

# UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO ESCOLA DE MINAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



#### MARCELLA APRIGIO SILVA

# DEFINIÇÃO DAS FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES COM BASE EM ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS ESTUDO DE CASO: MORRO DA MINA

OURO PRETO

#### MARCELLA APRIGIO SILVA

## DEFINIÇÃO DAS FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES COM BASE EM ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS

ESTUDO DE CASO: MORRO DA MINA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Estabilidade de taludes.

Orientador: Profa. Dra. Milene Sabino Lana

**OURO PRETO** 

S586d Silva, Marcella Aprigio.

Definição das famílias de descontinuidades com base em análise de agrupamentos [manuscrito]: Estudo de caso: Morro da Mina / Marcella Aprigio Silva. - 2018.

77f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Profa. Dra. Milene Sabino Lana.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

 Engenharia de minas. 2. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. I. Lana, Milene Sabino. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Titulo.

CDU: 622:624.13





#### MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas



#### ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA DE FINAL DE CURSO

Aos 27 dias do mês de abril de 2018, às 13h30min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa da monografia de final de curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, pela aluna Marcella Aprigio Silva, intitulado: "DEFINIÇÃO DAS FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES COM BASE EM ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS. ESTUDO DE CASO: MORRO DA MINA", sendo a comissão avaliadora formada por Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Milene Sabino Lana (orientadora), M. Sc. Júlia Maria de Paula Alves e M. Sc. Tatiana Barreto dos Santos.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela APROVAÇÃO. da candidata, com a nota QLO concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pela discente.

Ouro Preto, 27 de abril de 2018.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Milene Sabino Lana

Presidente da Comissão Avaliadora e Professora Orientadora

M. Sc. Julia Maria de Paula Alves Membro da Comissão Avaliadora

M. Sc. Tatiana Barreto dos Santos Membro da Comissão Avaliadora

Marcella Aprigio Silva

Prof. Ms.C. José Fernando Miranda

Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus por sempre iluminar minhas escolhas, por abençoar meu caminho me mantendo forte, perseverante e cheia de fé;

Aos meus pais e ao meu irmão Pedro, que sempre me apoiaram, acreditaram no meu sucesso e abriram as portas com afeto e dedicação;

Ao Bruno por todo amor e cuidado;

À minha orientadora, Profa. Dra. Milene Sabino Lana, por seus ensinamentos, paciência e confiança ao longo das supervisões deste trabalho;

Às geólogas Nívea Viana e Júlia Alves, da VALE S. A. Morro da Mina, por todo suporte e por compartilharem tanto conhecimento.

À empresa VALE S.A por dar início ao projeto que resultou na realização deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso.

Agradeço à Escola de Minas e ao DEMIN pelo ensino de qualidade e aprendizado ao longo desses anos.

"O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada. Caminhando e semeando, no fim terás o que colher." Cora Coralina

#### **RESUMO**

Os maciços rochosos são o conjunto de porções de rocha intacta e descontinuidades. Estas são planos de fraqueza de origem geológica, que podem ser entendidas como qualquer feição que interrompa a continuidade física de um dado meio rochoso. O estudo das descontinuidades de um maciço rochoso mostra-se de importância fundamental, pois estas estruturas condicionam o comportamento geotécnico dos mesmos, tendo forte influência na estabilidade de escavações. Neste trabalho o agrupamento das descontinuidades em famílias segundo orientações preferenciais em virtude da semelhança do mergulho e da direção de mergulho das mesmas é realizado. A forma como essas famílias se distribuem condiciona o comportamento das estruturas de engenharia presentes no maciço, gerando rupturas no mesmo. Portanto, ferramentas para identificação dos padrões de orientação observadas em campo são imprescindíveis, sendo que neste trabalho foi usada a análise de agrupamentos concomitante à construção de diagramas de frequência de polos e curvas de isofrequência, para se aglomerar tais descontinuidades. O agrupamento de descontinuidades em famílias nem sempre é uma tarefa trivial, podendo apresentar caráter subjetivo, devido ao tamanho da área da célula de contagem de polos, a sobreposição entre os agrupamentos e a presença de outliers. Notou-se que quando os agrupamentos são claramente separados e compactos, não existe ambiguidade ou incerteza na associação de cada descontinuidade a sua respectiva família, podendo ser feita a identificação visual através do diagrama de polos gerado pelo método clássico, ou seja, a partir da identificação visual das concentrações de polos na projeção hemisférica. Porém, quando os agrupamentos se sobrepõem ou possuem suas fronteiras muito próximas, a alocação das descontinuidades que estão nesta região não é clara, necessitando do uso de ferramentas estatísticas, no caso a análise de agrupamentos. Um estudo de caso envolvendo a definição das famílias de descontinuidades em Morro da Mina, Vale, foi desenvolvido para ilustrar o método utilizado. Após a obtenção do número de famílias de descontinuidades, separadas por falhas, fraturas e foliação, o trabalho propõe futuros estudos de estabilidade para a cava de Morro da Mina.

