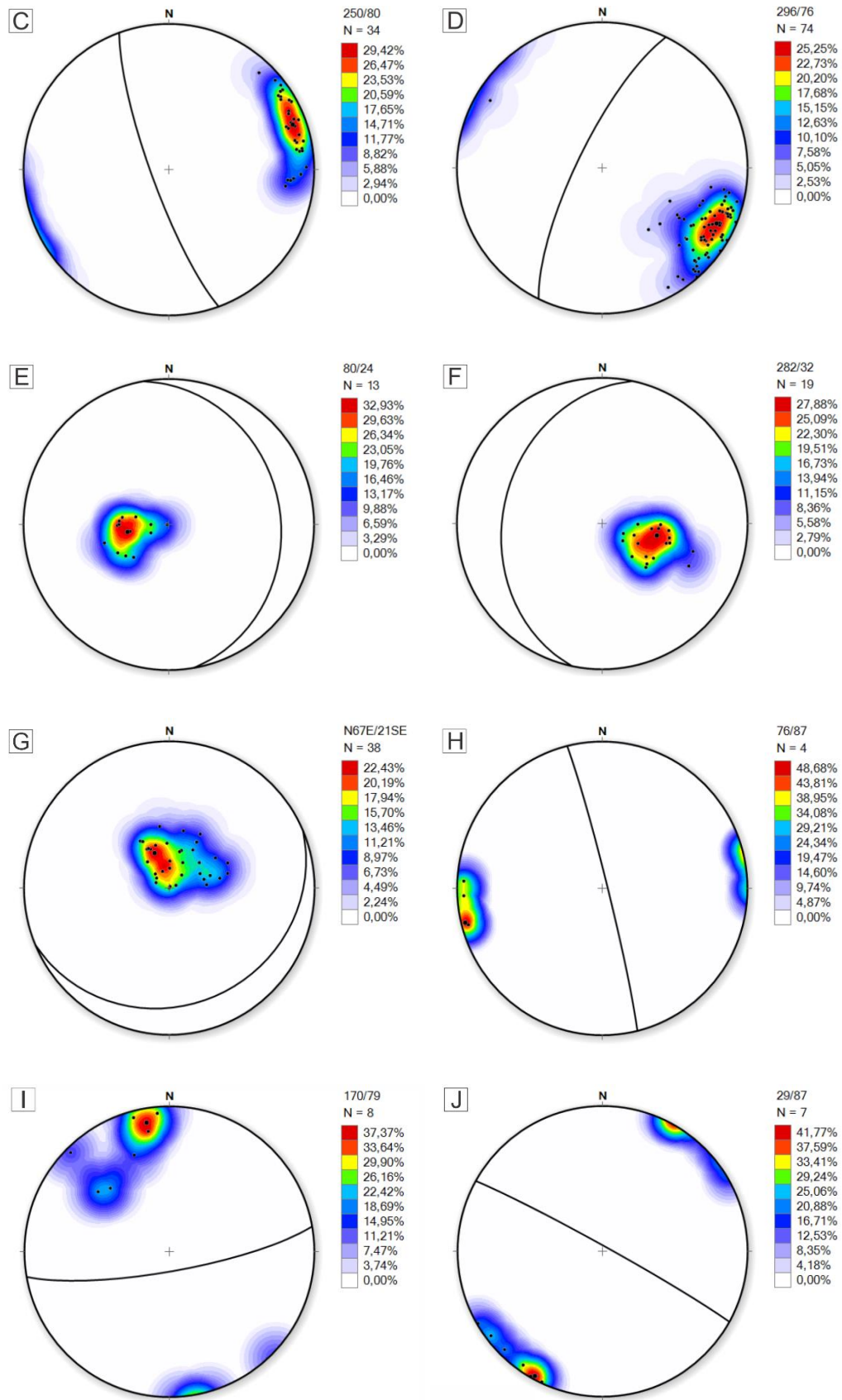


Figura 4.3: Estereogramas das famílias de fraturas classificadas.

4.3. FAMÍLIAS DE FRATURAS

Foram descritas e classificadas 10 famílias de fraturas, ao longo das quatro bancadas, a partir de parâmetros descritivos, como: atitude estrutural, espaçamento, continuidade, grau de alteração, preenchimento, ondulação, rugosidade da parede, abertura e presença ou ausência de água.

Durante o levantamento constatou-se que o maciço possui alto grau de fraturamento em toda sua extensão, caracterizado e determinado pelo espaçamento entre as 10 famílias presentes. A síntese destes dados encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3: Síntese das famílias de fraturas.

Família	Plano Máximo	Espaçamento	Continuidade	Alteração e Preenchimento	Ondulação e Rugosidade	Abertura	Água
A	350/83	40 cm	10 – 20 m	Média Alteração	Lisa Plana	0 – 2 mm	Molhada - Pingando
B	205/86	1 - 2 m	10 – 20 m	Alteração Localizada, Preenchimento Localizado > 5mm	Polida Escalonada	Ausente	Ausente
C	250/80	60 cm	10 – 20 m	Sem Alteração	Lisa Ondulada	0 – 2 mm	Ausente
D	296/76	30 cm	10 – 20 m	Alto Grau de Alteração/Zonas de Cisalhamento	Lisa Ondulada	0 – 10 mm	Molhada - Fluxo
E	80/24	40 cm	10 – 20 m	Sem Alteração	Lisa Polida	Ausente	Ausente
F	282/32	2 m	3 – 10 m	Sem Alteração (Apenas Óxido de Manganês)	Plana Polida	0 – 2 mm	Ausente
G	157/21	65 cm	20 m	Sem Alteração	Lisa Ondulada	3 mm	Molhada - Fluxo Localizado
H	76/87	30 cm	20 m	Alto Grau de Alteração	Lisa Ondulada	< 5 mm	Molhadas - Pingando
I	180/79	60 cm	20 m	Sem Alteração	Lisa Ondulada	Ausente	Ausente
J	40/80	60 cm	10 – 20 m	Sem Alteração	Lisa Ondulada	0 – 2 mm	Ausente

Ao todo, 24 planos, de nove famílias de fratura foram vetorizados, por meio da correlação e interpolação entre os pontos georreferenciados que foram obtidos em campo e se dispõem em todas as bancadas. A família H não pode ser representada graficamente, devido à escassez de dados, o que não configura sua representatividade no setor. A interpolação e geração dos planos de fratura, após o processamento e classificação das famílias obtidas, foi estabelecida pela correlação entre essas famílias e os pontos georreferenciados pelo aplicativo *FieldMove Clino*.

A Figura 4.4 demonstra a configuração bidimensional adquirida pelas discontinuidades.

