



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

*Northeast Geosciences Journal*

v. 7, n° 2 (2021)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID23403>



## USO DA FOTOGRAMETRIA DIGITAL TERRESTRE NA CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS FRATURADOS

Saulo Nunes Sant'Anna<sup>1</sup>; Pedro Manuel Alameda-Hernández<sup>2</sup>; Luís de Almeida Prado Bacellar<sup>3</sup>

USE OF TERRESTRIAL DIGITAL PHOTOGRAMMETRY IN THE CLASSIFICATION OF FRACTURED ROCK MASS.

<sup>1</sup>Mestre em geotecnia, NUGEO/Escola de Minas/UFOP, Ouro Preto/MG, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6134-2501>

Email: saulonugeo@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Dr, Departamento de Engenharia Urbana/Escola de Minas/UFOP, Ouro Preto/MG, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1830-1912>

Email: pedroalameda@ufop.edu.br

<sup>3</sup>DSc, NUGEO/Escola de Minas/UFOP, Ouro Preto/MG, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1670-9471>

Email: bacellar@ufop.edu.br

### Resumo

O presente trabalho visa discutir o uso de métodos de aquisição de dados geotécnicos de maciços rochosos. A área de estudo é uma pedreira de brita desativada, localizada na cidade de Belo Horizonte (Minas Gerais, Brasil), onde afloram gnaisses migmatizados, com constante queda de blocos. Os métodos de aquisição empregados foram o tradicional mapeamento de talude e o levantamento remoto por fotogrametria digital terrestre. A classificação de maciços *Slope Mass Rating* (SMR) foi aplicada. Os resultados evidenciaram diferenças nos *ranges* de detecção de estruturas e a fotogrametria se mostrou mais completa, com mais dados de descontinuidades do que o mapeamento tradicional, com exceção das estruturas oblíquas ao talude. Esta deficiência se explica pelo fato do talude estudado ser subvertical, sem reentrâncias e saliências, que permitem muitas vezes a detecção dos traços de descontinuidades e não dos planos. Contudo, mesmo nestes casos, a fotogrametria mostrou-se importante, por permitir a caracterização de todo talude, impossível pelo método tradicional. A classificação SMR mostrou baixos valores, indicando instabilidade por rupturas planares e em cunha do maciço em alguns pontos, o que coincide com as frequentes quedas de blocos.

**Palavras-chave:** Fotogrametria; Classificação de Maciços Rochosos; SMR.

### Abstract

The present work aims to discuss rock mass data acquisition methods. The study area is a deactivated gravel quarry, located in Belo Horizonte (Minas Gerais state, Brazil) where migmatized gneisses outcrop, with frequent rockfalls. The acquisition methods employed were the traditional slope mapping and remote method with digital terrestrial photogrammetry. The Slope Mass Rating (SMR) classification was applied. The results showed differences in the structures detection ranges, where the photogrammetry was more complete with more discontinuity data than traditional mapping, but with the exception of oblique structures. This deficiency is explained by the fact that the study slope is subvertical, without hollows and protrusions, which often allow the detection of discontinuity traces rather than planes. However, even in these cases, photogrammetry proved to be important as it allows the characterization of the entire slope, which is impossible by the traditional method. Low SMR values for planar and wedge failures coincides with the rockfall observation, in spite of overall stability.

**Keywords:** Photogrammetry; Rock Mass Classification; SMR.

UTILIZACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA DIGITAL TERRESTRE EN LA CLASIFICACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS FRATURADOS.

### Resumen

El presente trabajo discute el empleo de métodos de adquisición remota de datos geotécnicos de macizos rocosos. El área de estudio es una cantera de árido localizada en la región Este de la ciudad de Belo Horizonte, Minas Gerais (Brasil), con afloramiento de gneises migmatizados e desprendimientos frecuentes. Los métodos empleados fueron la adquisición de datos tradicional de contacto, y la remota con fotogrametría digital terrestre y foto aérea; con el objetivo de la caracterización de discontinuidades e identificación de estructuras lineares por fotointerpretación. Después de la validación, los datos fueron introducidos en la clasificación geomecánica Slope Mass Rating (SMR). Los resultados mostraron la mayor capacidad de la fotogrametría para obtener datos, con la salvedad de las

estructuras oblicuas al talud. Esta deficiencia se explica por el hecho de que el talud estudiado es subvertical y sin entrantes ni salientes que permiten muchas veces la detección de discontinuidades a través de los trazos. De todos modos, incluso en estos casos la fotogrametría se mostró útil, por permitir la caracterización de todo el talud, imposible con el método tradicional de contacto. La clasificación SMR mostró valores bajos a ruptura planar y en cuña, coincidiendo con los desprendimientos puntuales observados.

**Palabras-clave:** Fotogrametría; Clasificación de masas rochosas; SMR

## 1. INTRODUÇÃO

A caracterização de discontinuidades de um maciço rochoso é primordial para o melhor estudo da estabilidade de um talude. Compõem essa caracterização a definição de atributos dos maciços como aquelas propostas pela ISRM (1978), tais como: orientação, persistência, espaçamento, abertura, rugosidade das paredes e intemperismo. A aquisição desses dados é feita principalmente pelo mapeamento tradicional em frente ao talude, um método muito usado, mas que demanda muito tempo. Além disso, dependendo do local, o mapeamento tradicional pode ser inseguro pelo risco de quedas de blocos de rocha e dificuldade de acesso a afloramentos.

Recentemente, tem-se desenvolvido o uso de técnicas remotas de aquisição de dados, entre os quais destaca a Fotogrametria Digital Terrestre (FDT) (ALAMEDA-HERNÁNDEZ *et al.* 2017, BUYER *et al.*, 2016, TANNANT 2015, THOENI *et al.*, 2014, HANEBERG 2008, HANEBERG 2006). Estes trabalhos evidenciam as vantagens operacionais da FDT, principalmente quanto à velocidade na aquisição e processamento dos dados, segurança na execução de campo e baixo custo relativo a outros métodos remotos, como RADAR (*Radio Detection and Ranging*) e LiDAR (*Light Detection and Ranging*).

Birch (2006) define a FDT como a criação de dados 3D com origem de duas ou mais imagens 2D, em que um mesmo ponto em duas imagens são identificados, ou seja, as qualidades das fotos tomadas são fundamentais para um bom processamento fotogramétrico, e geração de nuvens de pontos bem definidas. A variação da luminosidade entre uma foto e outra podem gerar imagens 3Ds deficientes.

A FDT apresenta funcionalidades que quando aplicada a certos taludes, ou condições, podem apresentar restrições de detecção de estruturas, principalmente com as relações de direções do talude e das discontinuidades. Essas estruturas podem ser subquantificadas, quando comparada a levantamentos tradicionais de taludes.

Alguns autores usaram a FDT para classificação dos taludes (BUYER & SCHUBERT, 2016 e ALAMEDA-HERNÁNDEZ *et al.*, 2017), sempre classificados pelo método SMR (*Slope Mass Rating*), de Romana (1985).

