

CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DA MINA VAU NOVO (SP) COM ÊNFASE NA ANÁLISE DE DESCONTINUIDADES

ROCK MASS CLASSIFICATION AND SLOPE STABILITY ANALYSIS OF VAU NOVO MINE (SP) WITH ENPHASIS IN THE DISCONTINUITIES ANALISIS

BRUNO HENRIQUE GRAMULHA PIRES

*Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
E-mail: bruno.pires@usp.br*

CAMILA DUELIS VIANA

*Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
E-mail: camila.viana@usp.br*

GINALDO ADEMAR DA CRUZ CAMPANHA

*Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
E-mail: ginaldo@usp.br*

RESUMO ASTRACT

O presente trabalho teve como objetivo a caracterização geológica e geotécnica da mina Vau Novo, localizada no município de Santana de Parnaíba - SP, onde a empresa Geocal Mineração Ltda. exerce atividades de mineração extraíndo rochas metacarbonáticas do Grupo São Roque. Os dados obtidos foram utilizados para a classificação geomecânica nos sistemas RMR (*Rock Mass Rating*) e SMR (*Slope Mass Rating*), e para a análise de estabilidade de taludes da cava atual e do projeto para a cava final. Com os resultados foi possível determinar a qualidade dos maciços através dos sistemas de classificação supracitados e identificar as famílias de descontinuidades mais problemáticas para a estabilidade dos taludes através da análise cinemática. Os sistemas de classificação não mostraram grandes diferenças em relação à classificação final, no entanto o SMR foi julgado mais adequado, por considerar quantitativamente a influência da orientação das descontinuidades. Com a análise de estabilidade, foi constatada a maior probabilidade de rupturas em cunha e tombamentos, sendo que a família mais problemática presente na mina é a foliação principal, com atitude média aproximada de 340/60 (rumo do mergulho / mergulho). Os taludes com maior risco de rupturas são aqueles subparalelos à foliação, aumentando a probabilidade de escorregamento em cunha e tombamentos com o aumento da inclinação do talude.

Palavras-chave: estabilidade, taludes, descontinuidades, classificações geomecânicas, mineração.

This study aimed the geological-geotechnical characterization of Vau Novo mine, located in Santana de Parnaíba - SP, where the Geocal Ltda. company exploits metacarbonate rocks from the São Roque Group. The data were used in order to classify the rock mass with the RMR (*Rock Mass Rating*) and SMR (*Slope Mass Rating*) systems, and for the slope stability analysis of the current pit and the design for the final pit. The results allowed determining the quality of the rock mass and identifying the most problematic sets of discontinuities for the slope stability. The rock classification systems did not show large differences in the final classification, however the SMR was considered the most appropriate because it weights quantitatively the influence of the discontinuities orientation. The stability analysis showed that wedge sliding and toppling are the most likely failure modes to occur. The most problematic set of discontinuities in the mine is the main foliation with an average 340/60 dip direction / dip attitude, and the slopes with increased risk of sliding are just the ones approximately parallel to the main foliation, increasing the chance of sliding with the increasing of the slope inclination.

Keywords: stability, slopes, discontinuities, geomechanical classifications, mining.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de estabilidade de taludes é essencial para o planejamento e desenvolvimento de qualquer empreendimento ou obra de engenharia onde há riscos geotécnicos envolvidos. Aliado à classificação geomecânica de maciços, este estudo se faz ainda mais necessário em cavas de mineração a céu aberto, uma vez que eventuais deslizamentos de rocha podem gerar prejuízos que variam desde a perda de produção devido a remoção do material até o risco de vida da equipe.

Assim, este trabalho teve como objetivo a classificação geomecânica de maciços rochosos nos sistemas RMR (*Rock Mass Rating*) e SMR (*Slope Mass Rating*) e a avaliação da estabilidade de taludes de corte através da análise cinemática na mina Vau Novo, onde a empresa Geocal Mineração Ltda. exerce atividades de lavra para a extração de metacalcários do Grupo São Roque, localizada no município de Santana de Parnaíba, região metropolitana de São Paulo (Figura 1).

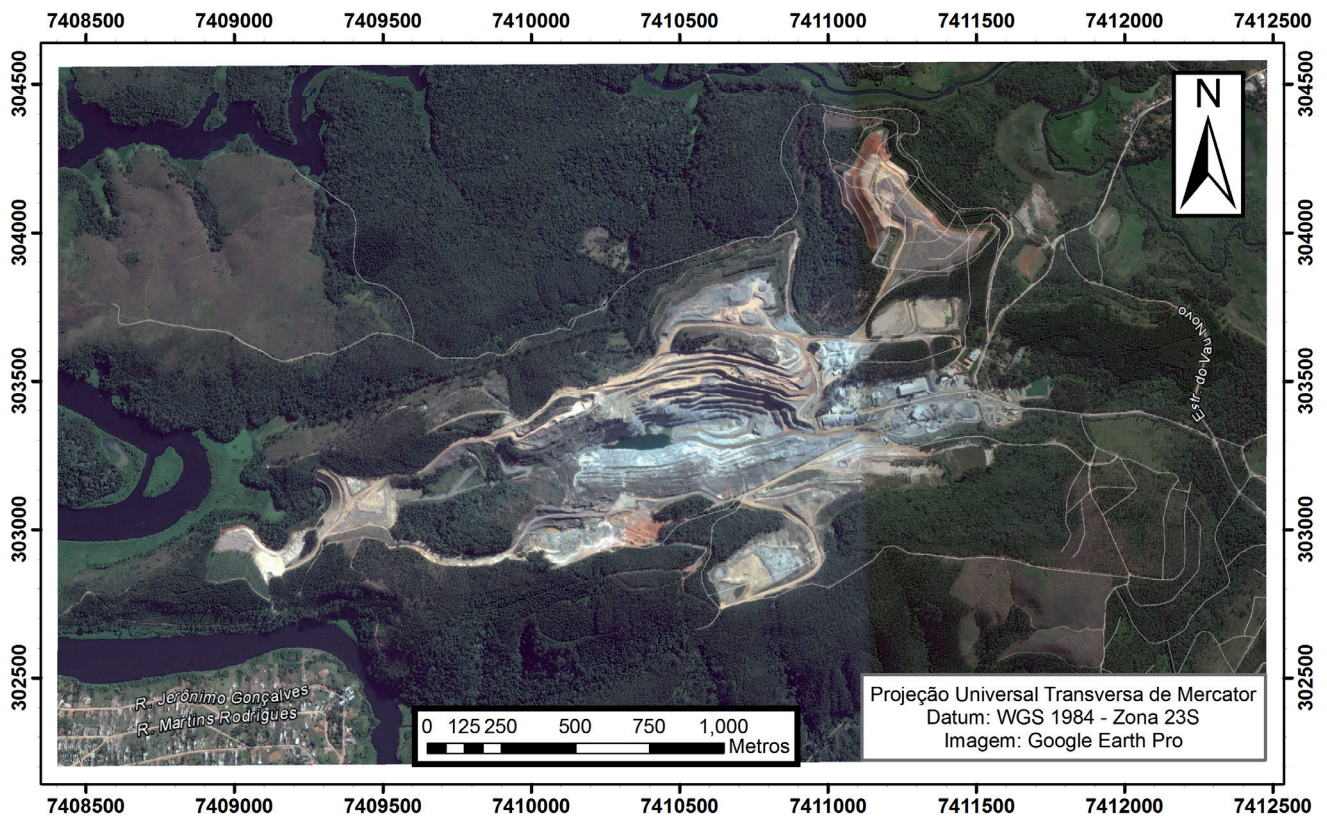


Figura 1. Localização da mina Vau Novo (Fonte: Google Earth Pro - 2016).

2 CONTEXTO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL LOCAL

A mina Vau Novo situa-se na região central da Província Mantiqueira (Almeida *et al.*, 1981), mais especificamente inserida no Grupo São Roque

(Oliveira, 1925, Henrique-Pinto *et al.*, 2015), de idade proterozóica, constituído por uma sequência metavulcanossedimentar delimitada, em conjunto com o Grupo Serra do Itaberaba (Juliani *et al.*, 1986), pelas zonas de cisalhamento Itu-Jundiuvira e Taxaquara (Hasui *et al.*, 1969) (Figura 2).