Palavras-chave: famílias de descontinuidades, análise de agrupamentos, estabilidade de taludes.

#### **ABSTRACT**

The rocky masses are the set of intact rock portions and discontinuities. These are plans of weakness of geological origin, which can be understood as any feature that interrupts the physical continuity of a given rocky environment. The study of the discontinuities of a rocky masses is fundamental importance, since these structures condition their behavior, having a strong influence on the stability of excavations. In this work the clustering of the discontinuities in sets according to preferred orientations due to the similarity of the dip and dip direction of the same is realized. The way these families are distributed conditions the behavior of the engineering structures present in the rock masses, causing failures in the same. Therefore, tools to characterize the discontinuities observed in the field are essential, and in this work, cluster analysis was used concomitant to the construction of pole frequency diagrams and isofrequence curves, in order to agglomerate such discontinuities. The clustering of discontinuities in sets is not always a trivial task, and may present a subjective character, due to the size of the area of the count circle size, the overlap between the groupings and the presence of outliers. It was noted that when clusters are clearly separated and compact, there is no ambiguity or uncertainty in the association of each discontinuity to their respective set, and the visual identification can be made through the pole diagram generated by the classical method, that is, from the identification of the polar concentrations in the hemispheric projection. However, when clusters overlap or have their boundaries very close, the allocation of discontinuities in this region is not clear, requiring the use of statistical tools, in this case cluster analysis. A case study involving the definition of discontinuity families in Morro da Mina, Vale, was developed to illustrate the method used. After obtaining the number of families of discontinuities, separated by faults, fractures and foliation, the work proposes future stability studies for Morro da Mina.

**Keywords:** families of discontinuities, cluster analysis, slope stability.

### LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mapa de localização e acessos à área de Morro da Mina. (Imagem fornecida pela V	/ale
S. A.)	13
Figura 2: Localização da unidade de Morro da Mina nas proximidades da cidade de Conselhe	eiro
Lafaiete. (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	14
Figura 3: Imagem aérea da vista de sudeste para noroeste das instalações da mina de manga	ınês
Morro da Mina. (Imagem fornecida pela Vale S. A.)	15
Figura 4: Caracterização das descontinuidades (ISRM, 1981)	16
Figura 5: Orientação de uma descontinuidade (ISRM, 1981).	20
Figura 6:Figura ilustrativa da setorização da cava (Geoestável, 2014)	24
Figura 7: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para identificação	de
famílias.	28
Figura 8: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência com um número me	no
de pontos.	29
Figura 9: Medidas de validação para fraturas do setor 1B.	30
Figura 10: Fraturas do setor 1B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	31
Figura 11: Falha do setor 1B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	31
Figura 12: Foliação do setor 1B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	31
Figura 13: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para as famílias	de
descontinuidades do setor 1B.	32
Figura 14: Medidas de validação para fraturas do setor 2B.	32
Figura 15: Fraturas do setor 2B (Imagem fornecida pela Vale S.A.).	33
Figura 16: Falha do setor 2B (Imagem fornecida pela Vale S.A.).	34
Figura 17: Foliação do setor 2B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	34
Figura 18: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência as famílias	de
descontinuidades do setor 2B.	35
Figura 19: Medidas de validação para fraturas do setor 3B.	35
Figura 20: Fraturas do setor 3B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	36
Figura 21: Falha do setor 3B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	37
Figura 22: Foliação do setor 3B (Imagem fornecida pela Vale S. A.)	37
Figura 23: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para as famílias	de
descontinuidades do setor 3B.	38
Figura 24: Medidas de validação para fraturas do setor 4B.	39