A técnica da FDT terrestre é usada principalmente para identificação de atitudes, espaçamento e persistência de discontinuidades em maciços rochosos (ALAMEDA-

HERNÁNDEZ *et al.* 2017, HANEBERG 2008, TANNANT 2015), as demais características das discontinuidades (abertura, rugosidade das paredes, intemperismo e presença de água) têm que ser definidas pelo mapeamento tradicional, podendo resultar assim em classificação RMR (*Rock Mass Rating*) de Bienawski (1989).

O uso da FDT ainda é concentrado em grandes empresas, mineradoras, mas a viabilidade técnica do método pode ser atrativa para que prefeituras adotem em rotinas de caracterização de maciços rochosos, principalmente em áreas de riscos, como a estudada. A questão da segurança, com o mínimo contato com os taludes de técnicos, e o baixo custo relativo da ferramenta corrobora com a adoção da FDT, ao mesmo tempo sem desprezar a importância dos mapeamentos tradicionais, que devem ser sempre atualizados e consolidados em um banco de dados de parâmetros geotécnicos.

Estudos em pedreiras, semelhantes a esta área de estudo, requer também uma validação dos dados de orientação das discontinuidades, observando a natureza genética. Estas áreas passaram por desmontes, com utilização de explosivos, que podem gerar faturamento no maciço rochoso. Identificar se as famílias de discontinuidades individualizadas se enquadram em neste tipo de situação torna-se primordial para validação da caracterização geotécnica da área.

Esse estudo objetiva aplicar a FDT em uma pedreira antiga, com taludes praticamente verticais, onde afloram gnaisses migmatíticos pouco foliados e muito fraturados. Para validação, propôs-se a comparação dos dados adquiridos pelos métodos tradicionais de levantamento, com mapeamento do talude rochoso, dados adquiridos por FDT, e orientações de lineamentos fotointerpretados. Ao final, os dados foram validados e enquadrados em classificação geomecânica de maciços rochosos: RMR e SMR.

## 2. METODOLOGIA

A área de estudo está localizada na cidade de Belo Horizonte, capital do Estado de Minas Gerais, Sudeste do Brasil (Figura 1). No local está instalada uma pedreira de brita desativada há trinta anos, localizada na região periférica da cidade, no Bairro Mariano de Abreu. Hoje esse lugar serve como instalação de órgão municipal de apoio social de população carente, CRAS (Centro de Referência de Assistência Social) Mariano de Abreu. A pedreira, com área aproximada de 12.850 m<sup>2</sup>, apresenta taludes com alturas decamétricas, atingindo no máximo 30 metros. A crista da pedreira hoje está toda ocupada por habitações irregulares (Figura 2), algumas em situação de risco. A base dos taludes encontrasse isolada por cercas, pois é comum a queda livre de blocos de rocha junto ao pé do talude.

### 2.1. Geologia

A área de estudo está inserida no Complexo Belo Horizonte, que constitui o embasamento do Quadrilátero Ferrífero.

Localmente, a área é caracterizada por gnaisses migmatizados do Complexo Belo Horizonte, localizada próximo à falha de

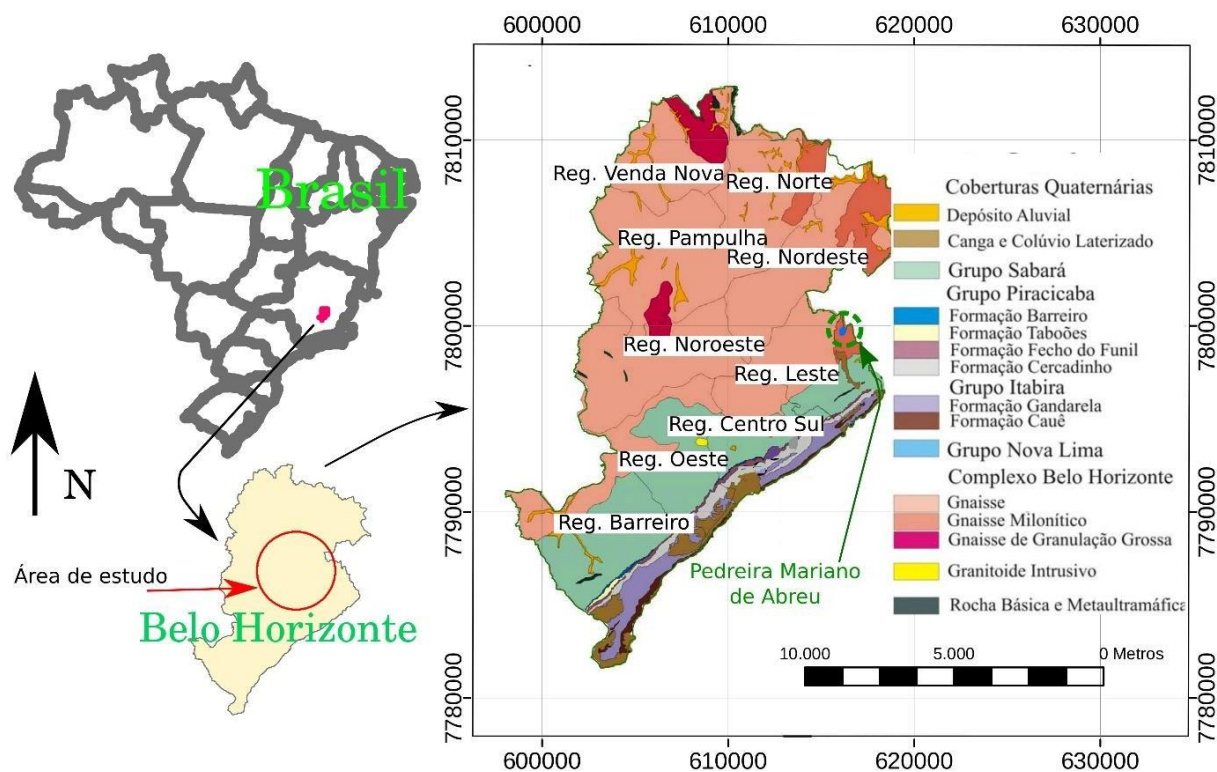


Figura 1 - Localização e mapa geológico da área de estudo, modificado de Parizzi (2004). Projeção Universal Transversa de Mercator; datum: SIRGAS 2000 – Zona 23S.



Figura 2 - Vista parcial da pedreira, modificado de Sant'Anna (2019).

empurrão de direção Norte-Sul, que sobrepõe rochas supracrustais do Quadrilátero Ferrífero (QF) sobre embasamento arqueano do Complexo Belo Horizonte (DORR, 1969).

Os gnaisses do Complexo Belo Horizonte apresentam uma evolução estrutural policíclica, com vários eventos tectônicos de diferentes regimes, o que pode explicar a grande variação de

orientações de descontinuidades mapeadas nessa unidade (NOCE *et. al.* 1994).