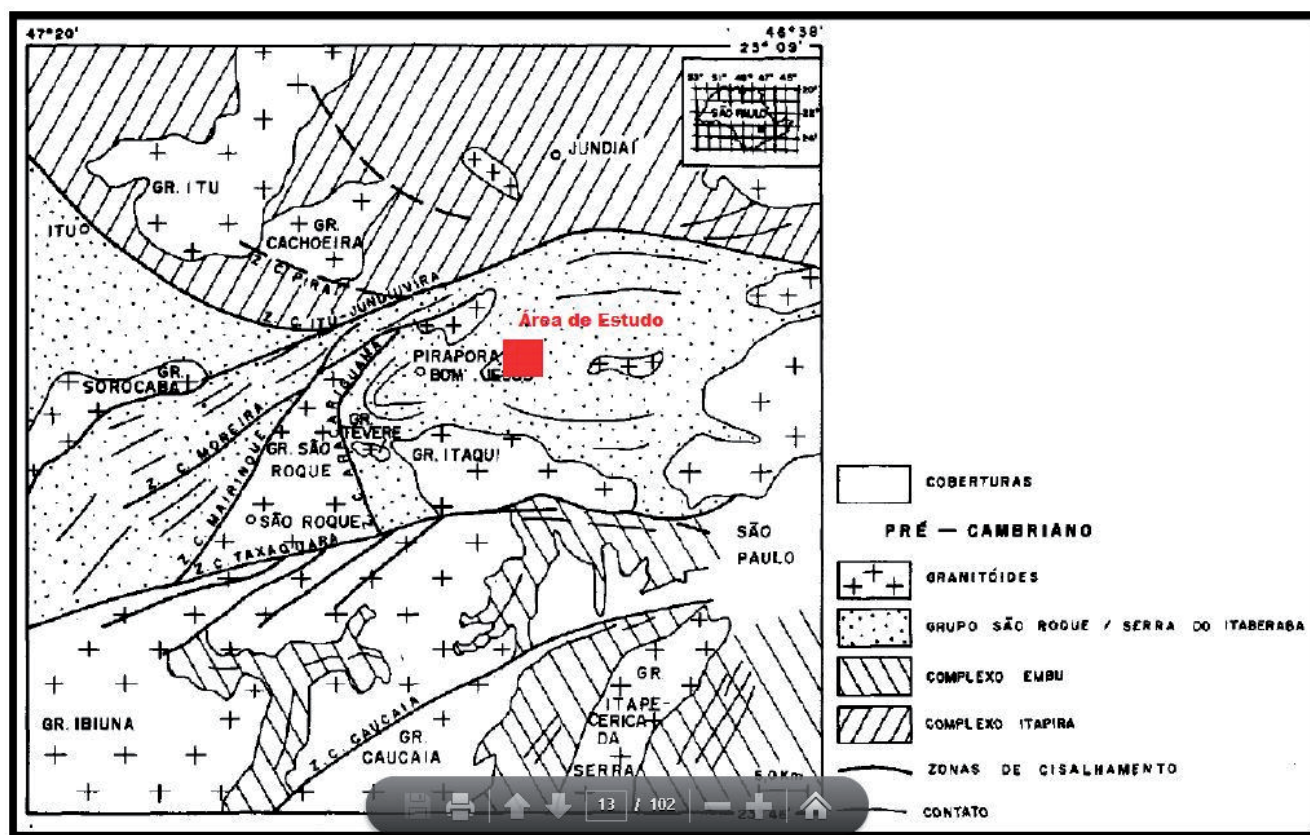


Figura 2. Mapa geológico regional: mostrando o contexto da área de estudo (Extraído de Hackspacher et al., 1993).

O Grupo São Roque apresenta um padrão estrutural complexo. A área de estudo está inserida no centro da estrutura regional conhecida como Sinclínório de Pirapora. Neste contexto Bistrichi (1982), considerou que o Grupo São Roque possui duas fases de deformação bem definidas, e uma terceira relacionada a dobramentos localizados. Relacionou a fase F1 com a geração de dobras fechadas e cerradas com clivagem ardosiana plano-axial. O mesmo autor define a segunda fase de deformação (F2) como a principal, sendo responsável pelas dobras da clivagem ardosiana e pela estrutura regional de maior ordem, com falhas inversas associadas. Esta fase de deformação apresenta eixos, no geral, sub-horizontais e planos axiais com direções que variam de N60E a E-W, nas proximidades da área de estudo. Já a fase F3 possui ocorrência restrita, sem influência na estrutura geral. Já Bergmann (1988) reconheceu cinco fases de dobramentos superimpostas, três delas sin a tardi-metamórficas e duas pós-metamórficas; as dobras recumbentes da segunda fase controlariam a geometria dos contatos entre as unidades

litoestratigráficas, gerando intensa repetição aparente das mesmas. A terceira fase de dobramentos é tardia ao metamorfismo, e desenvolveria clivagem plano axial espaçada; seguiriam duas fases pós-metamórficas, a fase do Sinclínório de Pirapora, com eixo mergulhante a N60-70E, e outra fase tardia em torno de NS-NNW.

Durante a etapa de mapeamento, as unidades litológicas aflorantes na cava foram identificadas como quartzito, metarritmito, metarenito com intercalações de metassiltito, brecha dolomítica, metarritmito carbonático, metassiltito homogêneo e metassiltito com intercalações de metarenito (Figura 3). Na litoestratigrafia do Grupo São Roque proposta por Bergmann (1988), a qual realizou o último mapeamento geológico de semidetalle abrangendo a área de estudo, os metacalcários da mina do Vau Novo estão incluídos na Formação Pirapora, e os demais metassedimentos na Formação Estrada dos Romeiros.

Com exceção ao quartzito e à brecha dolomítica, os litotipos mapeados apresentam bandamento composicional, com granulação fina a

média, diferindo-se, principalmente, pela predominância entre porções silto-argilosas e arenosas. O quartzito apresenta estrutura maciça e granulação fina a média, enquanto a brecha dolomítica aflora como uma rocha acinzentada escura, em geral não foliada, com fragmentos angulosos de dimensões variadas, de centimétricas a

decimétricas, com vênulas brancas de calcita irregulares e de tamanhos variados. No geral, as rochas apresentam grau de alteração mais elevado nas bancadas superiores, tornando-se mais frescas na região central da mina, onde o decapeamento está mais avançado.