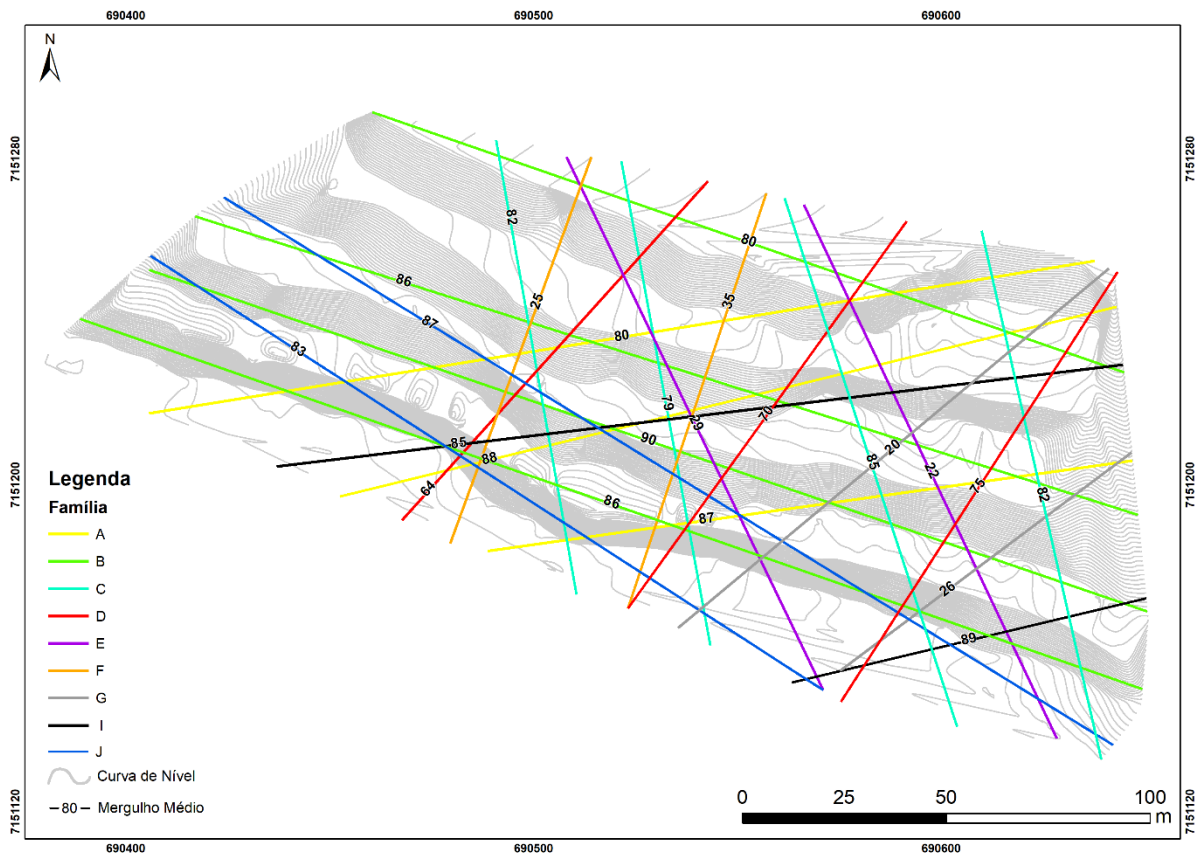


Figura 4.4: Planos vetorizados das famílias de fraturas.

A predominância de planos de fratura verticalizados, com diferentes azimutes de orientação, é evidente em todo o setor nordeste da mina. Esse conjunto de famílias subverticais, é constantemente caracterizado pela presença de água, seja em menores ou maiores proporções de fluxo. Elas apresentam espaçamento que variam de 30 cm a 2 m e possuem continuidade superior à 15 m. As famílias correspondentes

a esse conjunto são: A, B, C, D, H, I e J; e equivalem a 70% das medidas tomadas em campo.

O conjunto de fraturas mais pervasivo, corresponde às descontinuidades das famílias C e D, que predominantemente, estão dispostas perpendicularmente aos cortes dos taludes no setor nordeste. As fraturas da família D, assumem características de zonas de cisalhamento, possuindo uma zona de influência de aproximadamente 1 m e espaçamento entre as zonas de aproximadamente 3 m (Figura 4.5).



Figura 4.5: Zonas de influência com espaçamento constante, localizada na zona 14.

Além disso, nas zonas de falha foram visualizadas estrias sub-horizontais, que caracterizam a família D como uma falha transcorrente de possível caráter transtativo (Figura 4.6). A conectividade entre essas famílias, configuram problemas de estabilidade dos taludes que foram visualizadas em campo. Como é o caso da materialização de deslizamentos em cunha (Figura 4.7) e tombamento de blocos. A notória percolação de água nas descontinuidades da família D faz com que haja intensa alteração nas paredes das fraturas que a constituem (Figura 4.8), gerando uma menor resistência e um menor atrito entre as paredes das descontinuidades, facilitando o deslizamento em cunha entre essas duas famílias. A energia propagada

pelas explosões do desmorte das bancadas assume grande influência na abertura nas famílias observadas, principalmente na C e D, uma vez que a abertura chega a assumir 6cm. Na zona 5, essas aberturas são evidentes e apresentam um alto risco de tombamento de blocos na atual configuração do talude, sendo que alguns blocos encontram-se suspensos à face do talude (Figura 4.9).

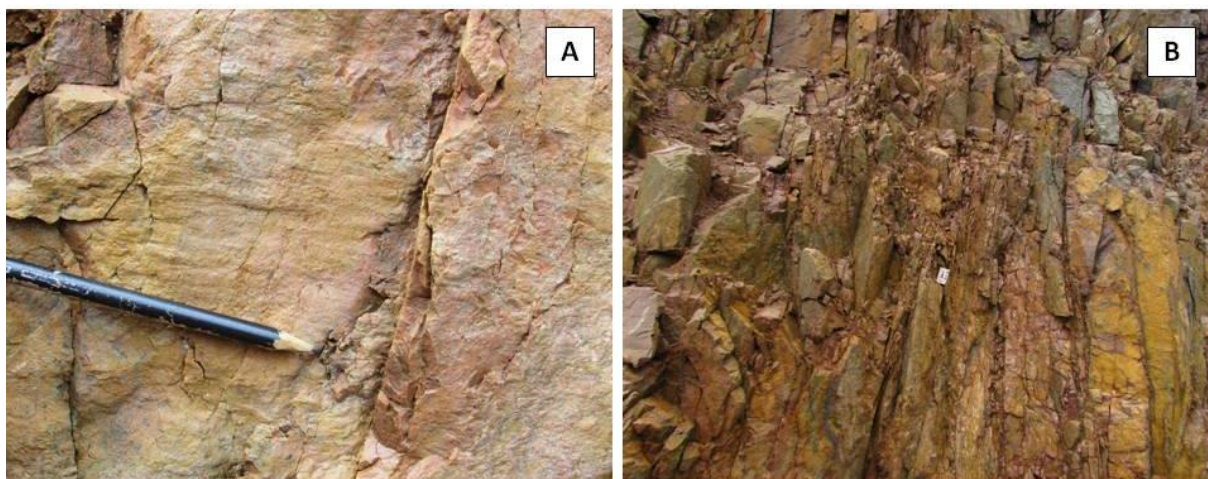


Figura 4.6: Evidências de transcorrência. A) Estrias paralelas à direção apontada; B) Zona de influência cominuída de aproximadamente 1,5 m de extensão.

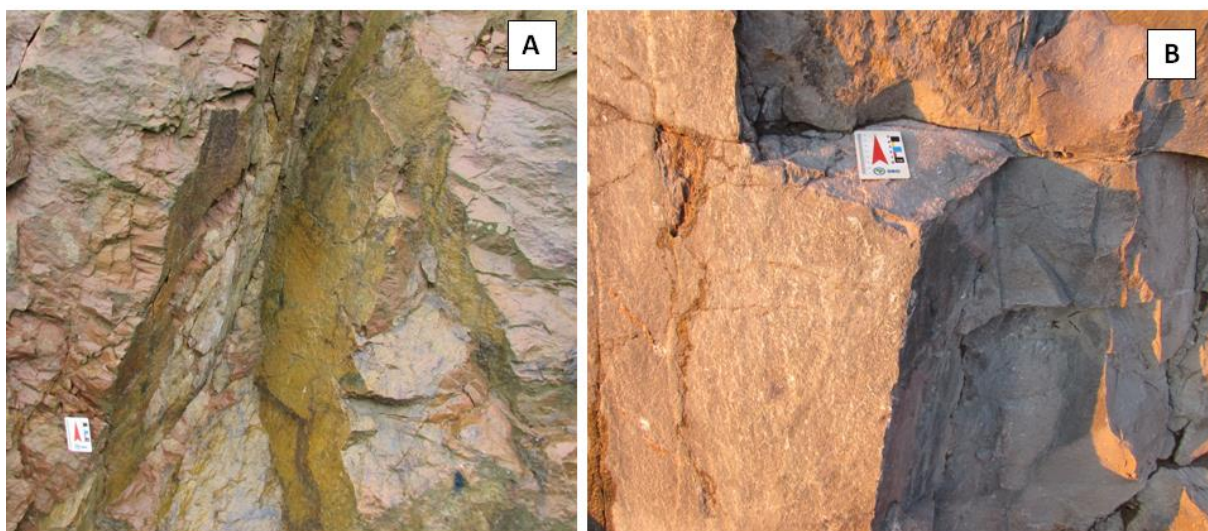


Figura 4.7: - Interseção das famílias C e D gerando feições em cunha. A) Fotografia demonstrando a cicatriz do deslizamento já ocorrido. B) Materialização das famílias C e D.