Por serem rochas com poucos problemas geotécnicos, em relação às supracrustais do QF aflorantes na região, existem poucos trabalhos de classificação geotécnica ou cinemáticos relativos aos gnaisses do Complexo Belo Horizonte. Alguns disponíveis, como Parizzi (2004) e Reis Jr. (2016), classificam estes maciços como de boa qualidade pelo sistema RMR (BIENIAWSKI, 1989) e identificam até quatro famílias de descontinuidades em locais próximos a área estudada.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Fotointerpretação de aerofotos

Inicialmente, foi feita a fotointerpretação da região estudada com aerofotos (Escala 1:30.000) datada da década de 50, quando a região ainda era pouco ocupada. Sendo a área de estudo uma pedreira, foi importante verificar se as estruturas planares existentes são de origem tectônica ou antrópica (pela ação de explosivos).

Para isso compararam-se os lineamentos identificados na fotointerpretação e as famílias de descontinuidades individualizadas nos trabalhos de mapeamento e FDT.

#### 3.2. Aquisição de dados geotécnicos

Para fins operacionais, dividiu-se a aquisição dos dados em duas etapas distintas. Inicialmente, mapeando-se o talude de forma convencional com caracterização de parâmetros geomecânicos numa janela em torno de um ponto. Posteriormente, com tomada de fotos orientadas para análises fotogramétricas em seções. Para fins de comparação destes dois métodos de aquisição, os pontos mapeados e locais fotografados foram os mesmos e estão dispostos na Figura 3, identificadas respectivamente como Pontos e Seções.



Figura 3 - Localização das seções fotogramétricas e dos pontos mapeados manualmente. Mapa base do Google Earth, 15 de maio de 2018, com coordenadas geográficas.

Toda a caracterização geomecânica do maciço foi realizada em seis pontos selecionados ao longo da pedreira.

Assim foram coletados dados de orientações de todas as discontinuidades presentes, já atentando para a identificação das famílias estruturais. Todas as medidas foram realizadas com uso de uma bússola *Brunton Clar Transit*. Em média, foram coletadas cinquenta medidas de discontinuidades por ponto.

As medidas de persistência e espaçamentos das discontinuidades foram feitas com fitas métricas, já as aberturas com escalas milimetradas. A resistência da rocha foi testada com uso do martelo geológico *Estwing* e classificada segundo as recomendações da *ISRM* (1978). As demais características, rugosidade, grau de intemperismo e material preenchimento

foram valoradas conforme classificação *RMR*(básico) (*BIENIAWSKI*, 1989). A questão da presença de água no maciço rochoso variou muito de acordo com o dia de mapeamento. Foram verificados dias em que o maciço estava completamente seco e outros úmidos, com água escorrendo nas fraturas. Além da influência da chuva, existe também água proveniente das habitações situadas junto a crista do talude, provavelmente relacionada às fossas vazando, ou às águas servidas.

O parâmetro *RDQ* foi estimado a partir de medidas em linhas de varredura conforme metodologia proposta por *Priest & Hudson* (1976).

Os locais escolhidos para fotografar o talude podem ser definidos como: mais próximo ao talude, como na Seção 2, e dois mais afastados, identificados como Seções 1 e 3. A Seção 3 consistiu de um conjunto de 18 fotos tomadas a 50 metros do talude, por questões operacionais o conjunto de fotos resultantes 3D foram divididas em 2 grupos, definidos como mosaicos. Portanto, nos resultados da *FDT* vão ser descritos o mosaico 1 (porção mais ao Sul do talude, relativo ao ponto 4) e mosaico 2 (porção mais ao norte do talude, relativo ao ponto 5).

O procedimento empregado para tomada de fotos foi a sugerida por *Alameda-Hernández et al.* (2017), e usada por *Lacerda* (2019). Desta forma, as relações de medidas entre talude e posição da máquina fotográfica serviram somente para estabelecer a distância entre uma foto e outra. Com esse procedimento, pretendeu-se verificar a validade de um método mais rápido de tomada de fotos, até mesmo sem o uso de ponto de controle.

Para a fotogrametria utilizaram-se os seguintes materiais: tripé, com nível de bolha acoplado; máquina fotográfica (réflex digital com objetivos de distância focal 24mm e 50mm); bússola *Clar*; Software *Sirovision 6.2.0.13* (*CSIRIO* em Melbourne, Vic, Austrália).

Nas Seções 1 e 3, adotou-se a tomada de fotos com diferentes inclinações em relação à superfície do talude. Assim, obteve-se fotos desde o pé até próximo da crista do talude, compondo um único mosaico.

Geradas as imagens 3D, foi possível definir os mosaicos de fotos, montadas manualmente com o software *Sirovision*. Um mosaico satisfatório apresenta uma nuvem de pontos adensadas, que irá subsidiar o reconhecimento e análise de discontinuidades marcadas no modelo fotogramétrico. Com a geração de mosaicos (Figura 4), as discontinuidades foram reconhecidas com planos, quando se visualizou a superfície da discontinuidade; e como traços, quando se visualizou apenas o traçado da discontinuidade.

Marcadas todas as estruturas planares, procurou-se definir as famílias de discontinuidades, com os respectivos espaçamentos e persistências. Como as fotos/mosaicos não foram georeferenciados, para a atitude real e dimensão das estruturas planares é necessário adequar a escala e orientação, comparando-se pontos notáveis identificados em campo e no modelo gerado, com a orientação do talude ou de uma discontinuidade em campo e representada no modelo fotogramétrico. Os dados das análises foram exportados para o software *Dips 7* (*Rocscience* em Toronto – ON; Canadá), para análises cinemáticas de cada família de discontinuidades, verificando a possibilidade de rupturas planares, em cunha e tombamento.

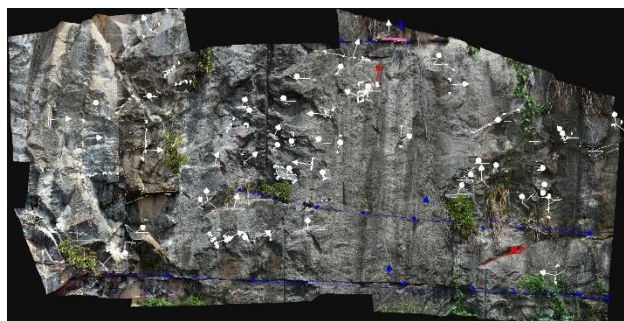


Figura 4 – Mosaico gerado na seção 2, com os planos e traços identificados. Desenvolvido no software Sirovision. Modificado de Sant'Anna (2019).

### 3.3. Cálculo do RMR e SMR do talude

Com os dados obtidos, as seções e pontos do talude foram enquadradas nas classificações de maciços rochosos RMR e SMR. A classificação RMR é muito conhecida e os procedimentos de aplicação podem ser vistos em Bieniawski (1989) e não serão aqui descritos. Para este trabalho somente foi calculado o RMR<sub>básico</sub>, sem o parâmetro relativo à orientação. A orientação será analisada na proposta complementar do SMR (de Romana (1985), mais recomendável para taludes). O índice SMR é obtido através do valor de RMR<sub>básico</sub> adicionado a um ajuste calculado pelas relações entre orientações do talude e descontinuidade, representados pelos índices F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub> e F<sub>4</sub>.

O primeiro passo foi definir as famílias de descontinuidades a partir das atitudes coletadas pelo mapeamento tradicional e via FDT.