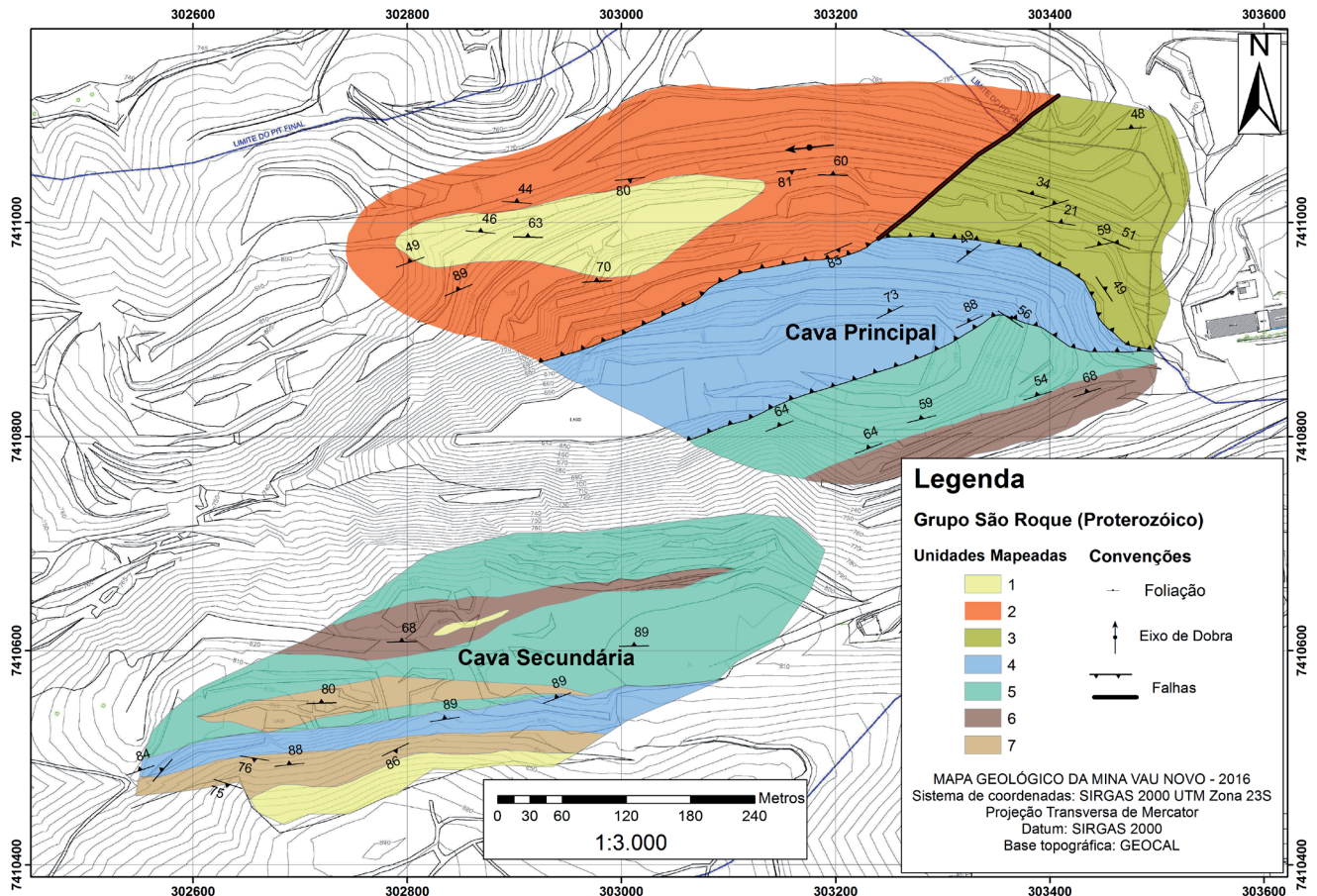


Figura 3. Mapa geológico da mina Vau Novo: 1 - Quartzito; 2 - Metarritmito; 3 - Metarenito com intercalações de metassiltito; 4 - Brecha dolomítica; 5 - Metarritmito carbonático; 6 - Metassiltito homogêneo; 7 - Metassiltito com intercalações de metarenito.

Na mina Vau Novo as rochas mapeadas apresentam estrutura geral na direção ENE-WSW, com mergulhos altos para norte, marcada pelo acamamento sedimentar paralelo a uma clivagem ardósiana ou xistosidade fina, caracterizando a foliação principal ($S_0//S_n$) (Figura 4). O acamamento é nítido principalmente nas rochas com bandamento composicional, e a xistosidade definida por minerais micáceos principalmente nas porções pelíticas, paralela ao acamamento.

O eixo central da mina do Vau Novo é condicionado por duas zonas de cisalhamento de ca-

ráter dúctil-rúptil que delimitam os contatos sul e norte da brecha dolomítica, a qual constitui o principal minério lavrado. Dobras fechadas a isoclinais, de amplitude decimétrica a decamétrica, podem ser observadas em algumas bancadas, afetando a foliação principal ($S_0//S_n$).

Ao plotar em diagrama Schmidt-Lambert os dados referentes a todos os litotipos mapeados (Figura 5), observa-se uma concentração preferencial com atitude 343/63 (rumo do mergulho / mergulho), correspondendo à atitude da foliação predominante na mina, embora haja um viés para

o metarritmico carbonático, onde foi possível coletar mais medidas e as mesmas não possuem grande variação. Os dados também sugerem o ajuste a uma guirlanda com eixo b com caimento 073/01;

esta conformação sugeriria um dobramento mais aberto da foliação principal ($S_0//S_n$), o qual é apenas observado na porção leste da cava principal, onde a foliação principal torna-se horizontal.



Figura 4. Vista geral da mina Vau Novo (Corte S-N) - Foliação principal ($S_0//S_n$) bem marcada no lado esquerdo, com mergulho para norte.

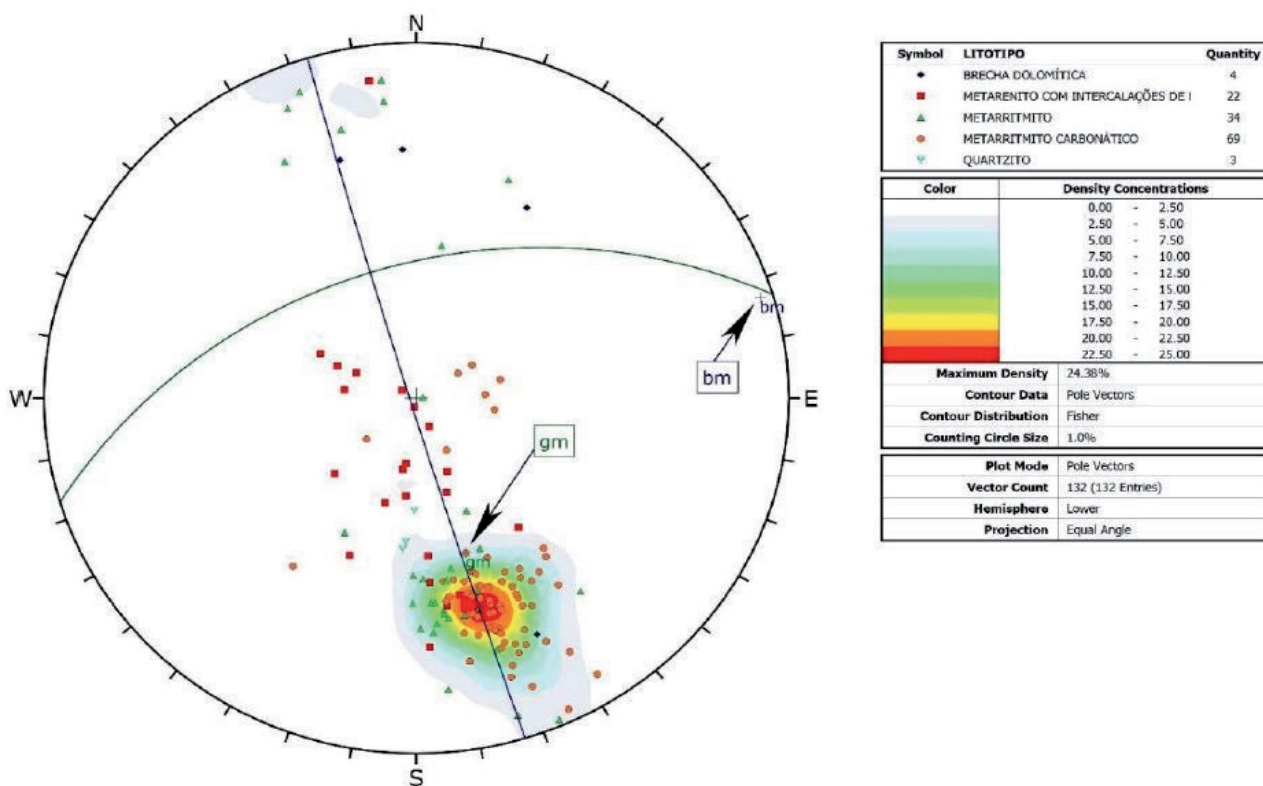


Figura 5. Polos das foliações dos litotipos mapeados. Em azul o plano com o melhor ajuste dos dados e seu eixo b inferido (bm), em verde o plano referente à média das medidas de foliação (gm). Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior.

Falhas mais tardias são também observadas, com dimensões variadas (decimétricas a decamétricas), geralmente caracterizadas por planos estriados e ondulados. O estereograma da Figura 6 mostra que as falhas tem direção preferencial ENE e mergulhos superiores a 50 graus para NNW e SSE. As estrias são em geral oblíquas com caimento para WSW. A maioria dos planos analisados não apresentavam indicadores cinemáticos confiáveis, sendo que alguns possuíam *steps* indi-

cando movimentação dextral. Uma zona de falha rúptil mais expressiva foi observada e mapeada no talude norte da cava principal. Apresenta espessura de zona deformada da ordem de 10 metros, com atitude aproximada 140/60, colocando em contato as unidades metarenito com intercalações de metassiltito e metarritmito, coalescendo-se na parte basal da cava principal com a zona de cisalhamento que limita a parte superior da brecha dolomítica.