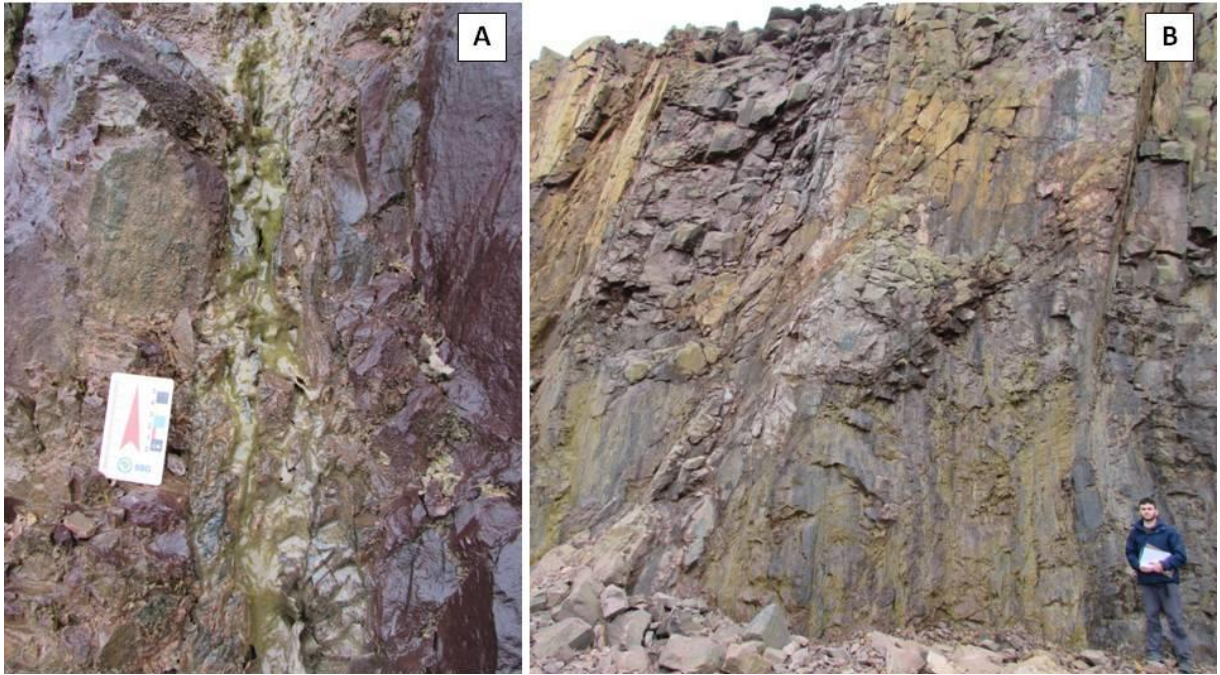


Figura 4.8: Zonas de alteração. A) Zona de alteração na parede de uma fratura, com água percolando; B) Zona de alteração ao longo de toda a face do talude.



Figura 4.9: Zona 05, onde as fraturas apresentam aberturas de até 6 cm.

As discontinuidades que compreendem a família B são caracterizadas por um espelho de falha com falsos *steps* e rugosidade do tipo polida escalonada. Na maioria dos cortes, essa família se dispõe subparalela aos cortes de todas as bancadas. A relação de paralelismo dessa discontinuidade em relação ao talude faz com que as estruturas relacionadas à família B, sejam na atual configuração da mina, as principais discontinuidades propícias às instabilizações. As fraturas caracterizadas como da família B, subordinadamente afloram com presença de água e de alterações. Essas características não estão dispostas de maneira mapeável. Entre as zonas 21 e 22, conforme Figura 3.2, há o preenchimento de Calcita e Fluorita, de forma heterogênea e englobada numa mesma matriz, em que podem assumir até 2 cm de espessura (Figura 4.10).

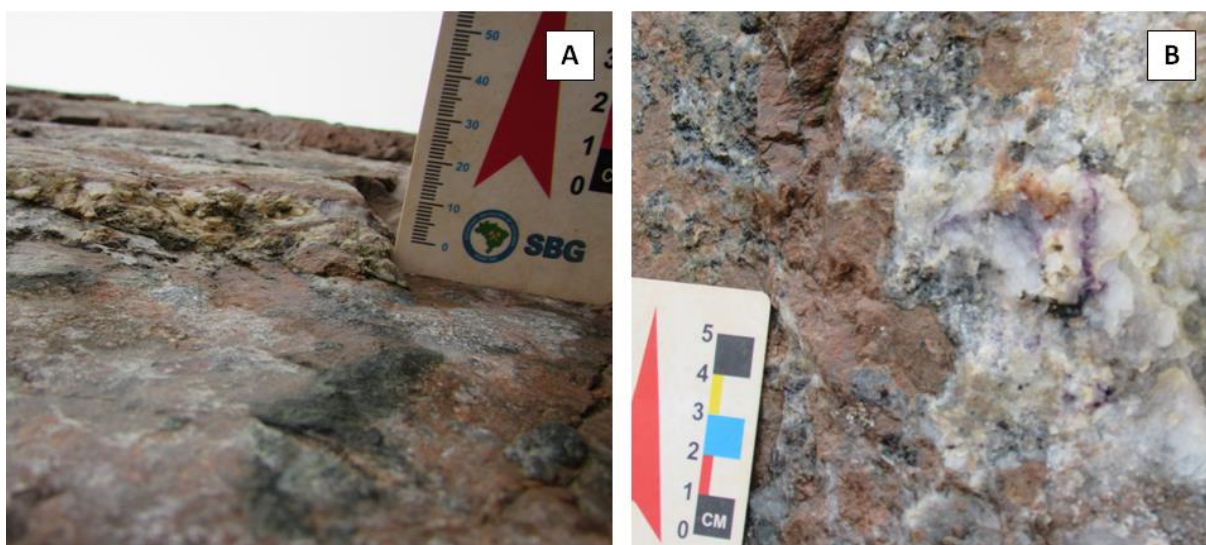


Figura 4.10: Preenchimento na família B. A) Espessura do preenchimento de aproximadamente 2 cm; B) Preenchimento constituído por calcita e fluorita.

As fraturas classificadas como pertencentes da família A dispõem-se praticamente em sentido E-W e possuem um range de abrangência variando de 18/87 até 320/80. Na atual configuração da mina, dispõem-se subparalelizadas às frentes dos taludes nas quatro bancadas estudadas.

Igualmente representativas, porém em menor quantidade de dados anotados, as famílias com planos sub-horizontais correspondem à aproximadamente 30% das medidas anotadas. O conjunto é caracterizado por espaçamentos que variam de 40 cm a 2 m e sua continuidade varia de 3-10 m na família F, e comumente ultrapassa

os 20 m nas famílias G e E. Possuem rugosidade predominante caracterizada como polida. As famílias que constituem esse conjunto são a E, F e G; sendo que a G dispõe-se em maior quantidade dentre elas. A conectividade entre as famílias de mergulho sub-horizontal com as subverticais, podem gerar tombamentos, tais como os que foram visualizados entre as famílias B e G (Figura 4.11). As famílias sub-horizontais são caracterizadas pela ausência de fluxo ou percolação de água, entretanto, a conectividade entre as referidas famílias, gera uma rede de transmissão e armazenamento de água. A conectividade é comprovada pela constante presença de fluxo de água nas fraturas da família D, em que, na zona 28, o mesmo fluxo, com uma intensa vazão quando comparadas às demais, surge na família G (Figura 4.12).