A definição das famílias foi feita no programa Dips 7.0, gerando-se estereogramas de representação de polos das medidas, observando a maior concentração de atitudes, ou mesmo no caso da FDT definida pelo próprio SIROVISION. Os dados formam englobados para o cálculo do RMR<sub>básico</sub>.

De acordo com a definição de famílias de descontinuidades e análise de compatibilidade cinemática, para rupturas planares, cunha e tombamento flexural, definiram-se os parâmetros angulares para cálculo dos fatores (F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> e F<sub>3</sub>) do sistema SMR (ROMANA, 1985). Para o fator F<sub>4</sub>, adotou-se valor 0, por escavação a fogo convencional. F<sub>1</sub> e F<sub>2</sub> foram definidos segundo equações (1 e 2) propostas por Romana (1985):

$$F_1 = (1 - \sin \alpha_j - \alpha_s)^2 \quad (1)$$

Onde:

$\alpha_j$  – direção do mergulho da descontinuidade; ou *trend* da interseção para ruptura em cunha.

$\alpha_s$  – direção do mergulho do talude.

$$F_2 = \tan^2 \beta_j \quad (2)$$

Onde:

$\beta_j$  – ângulo de mergulho da descontinuidade.

Para os casos de ruptura em cunha e por tombamento F<sub>2</sub>=1. E F<sub>3</sub> foi definida pelas equações (3, 4 e 5) propostas por Tomás et al (2007):

Ruptura planar:

$$F_3 = -30 + \frac{1}{3} \arctan(\beta_j - \beta_s) \quad (3)$$

Ruptura em Cunha:

$$F_3 = -30 + \frac{1}{3} \arctan(\beta_i - \beta_s) \quad (4)$$

Ruptura por Tombamento Flexural:

$$F_3 = -13 + \frac{1}{7} \arctan(\beta_j + \beta_s - 120) \quad (5)$$

Onde:

$\beta_s$  – ângulo de inclinação do talude

$\beta_j$  – ângulo de inclinação da intersecção dos planos (ruptura em cunha).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os lineamentos de drenagem identificados em foto aérea na região da pedra (Figura 5) mostram grande variação de orientações, com predomínio das seguintes direções: E-W e NNW-SSE, e, com menor expressão, NE-SW e NNE-SSW.

A caracterização do maciço rochoso na pedra evidenciou também grande dispersão de medidas de descontinuidades, conforme será verificado a seguir. Para simplificar a análise de fraturas, definiram-se famílias de descontinuidades com dados de todos os pontos mapeados e seções fotogramétricas interpretadas. Posteriormente, essas famílias foram comparadas com os dados estruturais encontrados em cada ponto e seção fotogramétrica, separadamente. Assim, com total de 301 medidas tomadas no mapeamento obtiveram-se cinco famílias de descontinuidades (Figura 6 e Tabela 1). Já a quantidade de medidas obtidas pela FDT foi maior, com total de 370, sendo possível individualizar três famílias de descontinuidades (Figura 7 e Tabela 2).

Como observado na Figura 3, com a proximidade entre os pontos mapeados de tomada de fotos, pode-se correlacionar os pontos com os levantamentos fotográficos da seguinte forma: ponto 1 com a Seção 2, o ponto 2 com a Seção 1, os pontos 4 e 5 com a seção 3.

Concentrações de medidas de atitude, agora de forma espacialmente localizadas, fez com que fossem definidas novas famílias de descontinuidades, distribuídas de acordo com a ocorrência no maciço. Assim para os pontos mapeados as famílias J6 e J7 ocorrem com mais concentração nos Pontos 4 e 5. O mesmo pode-se verificar na fotogrametria da Seção 3, com as

famílias F4 e F5. Visto as correlações, os diagramas de Schmidt e tabelas são referenciadas da seguinte forma: Ponto 1 e Seção 2 (Figura 8 e Tabela 3); Ponto 2 e Seção 1 (Figura 9 e Tabela 4); Ponto 4 e Seção 3 – Mosaico 1 (Figura 10 e Tabela 5) e Ponto 5 e Seção 3 – Mosaico 2 (Figura 11 e Tabela 6).

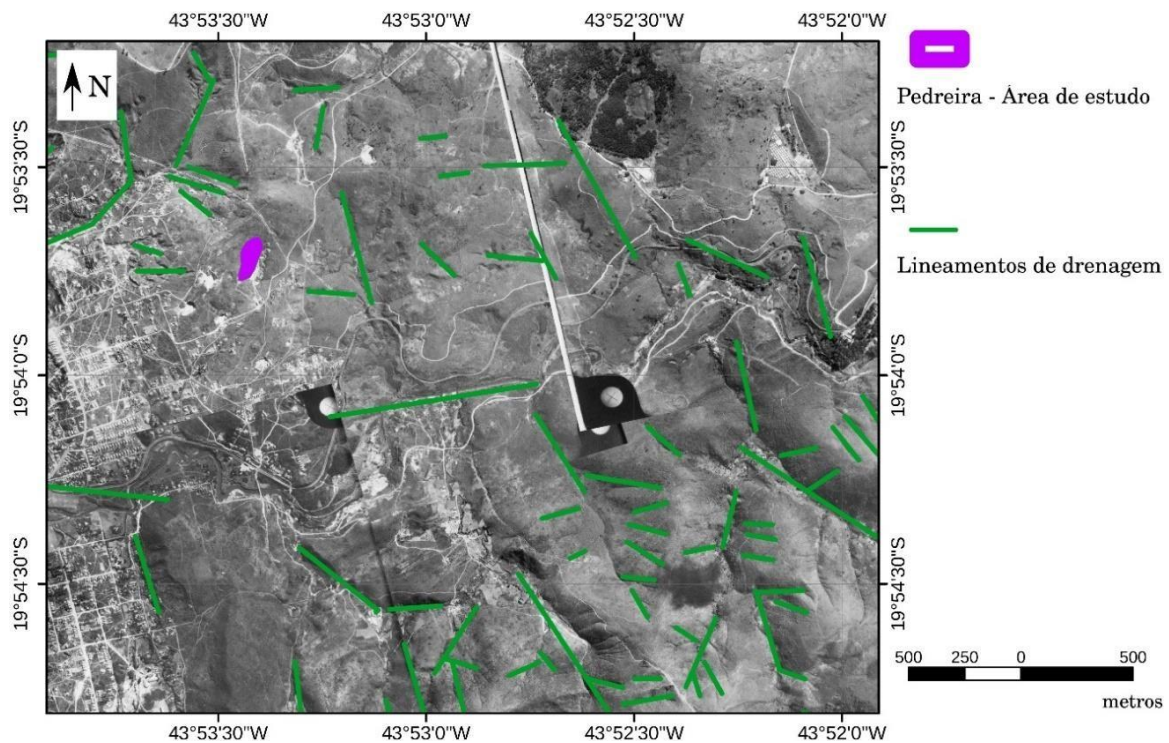


Figura 5 - Fotointerpretação de lineamentos de drenagens na região da pedreira Mariano de Abreu. Mapa base: Mosaico de aerofotos do levantamento aerofotogramétrico de Belo Horizonte, ano:1953). (Modificado de SANT'ANNA, 2019).