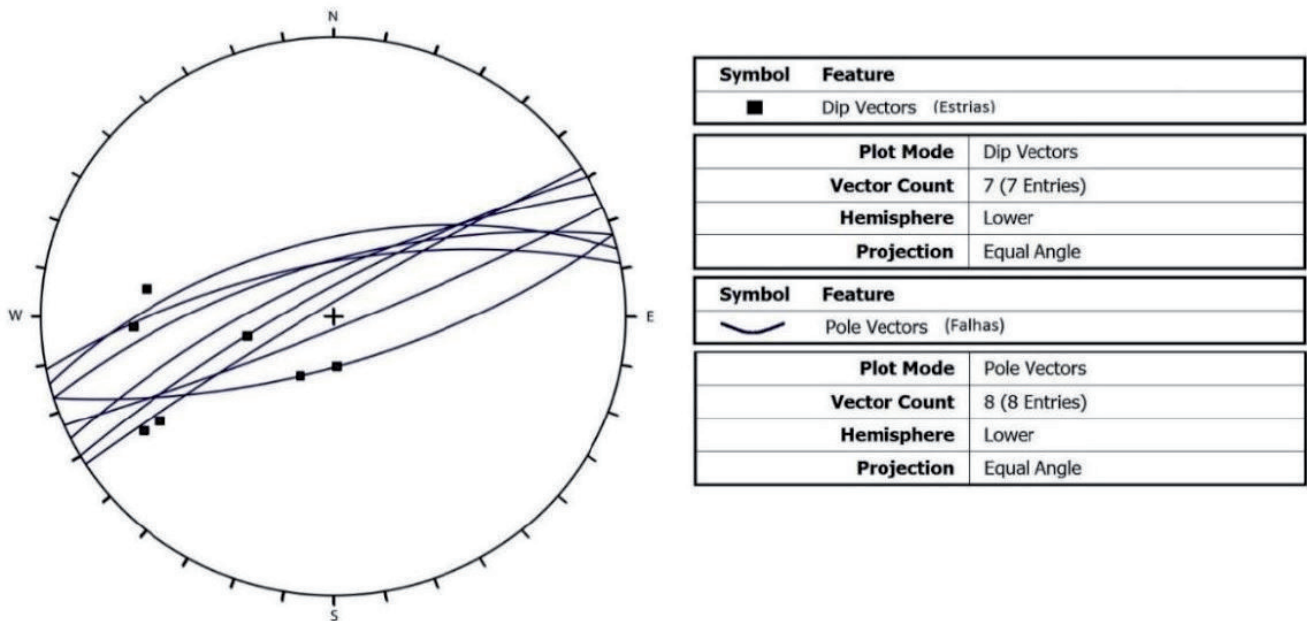


Figura 6. Estereograma com medidas de planos de falhas e estrias. Diagrama Schmidt-Lambert, hemisfério inferior.

3 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

Existem diversos sistemas de classificação de rochas desenvolvidos ao longo dos anos, desde a década de 70. Eles são uma maneira de avaliar o comportamento dos taludes de corte baseado em parâmetros estruturais e litológicos, descrevendo quantitativamente as condições do maciço rochoso (Pantelidis, 2009). Cada sistema possui características particulares e utiliza-se de diferentes parâmetros obtidos do maciço, sendo que os mais recorrentes são o espaçamento e frequência das descontinuidades, RQD (*Rock Quality Designation*) (Deere e Deere, 1989), orientação das descontinuidades, resistência da rocha, grau de alteração e presença de água.

Segundo Priest e Hudson (1981) o espaçamento médio (x) e a frequência (λ) de descontinuidades são dados pelas seguintes expressões:

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

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

onde: L é o comprimento da linha de amostragem e N é o número total de descontinuidades que interceptam a mesma.

O espaçamento médio é uma medida estatística utilizada para a classificação geomecânica que

não leva em consideração a orientação da linha de amostragem (*scanline*). O espaçamento real entre as descontinuidades da família, como mostrado na Figura 7, pode ser calculado pela expressão:

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

Onde: *dm* é o espaçamento médio da família medido ao longo da *scanline* e α é o ângulo entre a *scanline* e a família amostrada.

O RQD é um índice de qualidade baseado na modificação da porcentagem de recuperação de testemunhos de sondagem, onde são considerados apenas os fragmentos com comprimento superior ou igual a 100 mm. Matematicamente é expresso por:

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

Onde: *x_i* são os comprimentos dos fragmentos maiores ou iguais a 100 mm e *n* é o número destes fragmentos em um testemunho de comprimento.

Para aplicação em estudo de taludes, pode ser utilizada uma aproximação numérica para determinar o valor de um RQD “teórico” (RQD*), onde são consideradas as medidas dos espaçamentos entre as fraturas contidas em uma linha de amostragem (*scanline*). Para Deere e Deere (1989), apesar de ser impossível uma correlação direta, a mais apropriada é aquela proposta por Priest e Hudson (1976) onde o RQD* é calculado pela expressão:

$$RQD^* = 100 (\lambda t + 1) e^{-t\lambda}$$

Onde λ é a frequência de fraturas na linha de amostragem (número de fraturas dividido pelo comprimento da linha) e t é uma variável de corte que pode ser substituída por 0,1 para o cálculo do RQD* de 100 mm ou por outros valores para obter RQD* referente à fragmentos de outros comprimentos.

A resistência da rocha pode ser obtida utilizando-se o índice de compressão uniaxial (ISRM, 1978), podendo também ser estimada de acordo com propriedades físicas da rocha observadas em campo (Tabela 1).

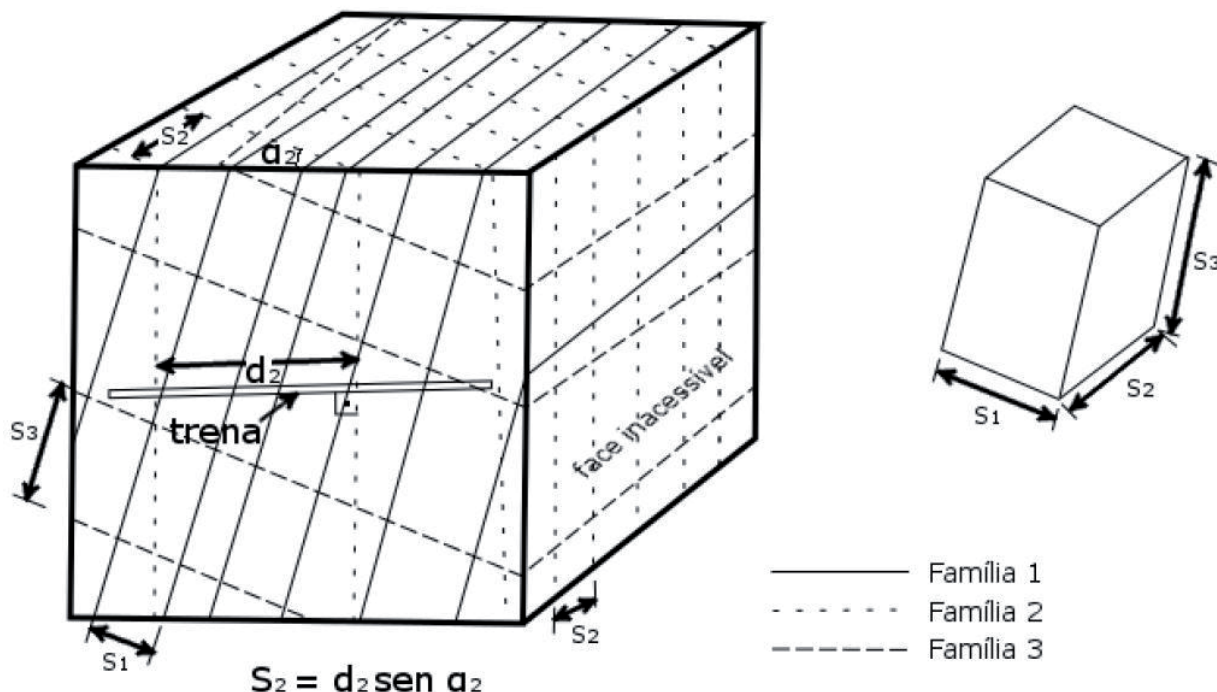


Figura 7. Exemplo para o cálculo do espaçamento real entre famílias de descontinuidades. Traduzido de IRSM (1978).

A rugosidade das paredes de uma descontinuidade é um componente essencial de sua resistência ao cisalhamento, especialmente em juntas não preenchidas, sendo quanto menor for a abertura dos planos de descontinuidade, maior será sua influência (ISRM, 1978). Este parâmetro pode ser determinado numericamente a partir de testes de inclinação nas superfícies da descontinuidade, resultando em um valor que representa o coeficiente de rugosidade da junta (JRC), apresentado no trabalho de Barton e Choubey (1977) ou por comparação com perfis esquemáticos utilizados em campo.

3.1 Sistema RMR

O Sistema RMR (*Rock Mass Rating*) (Bieniawski, 1973), originalmente desenvolvido para aplicação em túneis, é um dos mais utilizados e já passou por várias alterações, porém manteve o mesmo princípio ao longo do tempo. A classificação atual proposta por Bieniawski (1993) utiliza como parâmetros: resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, RQD, espaçamento das descontinuidades, condição das descontinuidades, presença d'água e orientação das descontinuidades.

Para sua aplicação, o maciço rochoso é dividido em regiões de características estruturais relativamente uniformes e cada região é avaliada de acordo com os parâmetros citados, sendo atribuídos pesos para a variação de cada um deles conforme mostrado na Tabela 2. Os pesos são somados resultando no valor do RMRb, onde é adicionado um fator relativo à orientação das descontinuidades, resultando no valor final do RMR. O resultado é utilizado para classificar o maciço em 5 classes diferentes: muito bom, bom, regular, pobre e muito pobre.