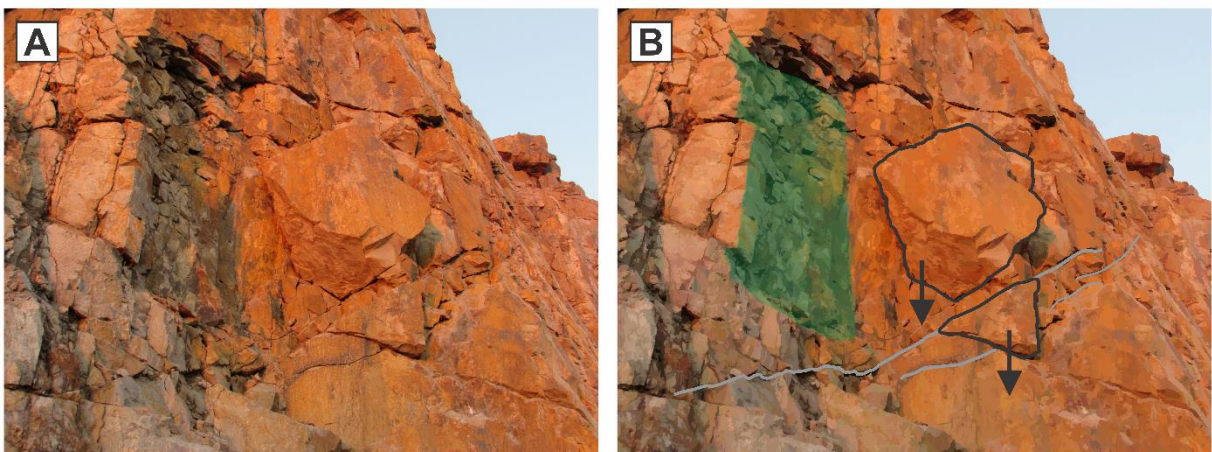


Figura 4.11: Blocos suspensos na iminência do tombamento. A) Fotografia de dois blocos na iminência do tombamento, localizado na zona 30. B) Imagem esquemática de dois blocos localizados na zona 30 na iminência do tombamento pela interseção das famílias de fratura B e G.

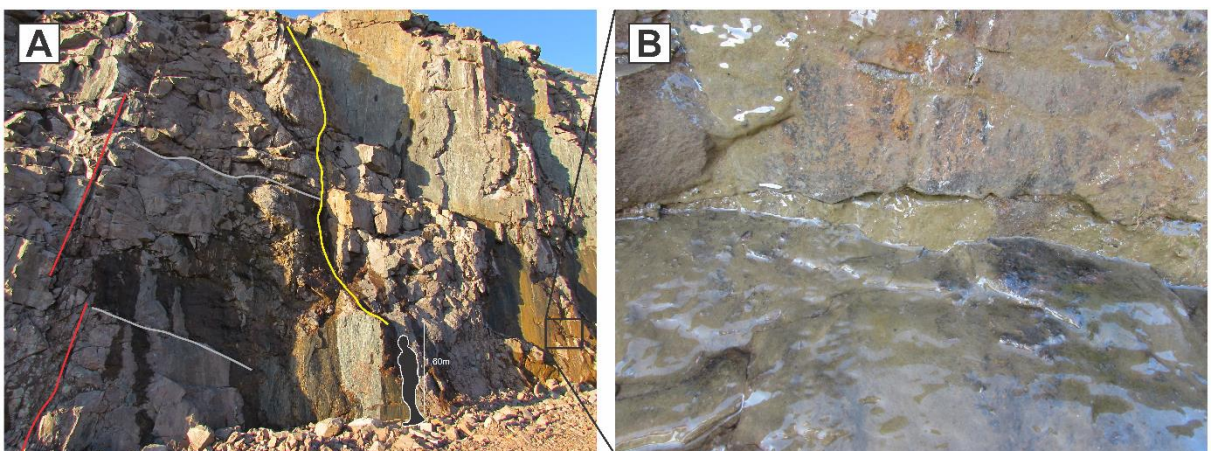


Figura 4.12: Fluxo de água em famílias sub-horizontais. A) Figura esquemática de toda a zona 28, sendo compreendida por 4 famílias de fraturas. B) Fluxo de água possivelmente relacionada à interseção das famílias D e G.

4.4. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA – RMR

Dentre as 30 zonas subdivididas nas quatro bancadas do setor nordeste, obtiveram-se 20 zonas definidas como Classe III e 10 zonas definidas como Classe IV. Os valores obtidos para cada zona e seus referidos parâmetros encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4: Valores dos parâmetros da classificação geomecânica de Biewiawski, para as 30 zonas.

Zona	1 Resistência a do Material Intacto	2 RQD	3 Espaçamento	4 Condição das descontinuidades	5 Características Hidrogeológicas	6 Fator de Correção	Nota	Classe
1	15	20	15	20	15	-25	60	III
2	15	20	10	10	7	-25	37	IV
3	15	20	10	20	10	-25	50	III
4	15	20	15	10	4	-25	39	IV
5	15	20	15	0	15	-25	40	IV
6	15	20	10	10	10	-25	40	IV
7	15	20	10	20	10	-25	50	III
8	15	20	10	20	4	-25	44	III
9	15	17	15	20	15	-25	57	III
10	15	17	10	0	10	-25	27	IV
11	15	17	10	20	15	-25	52	III
12	15	20	15	10	10	-25	45	III
13	15	20	15	0	10	-25	35	IV
14	15	20	15	20	10	-25	55	III
15	15	20	10	0	15	-25	35	IV
16	15	20	15	20	10	-25	55	III
17	15	17	15	10	4	-25	36	IV
18	15	20	15	20	7	-25	52	III
19	15	20	15	10	10	-25	45	III
20	15	20	10	10	7	-25	37	IV
21	15	20	15	25	10	-25	60	III
22	15	20	15	25	10	-25	60	III
23	15	20	10	20	0	-25	40	IV
24	15	20	10	10	10	-25	40	IV
25	15	20	15	25	15	-25	65	III
26	15	17	15	25	15	-25	62	III
27	15	20	15	20	7	-25	52	III
28	15	17	10	20	0	-25	37	IV
29	15	17	15	25	10	-25	57	III
30	15	20	15	25	10	-25	60	III

A delimitação de duas zonas, localizadas nas extremidades leste e oeste da análise do setor, sugerem duas faixas de Classe IV, que se estendem por todas as bancadas. A espacialização das classes obtidas encontra-se na Figura 4.4.

O fator de correção empregado na classificação geomecânica de maciços com cortes em taludes, conforme apresentado no item B da Figura 2.5, adota notas mais significativas do que, por exemplo, quando empregada para túneis ou escavações, principalmente devido à prevenção de instabilizações.