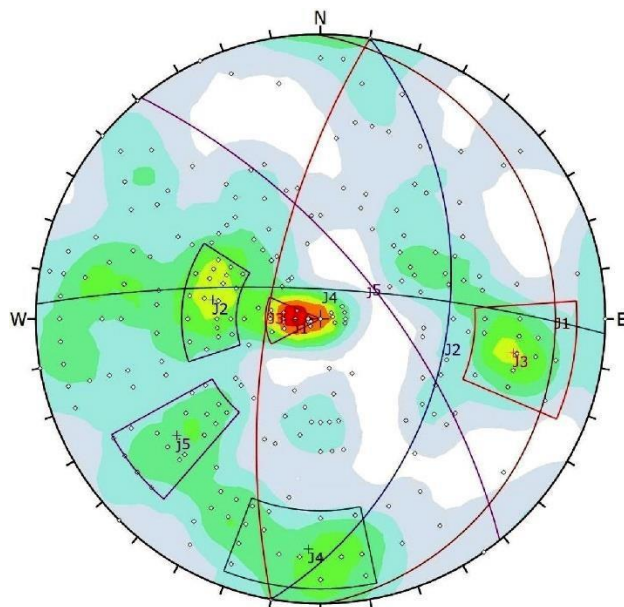


Figura 6 - Projeção de Schmidt dos polos das 301 descontinuidades mapeadas com o procedimento tradicional para a definição das famílias de descontinuidades: J1 com maior concentração do que as outras famílias. Modificado de Sant'Anna (2019).

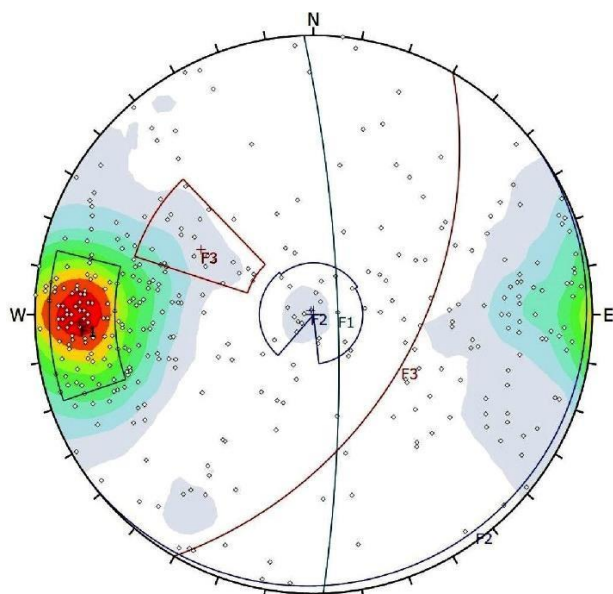


Figura 7 - Projeção de Schmidt dos polos das 370 descontinuidades mapeadas com TDP para a definição das famílias de descontinuidades: F1 com maior concentração do que as outras famílias. Modificado de Sant'Anna (2019).

Tabela 1 - Famílias de descontinuidades de área da pedreira, segundo mapeamento de campo. (Sant'Anna, 2019).

Família	Dip Direction	Dip
J1	089°	11°
J2	100°	42°
J3	280°	69°
J4	003°	78°
J5	051°	66°

Tabela 2 - Famílias de descontinuidades de área, segundo fotogrametria. (Sant'Anna, 2019).

Família	Dip Direction	Dip
F1	088°	80°
F2	143°	02°
F3	120°	50°

Tabela 3 - Medidas estruturais de famílias de descontinuidades do Ponto 1 e seção fotogramétrica 2. (SANT'ANNA, 2019)

Ponto 1			Seção 2		
Família	Dip Direction	Dip	Família	Dip Direction	Dip
J1	095°	01°	F1	096°	72°
J2	090°	45°	F2	243°	01°

Tabela 4 - Medidas estruturais de famílias de descontinuidades do Ponto 2 e seção fotogramétrica 1. (SANT'ANNA, 2019).

Ponto 2			Seção 1		
Família	Dip Direction	Dip	Família	Dip Direction	Dip
J2	103°	33°	F1	096°	72°
J3	265°	50°			
J5	051°	55°			

Tabela 5 - Medidas estruturais de famílias de descontinuidades do Ponto 4 e seção fotogramétrica 3 – Mosaico 1. (SANT'ANNA, 2019).

Ponto 4			Seção 3 – Mosaico 1		
Família	Dip Direction	Dip	Família	Dip Direction	Dip
J1	086°	06°	F1	095°	80°
J2	101°	42°	F2	165°	03°
J4	35°	82°	F4	282°	48°
J6	213°	36°			

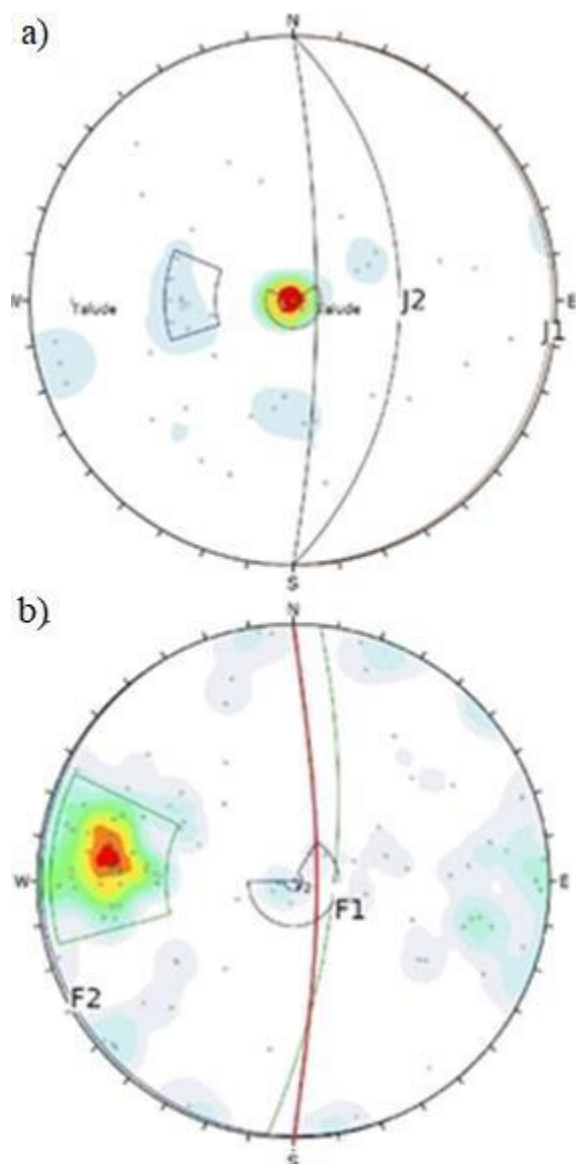


Figura 8 – Projeção dos polos das discontinuidades para: a) ponto 1 e b) seção 2. Modificado de Sant'Anna (2019).