3.2 Sistema SMR

O valor do RMR sem o ajuste para a orientação das descontinuidades (RMRb) pode ser uti-

lizado no sistema SMR (*Slope Mass Rating*), proposto por Romana *et al.* (2003), que consiste em uma adaptação do sistema RMR para o estudo de taludes. Neste sistema é adicionado ao RMRb um ajuste referente à orientação relativa entre as descontinuidades e o talude, e outro referente ao método de escavação, segundo a equação:

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

(Romana *et al.*, 2003)

onde:

- RMRb é calculado de acordo com Bieniawski (1993);
- F_1 depende do paralelismo entre as descontinuidades e a direção do talude, de acordo com a equação $F_1 = (1 - \text{sen } A)^2$, sendo A o ângulo entre a direção do talude e as descontinuidades;
- F_2 representa o ângulo de mergulho da descontinuidade no modo de ruptura planar, segundo a equação $F_2 = \text{tg}^2 B_j$, onde B_j é o ângulo de mergulho da descontinuidade. Para rupturas do tipo tombamento, o valor de F_2 é constante, igual a 1,00.
- F_3 reflete a relação entre a face do talude e o mergulho da descontinuidade. Neste caso, os pesos apresentados pela classificação RMR são mantidos. No caso de rupturas planares, este valor reflete a probabilidade de a junta aflorar na face livre.
- F_4 é o fator de ajuste para o método de escavação, determinado empiricamente.

A partir dos valores dos quatro parâmetros apresentados, é possível obter-se o valor do SMR, que assim como na classificação RMR, deve ser calculado para cada família de descontinuidades. Os valores de classificação do SMR e os fatores de ajuste são apresentados na Tabela 3.

Tabela 1. Estimativa da resistência à compressão uniaxial de rochas. Traduzido de ISRM (1978).

Grau de Resistência	Descrição	Identificação de Campo	Resistência à compressão uniaxial aproximada (MPa)
R0	Rocha extremamente branda	Pode ser endentada pela unha	0,25 - 1,0
R1	Rocha muito branda	Esmigalha-se com um golpe firme do martelo geológico, pode ser riscada pelo canivete	1,0 - 5,0
R2	Rocha branda	É riscada por canivete com dificuldade, pode ser endentada superficialmente pela ponta do martelo geológico	5,0 - 25
R3	Rocha medianamente resistente	Não pode ser riscada pelo canivete. Amostras quebram-se sob um único impacto firme do martelo geológico	25 - 50
R4	Rocha resistente	Amostras requerem mais de um golpe do martelo geológico para quebrar	50 - 100
R5	Rocha muito resistente	Amostras requerem muitos golpes firmes com o martelo geológico para quebra	100 - 250
R6	Rocha Extremamente resistente	Amostras são apenas lascadas com o martelo geológico	> 250

Tabela 2. Parâmetros e pesos relativos para classificação geomecânica no sistema RMR. Traduzido de Bieniawski (1993).

Parâmetros		Valores e Pesos Relativos				
	Índice Puntiforme	10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 Mpa	Utilizar compressão simples
Resistência da rocha intacta	Compressão Simples	250 MPa	100-250 MPA	50-100 MPa	25-50 MPa	15-25 MPa 1-15 MPa 1 MPa
	Peso Relativo	15	12	7	4	2 1 0
RQD (<i>rock quality designation</i>)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25
	Peso Relativo	20	17	13	8	3
Espaçamento de fraturas		> 2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm
	Peso Relativo	20	15	10	8	5
Condições das fraturas		Superfícies muito rugosas; não contínuas; fechadas; paredes duras	Superfícies pouco rugosas; abertura <1mm; paredes duras	Superfícies pouco rugosas; abertura <1mm; paredes moles	Superfícies estriadas ou preenchimento < 5 mm ou abertura 1-5 mm; contínuas	Preenchimento mole > 5 mm ou abertura > 5 mm; contínuas
	Peso Relativo	30	25	20	10	0
Infiltração em 10 m de túnel		Nenhuma ou	< 10 ou	10-25 ou	25-125 ou	> 125 ou
Água Subterrânea	Relação: [pressão de água na fratura/ tensão principal máxima]	0 ou	< 0,1 ou	0,1-0,2 ou	0,2-0,5 ou	> 0,5 ou
	Condições gerais	Completamente seco	Úmido	Molhado	Água sob pressão moderada	Problemas sérios de água
	Peso Relativo	15	10	7	4	0
Ajuste para orientação das descontinuidades em taludes						
Direção e mergulho		Muito favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito desfavorável
	Peso Relativo	0	-2	-25	-50	-60
Classes do maciço rochoso						
Classe		I	II	III	IV	V
Descrição		Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito Pobre
Soma dos Pesos		100 - 81	81 - 61	60 - 41	40 - 21	20

Tabela 3. Fatores de ajuste e classes SMR. Traduzido de Romana *et al.* (2003).

Fatores de ajuste para as descontinuidades					
Caso	Muito favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito desfavorável
$P \mid \square_{\alpha} - \square_{\beta} \mid$					
$T \mid \left(\frac{\square_{\alpha} - \square_{\beta}}{180^{\circ}} \right) -$	$> 30^{\circ}$	$30 - 20^{\circ}$	$20 - 10^{\circ}$	$10 - 5^{\circ}$	$< 5^{\circ}$
$P/T \square_1$	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
$P \mid \square_{\alpha} \mid$	$< 20^{\circ}$	$20 - 30^{\circ}$	$30 - 35^{\circ}$	$35 - 45^{\circ}$	$> 45^{\circ}$
$P \square_2$	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
$T \square_2$	1	1	1	1	1
$P \square_{\alpha} - \square_{\beta}$	$> 10^{\circ}$	$10 - 0^{\circ}$	0°	$0 \text{ a } -10^{\circ}$	$< -10^{\circ}$
$T \square_{\alpha} + \square_{\beta}$	$< 110^{\circ}$	$110 - 120^{\circ}$	$> 120^{\circ}$	-	-
$P/T \square_3$	0	-6	-25	-50	-60

Onde: P, ruptura planar; T, tombamento; \square_{α} direção de mergulho da junta; \square_{β} direção de mergulho do talude; \square_{α} mergulho da junta; \square_{β} mergulho do talude.

Valores de F4 para ajuste ao método de escavação					
Método	Talude natural	Presplitting	Detonação suave	Detonação ou mecânico	Detonação deficiente
F4	+15	+10	+8	0	-8
Descrição das classes SMR					
Classe	SMR	Descrição	Estabilidade	Rupturas	Suporte
I	81 - 100	Muito bom	Completamente estável	Nenhuma	Nenhum
II	61 - 80	Bom	Estável	Alguns blocos	Ocasional
III	41 - 60	Normal	Parcialmente estável	Algumas juntas ou muitas cunhas	Sistemático
V	21 - 40	Ruim	Instável	Planar ou grandes cunhas	Importante/corretivo
V	0 - 20	Muito ruim	Completamente instável	Planares grandes ou circular	Reescavação

4 ESTABILIDADE DE TALUDES EM ROCHA

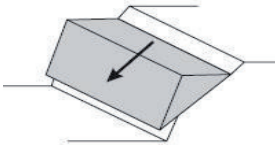
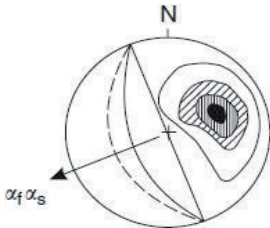
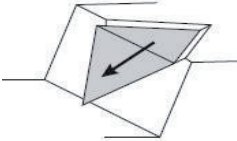
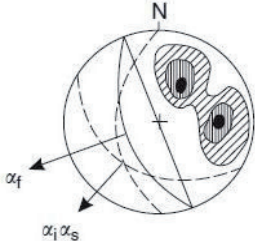
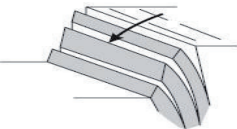
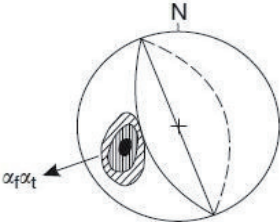
A estabilidade de taludes rochosos é fortemente influenciada pelo controle estrutural e litologia em questão, em especial as descontinuidades. Em geral as rupturas ocorrem preferencialmente ao longo destes planos de fraqueza, que podem ser estratificações, foliações, juntas e falhas. Assim, é essencial que estas descontinuidades sejam caracterizadas de forma adequada para uma análise de estabilidade confiável.