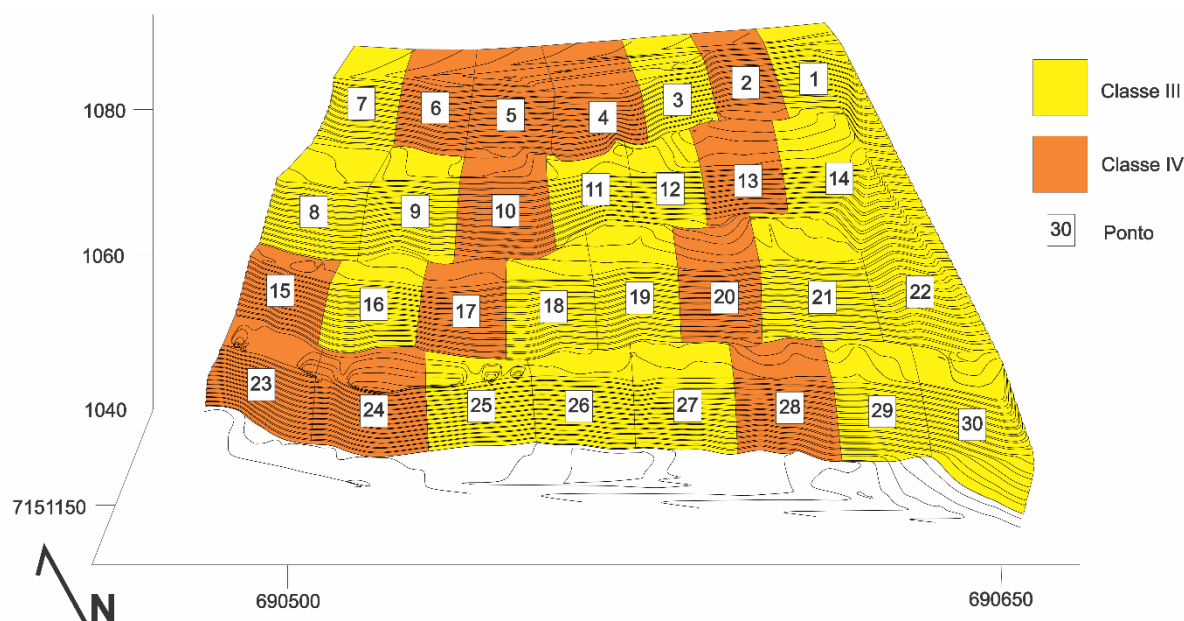


Figura 4.13: Classificação RMR do setor nordeste da mina Morro Redondo.

Dessa forma, as correções aplicadas para as zonas delimitadas equivalem à subtração de 25 pontos para a classificação do maciço. Tal correção foi empregada, de forma conservativa, a partir da predominância de estruturas aflorantes correlacionadas à família B em praticamente todas as zonas, assumindo uma estruturação de subparalelismo com as faces do talude. Entretanto, o ângulo de mergulho dessas estruturas se apresenta favorável à continuidade do avanço (com mergulho contrário à direção e mergulho do talude) fazendo com que a nota da correção seja classificada como razoável. Os valores de coesão e ângulo de atrito interno obtidos para as zonas III e IV foram 30° e 20°, respectivamente.

O valor RQD obtido para cada uma das zonas foi calculado através da fórmula de Palmstrom (1975), em que se propõe uma relação entre o Índice de Diaclasamento

Volumétrico (Jv) e o Índice de Qualidade de Rocha (RQD). Para o presente trabalho, utilizou-se o espaçamento para a contagem das descontinuidades definido em 5 m. Portanto, em cada zona delimitada de acordo com a contagem de passos, uma área representativa que abrangesse todas as famílias de fratura foi subdividida, num espaçamento fixo perpendicular às descontinuidades de 5 m, onde se obteve a quantidade de descontinuidades de cada família de fratura na distância proposta. O cálculo do Jv foi realizado em trabalho pós-campo juntamente ao cálculo de seu respectivo RQD. Tais valores encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5: Notas obtidas pelo Índice de Diaclasmaneto Volumétrico para as 30 zonas.

Zona	Jv	NOTA	RMR	Zona	Jv	NOTA	RMR	Zona	Jv	NOTA	RMR
1	2	100	20	11	8	88,6	17	21	3	100	20
2	2	100	20	12	6,8	92,56	20	22	5	98,5	20
3	1,8	100	20	13	5,8	95,86	20	23	4	100	20
4	3	100	20	14	7	91,9	20	24	7,2	91,24	20
5	3,2	100	20	15	6	95,2	20	25	7,4	90,58	20
6	2,2	100	20	16	3,4	100	20	26	7,8	89,26	17
7	2,6	100	20	17	7,8	89,26	17	27	5,2	97,84	20
8	6,6	93,22	20	18	7,4	90,58	20	28	7,6	89,92	17
9	11,6	76,72	17	19	5,2	97,84	20	29	10,8	79,36	17
10	8	88,6	17	20	4,4	100	20	30	4,8	99,16	20

4.5. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA – SMR

O uso da classificação SMR foi limitado apenas às zonas que obtiveram uma nota na classificação RMR equiparada à Classe IV. Portanto, sua aplicação foi limitada às duas áreas de Classe IV. O cálculo dos parâmetros F_1 e F_2 foi realizado de forma conservativa, uma vez que inúmeras famílias interceptam as zonas delimitadas. O valor utilizado para a medida corretiva F_4 foi 0 devido ao método ao desmonte ser realizado por explosivos. Vale salientar que quanto mais paralela a direção de uma determinada descontinuidade for em relação a face talude, menor será sua nota. As notas e classes obtidas pela classificação SMR estão na Tabela 6.

Tabela 6: Classificação SMR para as zonas de Classe IV pela classificação RMR. F₁ – Estabelece a relação entre a direção da descontinuidade e do plano do talude. F₂ – Depende do ângulo de mergulho da descontinuidade. F₃ – Depende da favorabilidade da relação entre o ângulo de mergulho da descontinuidade e do talude. F₄ – É definido a partir do método de desmonte utilizado.

Zona	RMR	Atitude	F1	F2	F3	F4	SMR	Classe
2	37	304/80	0,15	1	-25	0	33,25	IV
5	40	190/80	0,4	1	-25	0	30	IV
6	40	180/73	0,7	1	-50	0	5	V
10	27	162/25	0,85	0,4	-60	0	6,6	V
13	35	190/77	0,4	1	-50	0	15	V
17	36	285/86	0,15	1	-25	0	32,25	IV
20	37	355/87	0,15	1	-25	0	33,25	IV
24	40	175/85	1	1	-6	0	34	IV
28	37	148/31	0,4	0,7	-60	0	20	V

A análise pelo sistema SMR utilizou a medida que fosse mais próxima à medida proposta para a nova direção dos taludes, com o intuito de entender o comportamento mecânico do maciço frente à estrutura de maior susceptibilidade às instabilizações. O controle foi feito via anotações de campo, onde cada zona possui as devidas anotações estruturais observadas naquela delimitação.

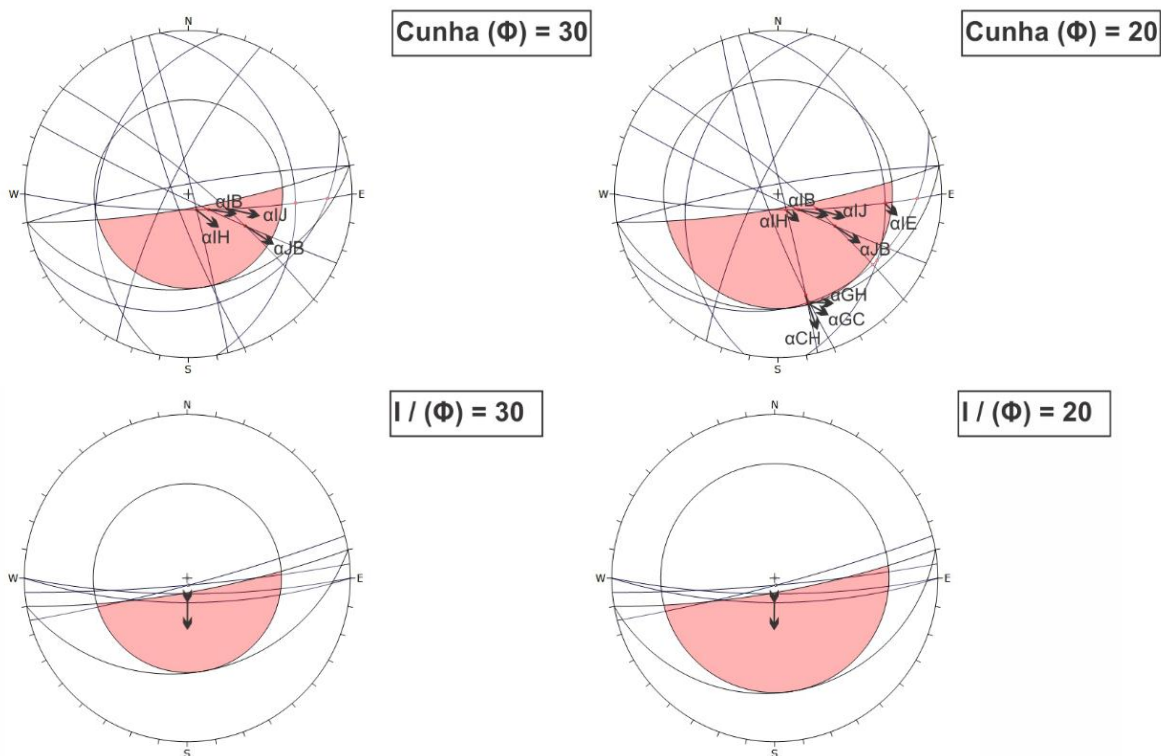
Conforme abordado na Tabela 2, a classificação SMR visa estabelecer medidas preventivas para auxiliar na estabilização dos taludes. As medidas preventivas indicadas pelos resultados desta classificação, para a mina em estudo, compreendem medidas corretivas, como a inserção de drenos superficiais e profundos para as zonas de Classe IV e reescavação do talude para as zonas de Classe V.