Tabela 6 - Medidas estruturais de famílias de discontinuidades do Ponto 5 e Seção fotogramétrica 3 – Mosaico 2. (SANT'ANNA, 2019).

Ponto 5			Seção 3 – Mosaico 2		
Família	Dip Direction	Dip	Família	Dip Direction	Dip
J3	281°	69°	F1	095°	80°
J7	099°	67°	F5	260°	67°
			F4	103°	32°

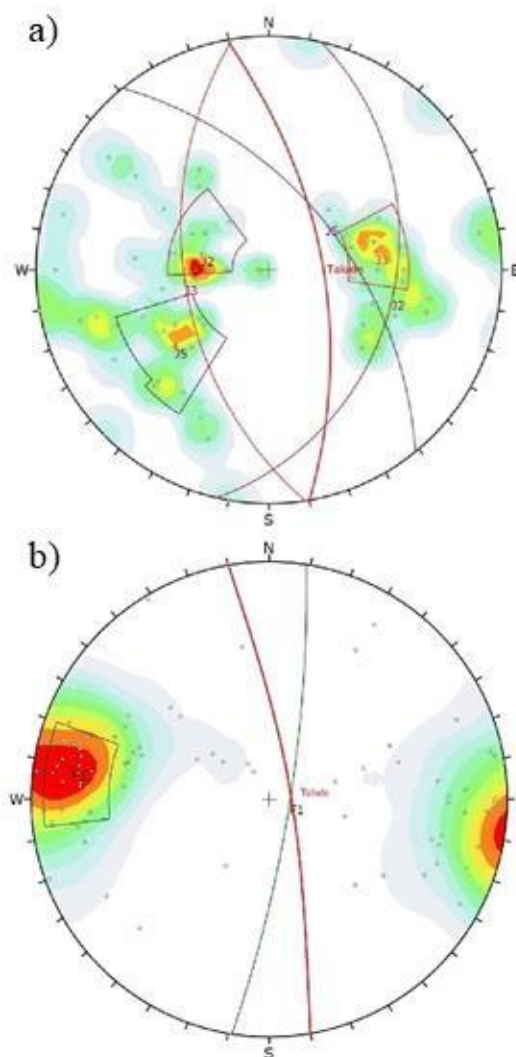


Figura 9 – Projeção dos polos das discontinuidades para: a) ponto 2 e b) seção 1. Modificado de Sant'Anna (2019)

Como pode-se observar, existe uma grande dispersão espacial das discontinuidades. Como se trata de uma pedreira, é necessário verificar se todas as famílias de discontinuidades identificadas são de origem tectônica ou oriunda do desmonte de rochas. Para essa análise recorreu-se a lineamentos de drenagem e a algumas famílias de discontinuidades definidas anteriormente na região (PARIZZI, 2004 e REIS JR, 2016). Assim, foi plotado em um diagrama de rosetas todos estes conjuntos de medidas (Figura 12). Neste diagrama não foi representada a família de discontinuidades J1, sub-horizontal, interpretada como junta de alívio de pressão.



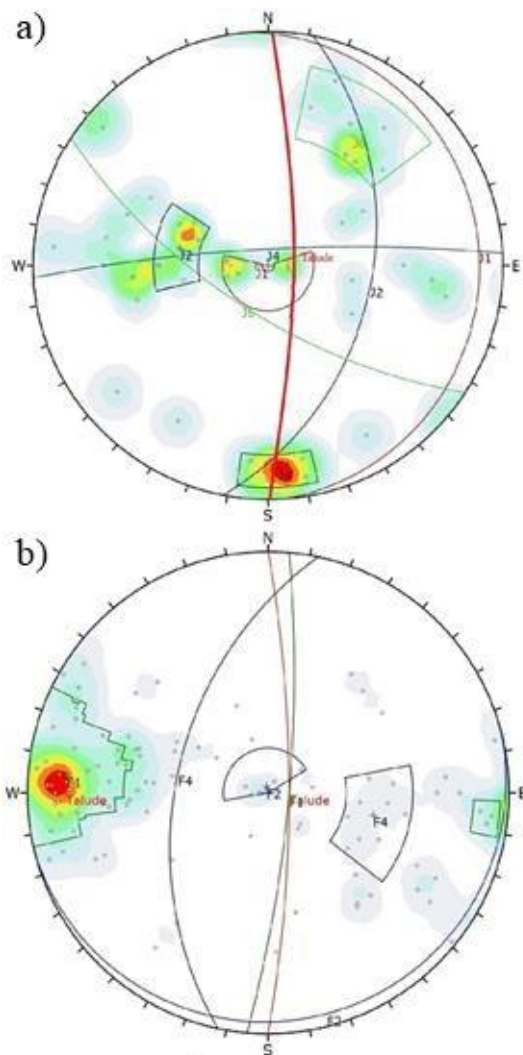


Figura 10 – Projeção dos polos das discontinuidades para: a) ponto 4 e b) seção 3 (mosaico 1). Modificado de Sant'Anna (2019).

Analisando-se o diagrama, com exceção da família J6 todas as discontinuidades mapeadas neste trabalho têm correspondência com medidas prévias ou de lineamentos na região.

Quanto as seis famílias de discontinuidade identificadas na fotointerpretação, pode-se verificar que estão concentradas com certo paralelismo na sua direção com a direção dos taludes (Norte-Sul). As possíveis famílias identificadas no mapeamento com direção oblíquas ao talude não foram visualizadas com grandes concentrações com o levantamento remoto.

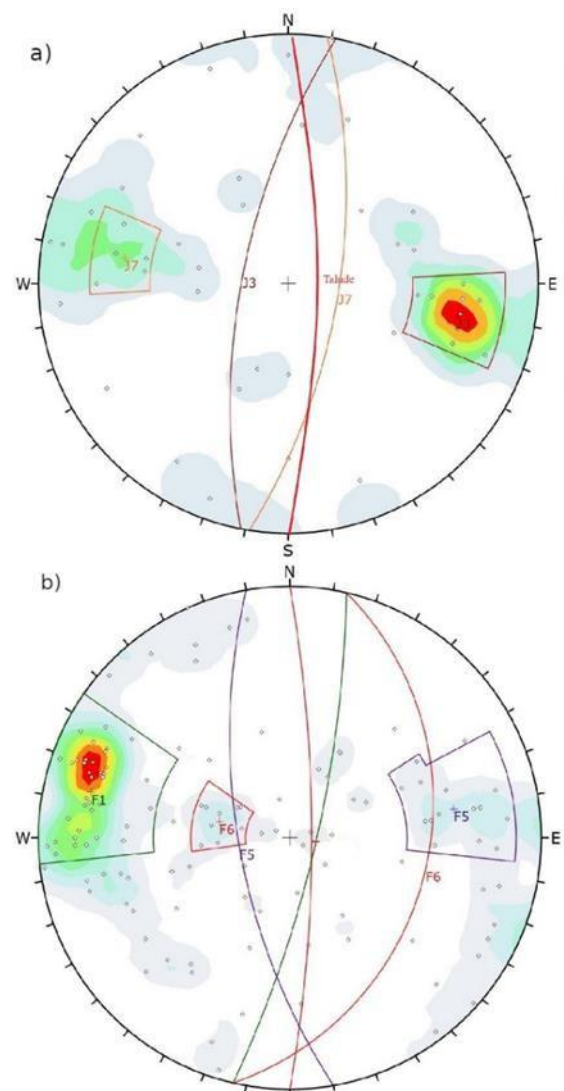


Figura 11 – Projeção dos polos das discontinuidades para: a) ponto 4 e b) seção 3 (mosaico 2). Modificado de Sant'Anna (2019).