Diferentes tipos de rupturas estão associados a diferentes estruturas geológicas, podendo formar padrões de ruptura planar, em cunha, por tombamento ou circular (Wyllie e Mah, 2004). Essas rupturas podem ser reconhecidas através da análise geométrica, também conhecida como Teste de Markland (Markland, 1972), com o auxílio




de estereogramas, onde são plotadas medidas de atitude dos planos de descontinuidades e do talude (Tabela 4).

Assim, pode-se determinar a forma dos blocos gerados por intersecções de descontinuidades e a direção na qual eles podem deslizar, porém a análise permite chegar a conclusões apenas em relação à orientação, não sendo possível determinar espaçamentos, posição e dimensões. Também há possibilidade de rupturas circulares, geralmente em rochas muito alteradas, onde há grande quantidade de solo e muitas descontinuidades orientadas aleatoriamente, ou rochas muito fraturadas, que comportam-se como solos. Este tipo de ruptura não será detalhada neste trabalho uma vez que os estudos foram concentrados no maciço rochoso pouco alterado.

Tabela 4. Tipos de ruptura e condições de instabilidade. Traduzido de Wyllie e Mah (2004).

Tipo de Ruptura	Estereograma	Condições Estruturais
<p>Planar</p> 		<ul style="list-style-type: none"> - 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.
<p>Em Cunha</p> 		<ul style="list-style-type: none"> - 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.
<p>Tombamento</p> 		<ul style="list-style-type: none"> - 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_t Direção do mergulho da face do talude
 α_s Direção de deslizamento
 α_i Direção de tombamento
 α^i Direção do mergulho da linha de intersecção

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado o mapeamento dos litotipos aflorantes na mina com o objetivo de estabelecer o modelo geológico-estrutural adequado para a classificação geomecânica e análise de estabilidade de taludes. Para isso, foi utilizado como base um mapa topográfico em escala 1 : 2.000, resultante de levantamento realizado em outubro de 2015. As medidas de atitudes de camadas e das descontinuidades foram efetuadas com uma bússola COCLA em notação rumo de mergulho/mergulho e as coordenadas dos pontos de mapeamento foram obtidas com o auxílio de um aparelho GPS portátil Garmin eTrex 10.

Os dados referentes às descontinuidades foram coletados através de *scanlines* em trechos avaliados como representativos dos domínios es-

truturais. Este método consiste em colocar uma fita graduada paralela a face exposta do talude, onde são medidas as atitudes de todas as descontinuidades que a intersectam, e descritos os parâmetros necessários para classificação do maciço, como RQD*, espaçamento das descontinuidades, resistência da rocha, grau de alteração das paredes e presença de água. Os dados foram então organizados em planilhas *Excel* e lançados em projeção estereográfica, tendo suas frequências corrigidas de acordo com a orientação da linha de amostragem.

Os dados obtidos foram analisados no programa *Dips 6.0*, da empresa Rocscience. O *Dips 6.0* permite a análise cinemática através de estereogramas e a identificação dos possíveis tipos de ruptura.

6 RESULTADOS

6.1 Classificação geomecânica

A classificação geomecânica foi feita por litotipo, uma vez que foi observado em campo que as características estruturais do maciço va-

riam segundo este aspecto. Foram realizadas 5 *scanlines* na cava principal, em quatro litotipos diferentes. A escolha da localização das mesmas se deu pela facilidade de acesso nestas bancadas e por estarem em locais com pouca atividade de lavra (Figura 8).

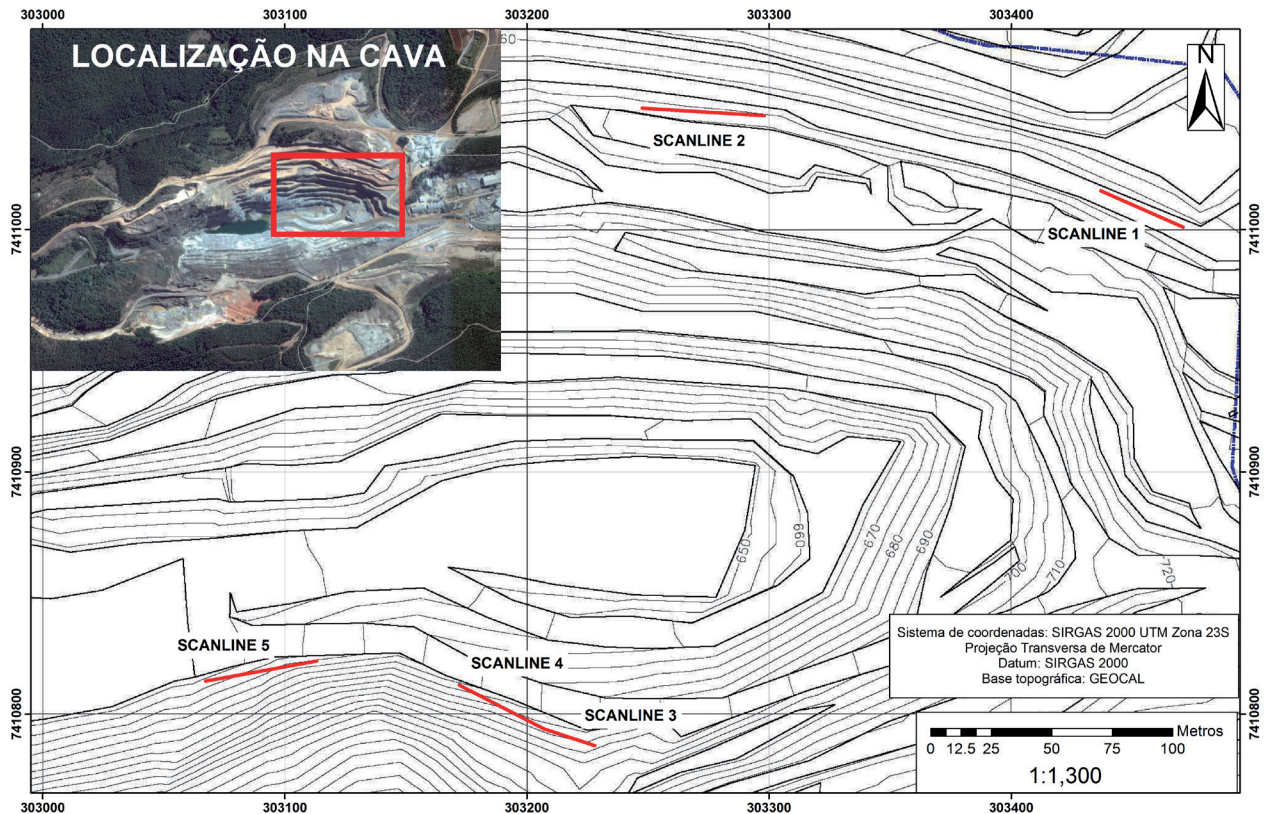


Figura 8. Localização das bancadas onde foram realizadas as *scanlines*.

6.1.1 Parâmetros para classificação

Para cada litotipo amostrado, foram calculados os pesos relativos para os parâmetros utilizados no sistema de classificação RMR e, com os resultados, aplicou-se as correções necessárias para a classificação no sistema SMR.

Os índices de resistência à compressão uniaxial foram estimados com base nas observações de campo (segundo os critérios da Tabela 1) e nos resultados de ensaios com Esclerômetro de Schmidt disponibilizados pela mineradora. Com os valores obtidos, os litotipos foram agrupados em classes, conforme os critérios sugeridos pela ISRM (1978) (Tabela 5).

Com base nos dados obtidos nas linhas de amostragem, foram calculados os parâmetros referentes à todas as famílias de descontinuidades presentes em cada *scanline*, incluindo frequência, espaçamento médio e RQD* para valores de 0,1 m, 0,3 m e 1,0 m (Tabela 6).

Em seguida, os dados foram corrigidos de acordo com a orientação das *scanlines* e projetados em diagramas de igual-área (rede de Schmidt-Lambert), definindo agrupamentos de famílias por *cluster* com raio de busca de 30°. Os parâmetros foram novamente calculados para cada família de descontinuidade, como mostra a Tabela 7.

Tabela 5. Classes de resistência à compressão uniaxial para os litotipos das *scanlines*.

Scanline	Litotipo	Resistência uniaxial da rocha intacta (MPa)	Resistência
Scanline 1	Metarenito com intercalações de metassiltito	25 - 50	R3
Scanline 2	Metarritmito	50 - 100	R4
Scanline 3 e 4	Metarritmito Carbonático	100 - 250	R5
Scanline 5	Brecha Dolomítica	100 - 250	R5

Tabela 6. Parâmetros referentes à todas as famílias de descontinuidades.