4.6. ANÁLISE CINEMÁTICA

Propõe-se a análise cinemática das descontinuidades que prolongam-se ou intersectam a região do setor nordeste que terá a direção dos taludes alterada de acordo com o avanço da exploração do maciço. Sua utilização é baseada a partir da definição de três importantes parâmetros: a direção geográfica da face do talude, o ângulo de mergulho do talude e o ângulo de atrito interno do maciço (Φ).

A direção proposta para a face do talude foi assumida a partir das propostas de avanço da lavra, em que tal direção pode averiguar a nova configuração do setor nordeste. Tal direção é N80E/80SE. O ângulo de mergulho assumido para os taludes mantém a atual configuração das bancadas, em que o ângulo é de 80°. O ângulo de atrito interno (Φ) foi estimado a partir dos resultados obtidos pela classificação geomecânica de Bieniawski, especificando valores de 20° e 30°, para as Classes IV e III, respectivamente.

Todo o processamento foi realizado no *software Dips*, em que para os deslizamentos em cunha, utilizou-se os planos máximos de cada família de fratura, obtendo-se quatro interseções para $\Phi = 30^\circ$ e oito para $\Phi = 20^\circ$. Os possíveis deslizamentos estão entre as seguintes famílias: I x B; I x E; I x H; I x J; J x B; G x C; G x H; C x H. Para os deslizamentos planares, foi realizada a análise total do conjunto, composto por 243 medidas, obtendo-se possíveis deslizamentos planares apenas para as famílias B, E, G e I, dentre eles: dez deslizamentos na família B; quatro deslizamentos na família E; 18 deslizamentos onde $\Phi = 20^\circ$ e oito para $\Phi = 30^\circ$ na família G; e 2 deslizamentos na família I (Figura 4.15).



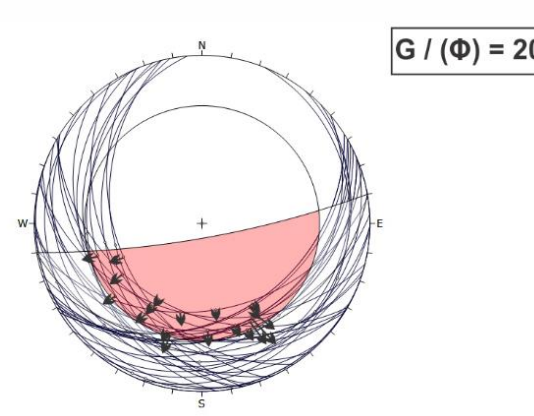
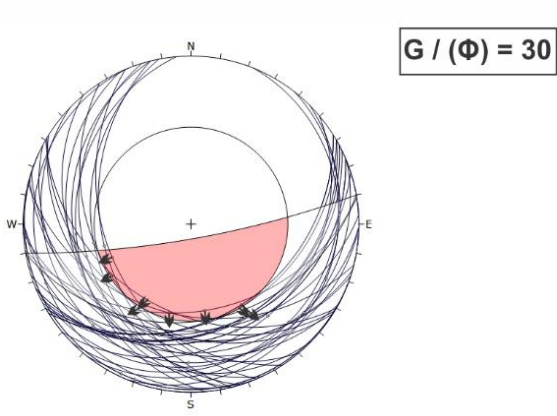
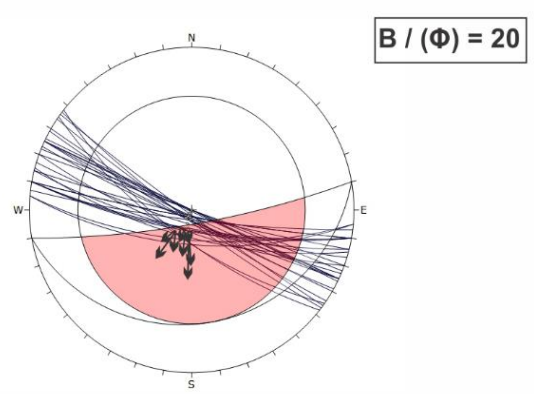
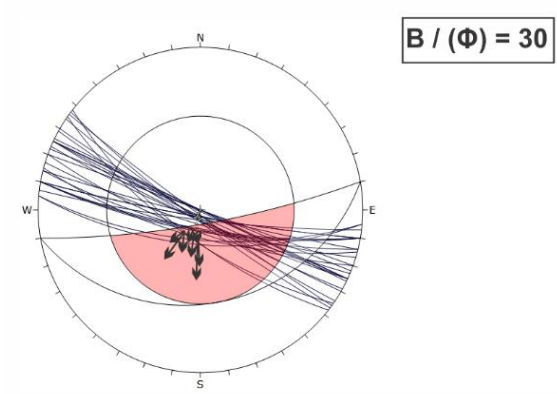
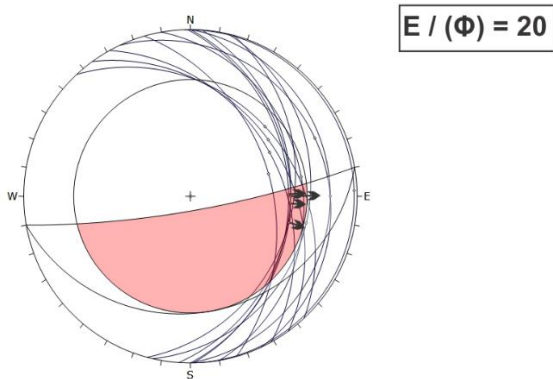


Figura 4.14: Análise cinemática para deslizamentos em cunha em planares. Os ângulos de atrito interno correspondem à 20° e 30.



4.7. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL

Obtida como principal produto do levantamento topográfico, a modelagem tridimensional foi realizada a partir de 1846 pontos, com coordenadas (x, y, z), cotados a partir de um espaçamento pré-definido de 0,5 m. A Figura 4.15 representa os modelos obtidos para a atual configuração topográfica da mina (Figura 4.15A) e também para a configuração projetada (Figura 4.15B).

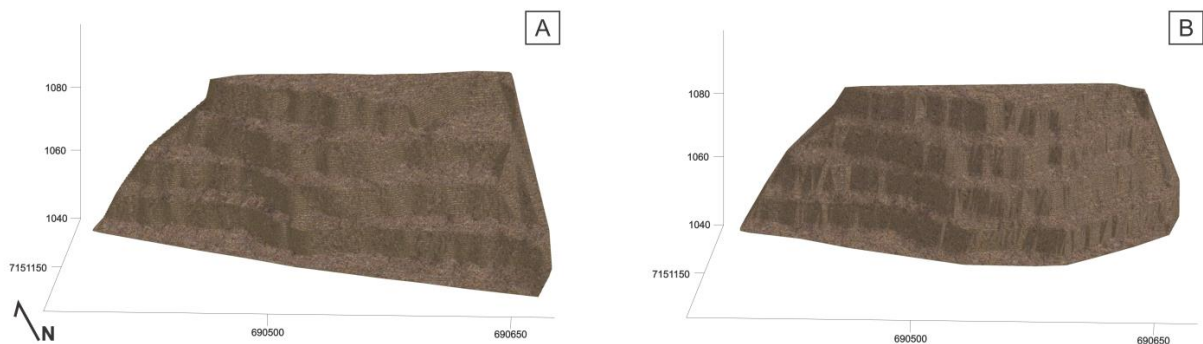


Figura 4.15: Modelo tridimensional digital de terreno. A) Modelo da configuração atual da mina, com os taludes a leste com direção de corte média N75W; B) Modelo proposto com direção de corte médio dos taludes a leste de N80E.