Como os taludes da pedra em rochas duras são verticais e destituídos de muitas reentrâncias e saliências, usualmente somente foram reconhecidos os traços de fraturas e não os planos de fraturas. Isso pode ser encarado como uma deficiência do método para esse caso de estudo, já que as medidas de orientações se concentraram na porção equatorial do um estereograma (Figura 13). Na Figura 13 pode-se visualizar a correlação das famílias identificadas na FDT e pontos mapeados, sempre com caimentos próximos para leste oeste, coincidente com a direção do talude.

Quanto as condições da rocha e das discontinuidades, verificaram-se no mapeamento algumas características que sempre se repetiram. Assim, todas a rocha discontinuidades na base do talude apresenta-se inalterada, muito resistente ao teste do martelo, com paredes de discontinuidades sempre rugosas e planas, com aberturas inexistentes ou no máximo com 5

milímetros em pontos isolados. O índice RQD varia no local de 60 a 85.

A presença de água no maciço rochoso foi muito variável, com ocasiões com descontinuidades secas e outras com muita água jorrando pelas fraturas, mesmo em períodos de estiagem. Provavelmente essa água provém das casas que ocupam a crista do talude, como mostrado na Figura 2. Com isso, adotou-se valores conservadores para o parâmetro hidrogeológico, caracterizando com escoamento de água entre descontinuidades de valor “7”.

Já quanto geometria das descontinuidades, pode-se distinguir maiores persistências nas descontinuidades de baixo mergulho (sub-horizontal), representadas pelas famílias J1 e F2, caracterizada como fraturas de alívio. As demais descontinuidades, em sua maioria, apresentam persistência abaixo de um metro. Os espaçamentos também preponderam com valores centimétricos, com algumas descontinuidades com medidas superiores a um metro (Figura 14).

Todos esses parâmetros mapeados foram utilizados para o cálculo do RMR (básico), tanto para os pontos mapeados, como seções fotogramétricas interpretadas. Os resultados indicam um maciço de boa a regular qualidade (Tabela 7).

Tabela 7 – Valores do RMR(básico) dos pontos mapeados e seções fotogramétricas interpretadas. (SANT'ANNA,2019)

Local	RMR (BÁSICO)	Local	RMR (BÁSICO)
Ponto 1	75	Seção 1	75
Ponto 2	72	Seção 2	73
Ponto 4	68	Seção 3 – Mosaico 1	78
Ponto 5	76	Seção 3 – Mosaico 2	71

Esses dados foram utilizados para cálculo do SMR, relacionando as questões geométricas das famílias de descontinuidades e do talude. Essa orientação varia de uma porção maior com inclinação alta, entre 80 e 90 graus, para leste, onde estão os pontos 1, 2, 4, 5 e todas seções fotogramétricas e uma menor parte com caimento para sul e oeste, onde estão os pontos 6 e 3, respectivamente. Nesses últimos citados não se pode fazer o levantamento do FDT por restrições dos locais, como obstáculos que impossibilitavam a plena visualização do talude.

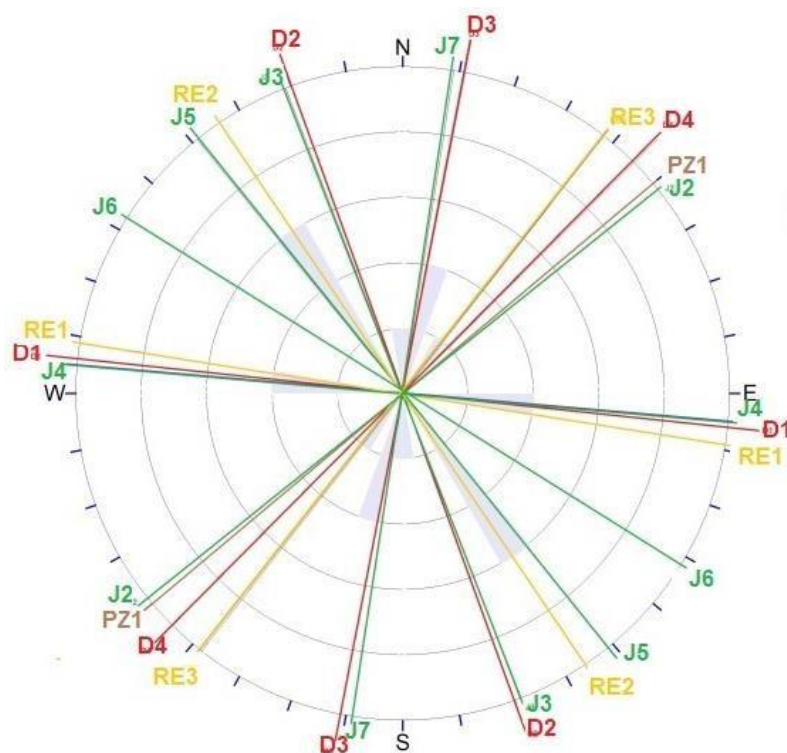


Figura 12 - Comparação entre famílias de descontinuidades e lineamentos de drenagens fotointerpretados. J: famílias de descontinuidades mapeadas tradicionalmente neste trabalho; D: lineamentos de drenagem definidos neste trabalho; RE: famílias de descontinuidades mapeadas por Reis Jr (2016); PZ: famílias de descontinuidades mapeadas por Parizzi (2004). Modificado de Sant'Anna (2019).

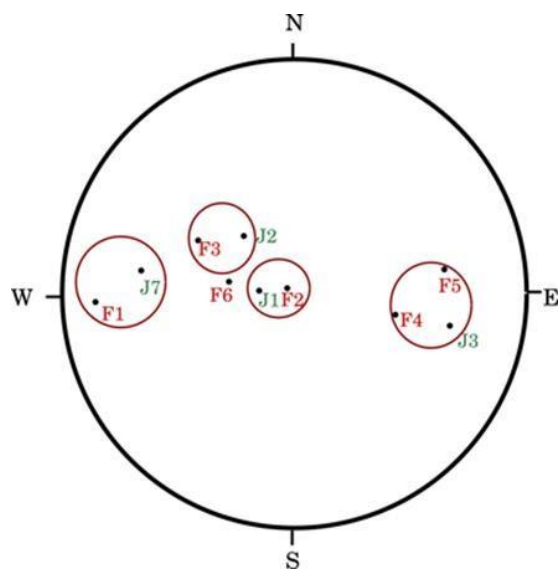


Figura 13 - Comparação de projeção de polos das famílias mapeadas com TDP (F) e com o método tradicional (J). Modificado de Sant'Anna (2019).