	Scanline 1	Scanline 2	Scanline 3	Scanline 4	Scanline 5
Frequência (fratura/ m)	3,232	1,015	2,047	0,976	1,060
Espaçamento médio (m)	0,309	0,985	0,488	1,024	0,943
RQD* 0,1 m (%)	95,778	99,518	98,170	99,553	99,476
RQD* 0,3 m (%)	74,697	96,204	87,341	96,463	95,898
RQD* 1,0 m (%)	16,710	79,016	39,337	74,447	71,370
Número total de dados	140	48	52	40	53

Observa-se que as *scanlines* 1, 2, 3 e 4 apresentam uma família com atitude aproximada 340/70, correspondente à foliação metamórfica predominante paralela ao acamamento ($S_0//S_n$). Este padrão não é reconhecido na Scanline 5, correspondente à brecha dolomítica, que mostra um padrão de faturamento irregular, com grande dispersão nas atitudes das descontinuidades, o que dificulta o agrupamento em famílias. Nota-se ainda que, apesar de as linhas de amostragem 3 e 4 terem sido feitas na mesmo litotipo, a primeira possui maior número de fraturas e famílias, o que pode ser explicado devido à proximidade ao contato com o metassiltito homogêneo, onde a foliação é mais intensa e marcante, ocorrendo também uma zona cisalhada no maciço.

As informações coletadas em campo mostraram que as descontinuidades de todas as *scanlines*

apresentam algumas características semelhantes: são consideradas fechadas, com abertura inferior a 2,5 mm, paredes duras, lisas a pouco rugosas, predominantemente sem preenchimento. Na unidade do metarenito com intercalações de metassiltito e no metarritmito há veios de quartzo milimétricos, porém sem representatividade suficiente para afetar a classificação geomecânica.

Em relação aos aspectos hidrogeológicos, não foi constatada a presença de nenhuma surgência de água nas faces dos taludes estudados. Para este trabalho não foi realizado monitoramento do nível d'água subterrâneo, assim, para efeito de classificação, foi considerado que o maciço encontra-se completamente seco. Ressalte-se que os levantamentos foram feitos essencialmente em época de estiagem.

Tabela 7. Parâmetros calculados para cada família de descontinuidade.

	Scanline 1					Scanline 2					Scanline 3					Scanline 4					Scanline 5				
Atitude do Talude (Dip/Dipin)	202/41					187/41					023/64					023/64					339/65				
Família	Sn	F1A	F1B	F1C	F1D	Sn	F2A	F2B	Sn	F3A	F3B	F3C	Sn	F4A	F4A	F5A	F5B	F5C	F5D						
Atitude média (Dip/Dipin)	312/71	270/82	331/05	176/89	225/73	347/67	161/73	251/70	341/70	075/72	031/14	195/64	340/60	029/75	016/80	052/90	304/65	098/82							
Frequência (fraturas/ m)	0,375	1,422	0,474	0,867	0,237	0,451	0,365	0,368	1,168	0,518	0,404	0,242	0,611	0,300	0,236	0,301	0,213	0,134							
Espaçamento médio (m)	2,665	0,703	2,111	1,154	4,221	2,219	2,741	2,720	0,856	1,931	2,474	4,135	1,637	3,337	4,236	3,326	4,701	7,442							
RQD* 0,1 m (%)	99,931	99,079	99,891	99,645	99,972	99,901	99,935	99,934	99,369	99,870	99,920	99,971	99,821	99,956	99,973	99,956	99,978	99,991							
RQD* 0,3 m (%)	99,412	93,114	99,081	97,153	99,759	99,164	99,443	99,435	95,123	98,911	99,321	99,749	98,513	99,620	99,761	99,617	99,805	99,921							
RQD* 1,0 m (%)	94,496	58,412	91,767	78,468	97,600	92,437	94,764	94,691	67,424	90,434	93,731	97,507	87,457	96,314	97,616	96,921	98,034	99,175							
Persistência	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	1-3 m	< 1 m	< 1 m	1-3 m	1-3 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m	< 1 m						
Número de dados	12	56	18	33	9	19	14	11	29	9	8	4	24	11	11	14	10	14	6						

6.1.2 Sistema RMR

Como proposto em ambos os sistemas de classificação, decidiu-se utilizar as famílias de descontinuidades com características mais desfavoráveis para a qualidade do maciço. As mesmas foram escolhidas com base na análise de estabilidade,

utilizando a família mais propícia para rupturas. Para efeito de classificação, foi considerada a atitude do talude onde as *scanlines* foram realizadas. Após o cálculo de todos os parâmetros necessários, foi atribuído o peso relativo proposto por Bieniawski (1993) para a família que define pior qualidade para cada *scanline* (Tabela 8).

Tabela 8. Pesos relativos para a classificação no sistema RMR.

Parâmetro	Scanline 1	Scanline 2	Scanline 3	Scanline 4	Scanline 5
Atitude do Talude	202/41	187/41	203/64	203/64	339/65
Atitude da Família	270/82	347/67	341/70	340/60	304/65
Resistência da rocha intacta	4	7	12	12	12
RQD* (<i>rock quality designation</i>)	20	20	20	20	20
Espaçamento médio de fraturas	15	20	15	20	20
Condições das fraturas	25	25	25	25	25
Água Subterrânea	15	15	15	15	15
RMRb	79	87	87	92	92
Ajuste para orientação das descontinuidades	-2	-25	-2	-2	-2
Total	77	62	85	90	90
Classificação	Bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom

Por se tratar de um parâmetro qualitativo e designado originalmente para túneis, o ajuste para a orientação das descontinuidades é de difícil aplicação neste estudo. Decidiu-se então basear o peso do parâmetro nos fatores de segurança obtidos com a análise de estabilidade, onde o metarritmo apresentou os piores resultados.

O resultado final mostra que o maciço encontra-se nas classes Bom e Muito Bom segundo a classificação RMR. É possível ainda observar uma correlação entre a qualidade do maciço e a profundidade das bancadas, com considerável

melhoria nas bancadas inferiores, onde as rochas encontram-se menos alteradas e mais resistentes.

6.1.3 Sistema SMR

A classificação no Sistema SMR foi feita com base no valor RMRb, utilizando as correções propostas por Romana *et al.* (2003) de acordo com as orientações das descontinuidades mais desfavoráveis para a qualidade do maciço. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Pesos relativos para classificação no sistema SMR.

Fator de Correção	Scanline 1	Scanline 2	Scanline 3	Scanline 4	Scanline 5
Atitude do Talude	202/41	187/41	203/64	203/64	339/65
Atitude da Família	270/82	347/67	341/70	340/60	304/65
F1 <i>Planar</i>	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
F1 <i>Tombamento</i>	0,15	0,40	0,15	0,15	0,15
F2 <i>Planar</i>	1	1	1	1	1
F2 <i>Tombamento</i>	0	0	-6	-50	0
F3 <i>Planar</i>	-25	0	-25	-25	-25
F3 <i>Tombamento</i>	-25	0	-25	-25	-25
(F1 x F2 x F3)	-3,75	0	-3,75	-7,5	-3,75
F4	0	0	0	0	0
RMRb	79	87	87	92	92
Total	75,25	87	83,25	84,5	88,25
Classificação	Bom	Muito Bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom

Dentro da classificação SMR o maciço também se enquadrava nas classes Bom e Muito Bom, com pouca probabilidade de rupturas, sendo mais provável que aconteça tombamento. Esta classificação, no entanto, não avalia a possibilidade de rupturas em cunha.

6.2 Análise de estabilidade de taludes

Assim como a classificação geomecânica, a análise de estabilidade de taludes também foi realizada para cada litotipo. Como os dados das *scanlines* 3 e 4 foram amostrados no metarritmito carbonático, os mesmos foram agrupados para a análise de estabilidade, sendo consideradas as famílias mais representativas de cada *scanline*.

Para a análise de estabilidade na cava atual foram consideradas 8 orientações de taludes glo-

bais e de bancada, obtidas através do mapa topográfico utilizado no mapeamento geológico-estrutural. Já para a geometria da cava final, foram consideradas as 5 atitudes dos taludes globais previstos no projeto da mina Vau Novo.

Tabela 10. Ângulos de atrito utilizados na análise de estabilidade para cada litotipo obtidos através de ensaios.

Litotipo	Ângulo de atrito (ϕ)
Metarenito com intercalações de metassiltito (Mta)	39,44
Metarritmito (Mtr)	24,69
Metarritmito Carbonático (Mrc)	40,19
Brecha Dolomítica (Dol)	35,34

Tabela 11. Orientações dos taludes da cava atual e as orientações previstas para a cava final utilizadas nas análises de estabilidade.