A análise tridimensional dos planos facilita a interpretação dos resultados da análise cinemática para avaliação da estabilidade do maciço nas diferentes porções do maciço, uma vez que ao se prologar esse plano tridimensionalmente, é possível estimar sua continuidade, quais planos podem se interceptar no interior do maciço e em qual bancada essa interseção ocorrerá. As instabilizações se dão, principalmente, pela análise cinemática, definida pelas relações de paralelismo, ângulo de atrito e coesão do maciço. A modelagem das descontinuidades foi realizada apenas para a configuração futura sugerida para os taludes da mina (N80E), conforme demonstrada pela Figura 4.15B, e realizada para os planos com possíveis deslizamentos, comprovados pela análise cinemática, enfatizando quais estruturas poderão gerar instabilizações. Os modelos de estruturas passíveis a deslizamentos planares e em cunha encontram-se no Anexo I.

5. DISCUSSÃO DOS DADOS

Na atual conjuntura da mina, a discrepância entre a presença de fraturas pertencentes às famílias C e D é elevada em relação às demais. Tal fato ocorre, pelas suas características genéticas, estando possivelmente associadas ao mesmo campo de tensão, de caráter NE-SW, de estruturas regionais, como a Zona de Cisalhamento Guaricana e a Falha Mestra Guaratubinha, de acordo com o mencionado por Barão (2016). A atitude assumida por essas estruturas assemelha-se a atitude média apresentada pela família D. A disposição perpendicular dessas estruturas em relação a face dos taludes no setor nordeste facilita a visualização e evidencia a sua predominância em relação às demais estruturas.

A maior quantidade de medidas relacionadas às famílias C e D em todo o setor nordeste, em conjunto às zonas de menores notas geomecânicas, evidenciadas pelo conjunto de zonas Classe IV, nos permite afirmar que a formação e o arranjo dessas duas famílias de fraturas diminuem consideravelmente a qualidade geral do maciço. Além da disposição apresentada por esse conjunto de fraturas, o espaçamento adquirido entre cada descontinuidade, o grau de alteração e o preenchimento são fatores cruciais e que contribuem consideravelmente para sua classificação. A presença da água, mesmo que com intensidades variadas quanto aos fluxos de percolação, em toda sua disposição, prejudica a resistência interna da parede da descontinuidade.

Devido ao elevado grau de fraturamento, em toda a porção do maciço, infere-se que as famílias de fraturas visualizadas estejam conectadas entre si em algum ponto do maciço. A modelagem tridimensional das descontinuidades é um grande facilitador para o embasamento dessa afirmação, uma vez que ao espacializar e prolongar as descontinuidades, de acordo com sua direção e ângulo de mergulho, na porção nordeste da mina, esta conectividade torna-se evidente.

Em contrapartida ao discutido acima, para o atual uso e comercialização do riolito como brita, o grau de fraturamento pré-existente torna-se um aliado, uma vez que os gastos com britagem sejam reduzidos.

A utilização das classificações geomecânicas é confiável e de extrema importância para a definição da qualidade geral do maciço utilizando apenas

parâmetros visuais que podem ser coletados em campo. A utilização da classificação SMR nas zonas classificadas como de Classe IV pelo sistema RMR foi de suma importância quanto ao entendimento do comportamento do maciço quanto à presença das descontinuidades.

Comparando os resultados obtidos pelas duas classificações, observou-se que as notas obtidas em metade das zonas analisadas, pela classificação de Romana, foram consideravelmente menores do que as do Sistema RMR; discute-se que tal fator ocorre pelo enfoque das relações geométricas entre as descontinuidades observadas e a face do talude, atribuindo um maior conservadorismo e grau de confiabilidade, quanto às instabilizações, para o estudo em cortes de taludes. Como exemplo, notou-se que quanto mais paralelizada, nos quesitos de atitude estrutural (direção geográfica e mergulho), uma descontinuidade estiver em relação à face de corte do talude, menor será sua nota frente ao sistema SMR. Tal fator ocorre pelo crítico decréscimo na nota pelo fator F_3 , decorrente do ângulo de mergulho da descontinuidade ser maior do que o do talude.

A presença de famílias de fraturas que se prolongam em todos os quadrantes torna a adoção de uma direção para os taludes uma difícil escolha. Entretanto, para a direção sugerida em N80E, nota-se que as estruturas que poderão estar sujeitas aos deslizamentos planares, relacionam-se às fraturas B, I, E, G. Devido à maior quantidade de dados anotados, a família B, é ressaltada como principal possível estrutura sujeita às instabilizações na possível configuração futura do setor nordeste (Figura 4.14). As diferentes notas obtidas para o ângulo de atrito interno entre as classificações geomecânicas RMR e SMR asseguram que, no caso da classificação de Romana, aproximadamente metade das zonas podem assumir um ângulo Φ de aproximadamente 15° , o que configura uma maior abrangência para as famílias plotadas, fazendo com que a maioria das descontinuidades das famílias E e G, constituídas de um baixo ângulo mergulho, estivessem suscetíveis ao deslizamento planar.

As famílias I e H estão dispostas bem alocadas para a geração de deslizamentos em cunha e mesmo apresentando uma baixa densidade de dados obtidos, colocam-se como as principais estruturas causadoras de deslizamentos planares. Quando associadas às famílias de fraturas com uma quantidade de dados

mais representativa, como é o caso da família B, surgem deslizamentos em cunha de suma importância. As relações de paralelismo, visualizadas pela análise cinemática, quando analisadas de maneira exclusiva, nem sempre sugerem possíveis deslizamentos, uma vez que fraturas que estão verticalizadas dificilmente apresentarão riscos de deslizamentos em taludes com ângulos de mergulho inferiores à 80° .

6. CONCLUSÕES

A descrição e mapeamento das descontinuidades contribuem e enfatizam sua visualização em pontos que intersectam o maciço no setor nordeste da mina Morro Redondo. Suas características descritivas são essenciais para a compreensão do comportamento mecânico do maciço rochoso num geral. A delimitação de zonas de análise, pelo método de caminhamento, mostrou-se eficaz na compartimentação das bancadas analisadas. Entretanto, tal método resultou pequenas variações no comprimento de cada zona, configuradas pela variação da direção das faces dos taludes em todas as bancadas.

A utilização de equipamentos de maior grau tecnológico, como foi o caso para o *FieldMove Clino*, um aplicativo utilizado via *smartphone* para a tomada de atitudes estruturais, é um facilitador para a anotação e manejo de uma grande quantidade de dados, bem como para a alocação georreferenciada da referida medida. Entretanto, as limitações do aplicativo quanto à tomada de atitudes com alto ângulo de mergulho tornou sua utilização, de forma integral, impraticável, fazendo com que os métodos convencionais de medidas, via bússolas, fossem imprescindíveis para a realização desse trabalho.

O levantamento topográfico via RTK garantiu um alto grau de precisão topográfica para a atual configuração da mina Morro Rendondo. A utilização do equipamento, desde a sua instalação e manejo, mostrou-se simples e eficaz. O método de aquisição de dados topográficos (*Stop and Go*) garante uma alta rapidez e praticidade, desde que o caminhamento com o *rover* seja realizado no raio de abrangência da base.