Figura 14 - Persistência métrica nas discontinuidades sub-horizontais (família J1) e espaçamento centimétrico em discontinuidades mais inclinadas (família J5). (SANT'ANNA, 2019).

Com a análise cinemática feita no Dips 7, verificou-se a compatibilidade cinemática para rupturas, para cada família de descontinuidade. Evidenciou-se um predomínio de susceptibilidade para rupturas planares e em cunha, e o cálculo do SMR (Tabela 8) apresentou em alguns casos queda considerável em relação ao respectivo RMR. As alterações dos valores estão relacionadas ao fator  $F_3$  onde a diferença entre o ângulo de mergulho da descontinuidade e inclinação do talude é alta, resultando num valor alto negativo. O paralelismo entre as direções de descontinuidade e talude acarreta em uma queda considerável para o valor de SMR. Assim, o uso do índice SMR em algumas situações sugere probabilidade de ruptura alta, com valores até abaixo de 20. Neste estudo de caso, o valor baixo de SMR está condicionado pela relação entre as orientações de descontinuidades e taludes, que junto com a disposição das fraturas e condições das descontinuidades, acarreta em queda de blocos. A ocorrência de blocos caídos e de cicatrizes de escorregamentos planares e em cunha demonstram que esta classificação foi adequada para avaliar a estabilidade do talude.

Tabela 8 – Valores de SMR calculado para os tipos de ruptura, compatível a análise cinemática. (P- planar, C – Cunha e T- Tombamento). (SANT'ANNA,2019).

Local	RMR	SMR	Tipo	Local	RMR	SMR	Tipo
Ponto 1	75	24	P	Seção 1	72	36	P
	75	68	C		72	12	C
Ponto 2	73	35	P	Seção 2	77	72	P
	73	48	C		77	70	T
Ponto 4	68	46	P	Seção 3 Mosaico 1	72	65	P
	68	39	C		72	55	T
Ponto 5	76	35	P	Seção 3 Mosaico 2	75	61	P
					75	58	C

## 5. CONCLUSÕES

A complexidade de área de estudo, com grande variação estrutural, quando analisada a orientação de fraturas, fez-se com que as análises estruturais gerassem concentrações de medidas pouco consistentes. Essa variação estrutural pode ser atribuída pelo posicionamento tectônico regional da área, ambiente de evolução policíclica e próxima a falha de empurrão, assim como de origem de detonações na história da pedra.

Quando comparados as famílias de descontinuidades reconhecidas pelos dois métodos, com dados estruturais já publicados e interpretação de fotos aéreas (Figura 13), pode-se concluir que essas famílias têm origem tectônicas.

Analisando especificamente os dados de fotogrametria, verificou-se que as descontinuidades oblíquas às direções do talude foram subestimadas, evidenciando um viés de amostragem do método nesse caso, com predomínio de concentração de orientações com direção paralelas ao talude e com alto ângulo de mergulho. O fato dos taludes serem verticais e sem reentrâncias e saliências significativos, dificultou o emprego do método neste tipo de litologia neste contexto. O seu uso é mais recomendável para rochas bem foliadas ou acamadas, onde os planos de fraturas usualmente são bem reconhecíveis.

Quanto a classificação geomecânica do maciço, o uso do índice SMR em algumas situações demonstrou probabilidade de ruptura alta, com valores até abaixo de 20. Neste estudo, o valor baixo de SMR está condicionado pela relação entre as orientações de descontinuidades e taludes, que junto com a disposição das fraturas e condições das descontinuidades, acarreta em queda de blocos.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALAMEDA-HENÁNDEZ. P.; HAMDOUNI. R. E.; IRIGARAY, C. CHACON, J.(2017). Weak foliated rock slope stability analysis with ultra-close-range terrestrial digital photogrammetry. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. V78, 1157-1171 (2019). Jul. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1119-z>
- BIENIAWSKI, Z. T. *Engineering rock mass classifications. A complete manual for engineers and geologist in mining, civil*

- and petroleum engineering. New York, USA: Jonh Wiley & Sons, 1989. 251p.
- BIRCH, J.S. *Using 3DM Analyst Mine Mapping Suite for rock face characterisation*, in TONON, F. AND KOTTENSTETTE, J.T. (Eds.), *Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization*, Golden, Colorado, pp. 13-32, 2006.
- BUYER A.; SCHUBERT W. *Extraction of discontinuity orientations in point clouds*. Rock mechanics and rock engineering: from the past to the future. S.I.: v. 2 p.1133-1138, 2016.
- DORR J. V. N. II. *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. USGS/DNPM. Geological Survey Professional Paper 641-A. 110p, Washington, USA, 1969.
- HANEBERG W.C. *3D rock mass characterization using terrestrial digital photogrammetry*. AEG News, v. 49, n.4, 12-15, 2006.
- HANEBERG W.C. *Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States*. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 67, n.4, 457-469, 2008.
- ISRM, INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, v.15, n.6, 319-368, 1978.
- LACERDA, S. G. *Estimativa do comprimento médio de traços de descontinuidades em maciços rochosos utilizando métodos estatísticos e fotogrametria digital terrestre*. Ouro Preto, 2018. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2018.
- NOCE, C.M., MACHADO, N., TEIXEIRA, W. *O complexo Belo Horizonte e a evolução arqueana do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, Camboriú. Boletim de resumos expandidos... Porto Alegre: SBG/DNPM/ CPRM. v.1, 68-69, 1994.
- PARIZZI, M.G. *Condicionantes e mecanismos de ruptura em taludes da Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG*. Ouro Preto, 2004. 212f. Tese (Doutorado em Geociências). Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2004.
- PRIEST S.D., HUDSON J. *Discontinuity spacing in rock*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*; v.13, n.5, 135-148, 1976.
- REIS JÚNIOR, W. *Caracterização das unidades geotécnicas da porção leste da região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2016. 166f. Dissertação (Mestrado em Geologia). Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Ouro Preto – MG, 2016.
- ROMANA, M. *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. Proceedings of International Symposium on the Role of Rock Mechanics – ISRM (International Society for Rock Mechanics). pp. 49-53, 1985.
- SANT'ANNA S. N. *Emprego da fotogrametria digital terrestre para análise de estabilidade de maciços rochosos. Caso de estudo na pedreira paralisada Mariano de Abreu, Belo Horizonte/MG*. Ouro Preto, 2019. 104 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2019.
- TANNANT D.D. *Review of photogrammetry-based techniques for characterization and hazard assessment of rock faces*. *International Journal of Geohazards and Environment*. v.1 n.2, 76-87, 2015.
- THOENI K, GIACOMINI A, MURTAGH R, KNIEST E. *A comparison of multi-view 3D reconstruction of a rock wall using several cameras and a laser scanner*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v.40, n.5, 573-580. ISPRS Technical Commission Symposium, 2014.
- TOMAS, R.; DELGADO, J.; SERON, J.B. *Modification of Slope Mass Rating (SMR) by continuous functions*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 1062-1069, 2007.

---

Recebido em: 23/11/2021

Aceito para publicação em: 04/07/2021