Talude	Cava atual		Talude	Cava Final	
	DipDir	Dip		DipDir	Dip
T1A	000	70	T1F	162	41
T2A	015	65	T2F	214	41
T3A	086	30	T3F	352	41
T4A	143	56	T4F	332	41
T5A	180	40	T5F	067	41
T6A	210	40			
T7A	255	50			
T8A	340	65			

Nas Tabelas 12 e 13 são apresentados os resultados da análise cinemática para a cava atual e a cava final, respectivamente. Em cada orientação de talude considerada, foi feita a análise para todos os litotipos amostrados nas *scanlines* em

relação aos mecanismos de ruptura planar, em cunha e tombamento.

Os taludes T3A, T5A e T6A da cava atual, não apresentaram potencial de ruptura para nenhum dos litotipos amostrados.

Tabela 12. Análise cinemática para orientações de talude da cava atual, mostrando número de ocorrência e famílias de descontinuidade envolvidas nos mecanismos de ruptura.

Talude	Litotipo	Planar	Estruturas	Cunha	Estruturas	Tombamento	Estruturas
T1A	Mta	0	-	1	F1A x Sn	1	F1C
	Mtr	1	Sn	2	F2B x Sn ; F2A x Sn	1	F2A
	Mrc	1	Sn	1	Sn x F4A	1	F3C
	Dol	1	F5A	2	F5B x F5C; F5C x F5D	1	F5A
T2A	Mta	0	-	1	F1A x Sn	2	F1C ; F1D
	Mtr	1	Sn	0	-	0	-
	Mrc	2	Sn; F4A	1	Sn x F4A	1	F3C
	Dol	1	F5A	1	F5C x F5D	1	F5A
T4A	Mta	0	-	0	-	1	Sn
	Mtr	0	-	0	-	0	-
	Mrc	0	-	0	-	1	Sn
	Dol	0	-	0	-	0	-
T7A	Mta	0	-	0	-	1	F1A
	Mtr	0	-	0	-	0	-
	Mrc	0	-	1	Sn x F3C	0	-
	Dol	0	-	0	-	0	-
T8A	Mta	1	Sn	1	F1A x Sn	1	F1C
	Mtr	1	Sn	1	Sn x F2B	1	F2A
	Mrc	1	Sn	1	Sn x F4A	0	-
	Dol	0	-	2	F5B x F5C; F5C x F5D	0	-

Tabela 13. Análise cinemática para orientações de taludes da cava final, mostrando número de ocorrência e famílias de descontinuidade envolvidas nos mecanismos de ruptura

Talude	Litotipo	Planar	Estruturas	Cunha	Estruturas	Tombamento	Estruturas
T1F	Mta	0	-	0	-	1	F1C
	Mtr	0	-	0	-	0	-
	Mrc	0	-	0	-	0	-
	Dol	0	-	0	-	0	-
T2F	Mta	0	-	0	-	0	-
	Mtr	0	-	0	-	0	-
	Mrc	0	-	0	-	0	-
	Dol	0	-	0	-	1	F5A
T3F	Mta	0	-	0	-	1	F1C
	Mtr	0	-	0	-	1	F2A
	Mrc	0	-	0	-	0	-
	Dol	0	-	1	F5C x F5D	0	-
T4F	Mta	0	-	0	-	0	-
	Mtr	0	-	0	-	0	F2A
	Mrc	0	-	0	-	0	-
	Dol	0	-	0	-	0	-
T5F	Mta	0	-	0	-	1	F1A
	Mtr	0	-	0	-	1	F2B
	Mrc	0	-	0	-	0	-
	Dol	0	-	0	-	1	F5B

Ressalta-se que esta análise com base na determinação estatística da atitude média das famílias principais de descontinuidades possui algumas restrições. Uma ou duas estruturas de maior persistência, eventualmente negligenciadas na análise estatística, desde que com as orientações adequadas, podem ser responsáveis por rupturas maiores do maciço rochoso. A presença de água nas descontinuidades, que não foi observada durante o levantamento, aumentaria a instabilidade do maciço, refletindo nos índices das classificações geomecânicas e diminuindo o ângulo de crítico de estabilidade nas avaliações das rupturas planares e em cunha.

7 CONCLUSÕES

A principal proposta deste trabalho foi abordar os parâmetros geotécnicos relevantes para a classificação geomecânica e análise de estabilidade de taludes, correlacionando-os com os aspectos geológicos. Desta forma, o mapeamento inicial foi de suma importância não só para o reconhecimento da Geologia e estruturação local, mas também para identificar os problemas relacionados à estabilidade, assim como as dificuldades para utilizar a metodologia escolhida.

O modelo geológico mostrou o forte controle estrutural presente na mina Vau Novo, levando a escolha da amostragem por litotipo, uma vez que os mesmos apresentam padrões próprios de fraturamento e deformação.

Os sistemas de classificação geomecânica escolhidos apresentaram resultados satisfatórios, sendo o sistema SMR considerado mais adequado para estudos envolvendo análise de estabilidade de taludes. Nos dois sistemas utilizados os maciços se enquadraram nas classes bom e muito bom, com pouca discrepância quando comparados os resultados finais.

A análise cinemática permitiu identificar que os maiores problemas em relação à estabilidade estão relacionados com a foliação principal das rochas e com os taludes com atitudes aproximadas à desta foliação. Dentre os mecanismos de ruptura observados, os mais recorrentes são por cunha e tombamento, condizente com os aspectos observados em campo. Na cava principal os maiores problemas estão nas regiões onde aflora o

metarritmito, provavelmente devido às condições de alteração do mesmo, também constatadas na classificação geomecânica.

REFERÊNCIAS

Almeida, F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck, R.A. 1981. Brazilian Structural Provinces: An Introduction.

Earth-Science Reviews, 17(1/2): 1-29.

Barton, N.R. e Choubey, V. 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. Rock Mech. 10(1-2), 1-54.

Bergmann, M. 1988. Caracterização Estratigráfica e Estrutural da Sequência Vulcano-Sedimentar do Grupo São Roque, na região de Pirapora do Bom Jesus - SP. (Dissertação) Mestrado. São Paulo: Instituto de Geociências - USP.

Bieniawski Z.T. 1973. Engineering classification of rock masses. Trans S. Afr. Inst. Civ. Eng., 15:335-44. Bieniawski, Z. T. 1993. Classification of rock masses for engineering: the RMR system and future trends. In:

Hudson, J.A. Comprehensive rock engineering. Londres: Pergamon Press (v. 3, p. 553-573).

Bistrichi C.A. 1982. Geologia do Sinclínorio de Pirapora, SP. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 92 p.

Deere D.U. e Deere D.W. 1989. Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years. US Army Corps Engrs Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station, 100 p.

Google Earth Pro 2016. Google Earth™, serviço de mapas.

Hasui Y., Penalva F., Hennies W.T. 1969. Geologia do Grupo São Roque. In: 23 CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Salvador. Anais... Salvador, p. 101-134.

Henrique-Pinto R., Janasi V.A., Vasconcellos A.C.B.C., Sawyer E.W., Barnes S.-J., Basei M.A.S., Tassinari

- C.C.G. 2015. Zircon provenance in meta-sandstones of the São Roque Domain: Implications for the Proterozoic evolution of the Ribeira Belt, SE Brazil. *Precambrian Research*, 256: 271-288.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests 1978. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences* 15: 319-368.
- Juliani C., Beljavskis P., Schorscher H.D. 1986. Petrogênese do vulcanismo e aspectos metalogenéticos associados: Grupo Serra do Itaberaba na região de São Roque (SP). In: 34 Congresso Brasileiro de Geologia, Goiânia. *Anais... Goiânia*, v.02, p.730-750.
- Markland, J. T. 1972. An useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. *Imperial College Rock Mechanics Research Report No. 19*, 10 pp.
- Oliveira E.P. 1925. *Analyses de Calcários*. Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil. Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio. *Boletim* 10: 1-45.
- Pantelidis, L. 2009. Rock slope stability assessment through rock mass classification systems. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46: 315-325.
- Priest S.D. e Hudson J.A. 1976. Discontinuity Spacings in Rock. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 13: 135-148.
- Priest S.D. e Hudson J.A. 1981. Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys. *Int. J. of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18: 183-197.
- Romana, M., Serón, J. B., Montalar, E. 2003. SMR geomechanics classification: application, experience and validation. In: *Proceedings of the international symposium on role of rock mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy. P.1-4.
- Wyllie, D. C., Mah, C. W. 2004. *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. Londres: Spon Press, 456