Entretanto, o avanço das tecnologias de sensoriamento remoto e imageamento aéreo estão em nítido crescimento no mercado das geotecnologias, em que para trabalhos em minas a céu aberto, a utilização de um aeromodelo, em conjunto com o RTK (em que o RTK fosse utilizado apenas para a marcação de pontos de controle) fosse a mais recomendada. A utilização de técnicas de aerofotogrametria buscando a modelagem tridimensional são comumente utilizados para os mais diversos trabalhos do ramo de sensoriamento remoto, e para o caso da mineração, garantiria uma apresentação visual dos dados de terreno mais nítidas e satisfatórias.

As avaliações geomecânicas realizadas via sistemas RMR e SMR mostraram-se eficientes quanto ao entendimento do comportamento mecânico de maciços rochosos em relação as descontinuidades que o intersecta; bem como a para a definição e quantificação das zonas delimitadas pelo caminhamento. A utilização da classificação SMR em relação à RMR, para estudos de corte de taludes, apontou uma maior ênfase na relação entre a geometria da descontinuidade para com a face do talude.

As análises cinemáticas, foram descartadas para a atual configuração da mina, uma vez que o escopo deste trabalho é averiguar quais as possíveis instabilizações geradas pela mudança na direção da face do talude; mesmo que na atual configuração da mina, diversos problemas geotécnicos foram visualmente constatados em campo. Desta forma, as análises foram realizadas exclusivamente para a possível configuração futura do setor nordeste da mina Morro Redondo, demonstrando deslizamentos planares em pelo menos quatro famílias e deslizamentos em cunha entre sete famílias de fratura.

A direção dos taludes sugerida neste trabalho mostrou-se adequada e exequível quanto às limitações geomorfológicas apresentadas no setor nordeste da mina Morro Redondo, uma vez que as principais estruturas suscetíveis à instabilizações dispõem-se numa menor densidade de dados do que as estruturas mais visualizadas, o que poderá averiguar um menor grau de instabilizações para diversas zonas na configuração futura.

Dessa forma, para estudos futuros, na atual configuração dos taludes da mina, sugere-se a análise cinemática para as diversas famílias de fraturas mapeadas e descritas nesse estudo, bem como o aprofundamento na classificação SMR para todas as zonas delimitadas, o que poderá garantir notas inferiores à RMR em determinadas zonas, acarretando na adoção de diferentes medidas preventivas à instabilizações numa maior extensão do setor nordeste da mina Morro Redondo.

REFERÊNCIAS

Almeida, R.P., Janikian, L., Fragoso-Cesar, A.R., Fambrini, G.L., 2010. The Ediacaran to Cambrian Rift System of Southeastern South America: Tectonic Implications. *The Journal of Geology*, **118**:145-161.

ANATUM GeoMobileSolutions. **RTK GPS Explained**. Disponível em: https://www.anatumfieldsolutions.com/RTK-GPS-Explained_b_6.html. Acessado em 05 outubro 2018.

Barão L.M. 2016. *Arcabouço estratigráfico – estrutural da Bacia do Guaratubinha e deformações associadas, sudeste do estado do Paraná*. Tese de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, 135 pp.

Barton N., Choubey V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.* **10**:1-54.

Bell F.G. 1992. *Engeneering Properties of Soils & Rocks*. 3ed. Butterworth-Heinemann, London, UK, 332 pp.

Bell F.G. 2007. *Engeneering Geology*. 2ed. Butterworth-Heinemann, London, UK, 575 pp.

Bieniawski Z.T. 1974. Estimating the strength of rock materials. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, Pretoria, **72**:312-320.

Bieniawski Z.T. 1989. *Engeneering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons, New York, USA, 251 pp.

Candia R.C, Hennies W., Iramina W., Elguera J.S. 2009. Análise de acidentes fatais na mineração – o caso da mineração no Peru. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, **62**:517-523.

Castro N.A., Reis Neto, J.M., Assine M.L. 1993. Rochas Vulcanogênicas da Formação Guaratubinha, PR. *Simpósio Sul Brasileiro de Geologia*. Curitiba. Boletim de Resumos, pp. 43-44.

Daitx, E.C. 1979. Mapa geológico, folhas parciais de São José dos Pinhais, SG-22-X-D-IV e Paranaguá SG-22-X-D-V. In: Daitx, E.C. e Carvalho, M. A. da S. Projeto geoquímica na área de Guaratubinha-Piên, relatório final. São Paulo: DNPM/CPRM, 1980. (Relatório do Arquivo Técnico da DGM, 2953) v.1, anexo 2. Escala: 1:100.000.

Deere D.U., 1964. Technical description of rock cores. *Rock Mechanics Engeneering Geology*, 1:16-22.

Fiori A.P. & Carmignani L. 2009. *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas, aplicações na estabilidade de taludes*. 2ed. Oficina de Textos, Curitiba, 602 pp.

Fiori A.P. 2015. *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas, aplicações na estabilidade de taludes*. 3ed. Oficina de Textos, Curitiba, 576 pp.

Freitas S.B.N. 2011. *Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniawski) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em Taludes de Funchal*. Tese de Mestrado. Universidade da Madeira, 124 pp.

Fuck R.A., Marini O.J., Trein E. 1967. A Formação Guaratubinha. Boletim Paranaense de Geociências, v.23-25, pp. 237-256.

Gonçalves C. 2016. *Caracterização e Classificação Geomecânica de Taludes Rochosos. Aplicação a Caso de Estudo*. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia, Universidade da Madeira, 157 pp.

Goodman R.E. 1989. *Introduction to Rock Mechanics*. 2ed. John Wiles & Sons, New York, 562 pp.

Google, Google Earth. Versão Google Earth Pro. 2018. Disponível em: <https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>. Acesso em: 03 abril 2018.

Hocking G., 1976. A method for distinguishing between single and double plane sliding of tetrahedral wedges. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*. **13**:225-226.

Hoek E., Bray J. 1981. *Rock Slope Engineering*. 3^a Ed. Institute of Mining and Metallurgy.

Hudson J.A., Harrison J.P. 1997. *Engineering Rock Mechanics. An Introduction to the Principles*. 1ed. Elsevier Science, London, UK, 456 pp.

ITCG. **A indústria mineral paranense no cenário nacional**. Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=62>.

Acesso em 01 set 2018.

Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W., 2007. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 4ed., Blackwell Publishing, Oxford, UK, 469 pp.

Markland J.T., 1972. A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. *Rock mechanics research report - Imperial College of Rock Mechanics*, London, UK, **19**:1-10.

Palmstrom A., 1982. The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. *Proceedings of the IV IAEG Congress*, New Delhi, India, pp. 221-228.

Palmstrom A., 1975. Characterization of degree of jointing and rock mass quality. *Internal Report. Ing.A.B.Berdal A/S*, Oslo, Norway, pp. 1-26.

Raghuvanshi T.K. 2017. Plane failures in rock slopes – A review on stability analysis techniques. *Journal of King Saud University – Science*, Elsevier, Addis Ababa, Ethiopia, pp. 1-9.

Romana M. 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works*. International Society of Rock Mechanics, Zacatecas, pp. 49-53.

Siga Jr., O., Basei, M.A.S.; Sato, K., Cordani, U.G., Citroni, S.B. 2000. U-Pb and Sm-Nd Isotopic Studies of Campo Alegre and Guaratubinha Volcanosedimentary Basins, Southern Region. *31st International Geology Congress, Anais*. Rio de Janeiro. IUSGS, v.CD

Vallejo M. 2002. *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación, Madrid, España, 744 pp.

Yoon W.S., Jeong U.J., Kim J.H. 2002. Kinematic analysis for sliding failure of multi-faced rock slopes. *Engineering Geology*, Elsevier, Seoul, South Korea, **67**:51-61.

Zhao K., Gu S., Yan Y., Li Q., Xiao W., Liu G. 2018. Rock Mechanics Characteristics Test and Optimization of High-Efficiency Mining in Dajishan Tungsten Mine. *Wiley/Hindawi*, Ganzhou, China, 11 pp.

Anexo I: Modelagem tridimensional das descontinuidades, em ordem: Deslizamentos planares das famílias B, E, G e J. Cunhas entre as famílias: G x C, J x I, E x J, J x B.