Figura 25: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para identificaçã	o de 5
famílias de descontinuidades nas fraturas do setor 4B.	40
Figura 26: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para 3 famílias de fr	aturas
no setor 4B.	40
Figura 27: Fraturas do setor 4B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	41
Figura 28: Falha do setor 4B (Imagem fornecida pela Vale S.A.).	42
Figura 29: Foliação do setor 4B (Imagem fornecida pela Vale S.A.).	42
Figura 30: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para as famíl	ias de
descontinuidades do setor 4B.	43
Figura 31: Medidas de validação para fraturas do setor 5B.	43
Figura 32: Fraturas do setor 5B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	44
Figura 33: Falha do setor 5B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	45
Figura 34: Foliação do setor 5B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	45
Figura 35: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para as famíl	ias de
descontinuidades do setor 5B.	46
Figura 36: Medidas de validação para fraturas do setor 6B.	46
Figura 37: Fraturas do setor 6B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	47
Figura 38: Falha do setor 6B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	48
Figura 39: Foliação do setor 6B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).	48
Figura 40: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para as famíl	ias de
descontinuidades do setor 6B.	49

#### LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Litologias da cava atual e respectiva terminologia usada pela Vale	16
Tabela 2: Classes de Alteração Intempérica das Rochas (ISRM, 2007)	19
Tabela 3: Condições das Descontinuidades - Espaçamento (Bieniawski, 1989)	21
Tabela 4: Condições das Descontinuidades - Persistência (Bieniawski, 1989)	21
Tabela 5: Condições das Descontinuidades - Rugosidade (Bieniawski, 1989)	21
Tabela 6: Classificação da Resistência das Paredes (ISRM, 1981)	22
Tabela 7: Condições das Descontinuidades- Abertura (Bieniawski, 1989)	22
Tabela 8: Condições das Descontinuidades - Preenchimento (Bieniawski, 1989)	23
Tabela 9: Classificação do Grau de Fraturamento (ISRM,1981).	23
Tabela 10: Médias das atitudes das famílias de descontinuidades de cada setor	50

### SUMÁRIO

1.	. INTRODUÇÃO	10
2.	. OBJETIVO	12
3.	. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
	3.1 Unidade Morro da Mina – MG	13
	3.2 Maciço Rochoso	15
	3.3 Caracterização geológico – geotécnica de maciços rochosos	16
	3.3.1 Litologia	16
	3.3.2 Alterabilidade e estado de alteração	18
	3.4 Descontinuidades	19
	3.4.1 Atitude	20
	3.4.2 Espaçamento	20
	3.4.3 Persistência	21
	3.4.4 Rugosidade	21
	3.4.5 Resistência da parede	22
	3.4.6 Abertura	22
	3.4.7 Preenchimento	23
	3.4.8 Grau de fraturamento	23
4.	. METODOLOGIA	24
5.	. RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
	5.1 Análise inicial	28
	5.2 Setor 1B	29
	5.3 Setor 2B	32
	5.4 Setor 3B	35
	5.5 Setor 4B	38
	5.6 Setor 5B	43
	5.7 Setor 6B	46

5.8 Atitudes médias	50
6. CONCLUSÕES	51
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXOS	54
	55
	64

#### 1. INTRODUÇÃO

A avaliação da estabilidade dos taludes é de fundamental importância para previsão de possíveis movimentos de massa tanto em taludes urbanos como em taludes de mina. Considerando a importância dos custos econômicos em questões de mineração, a necessidade de se efetuar um plano de fogo com segurança e de se estabelecer um ângulo de inclinação apropriado para o talude, o qual minimize o surgimento de possíveis rupturas ou agrave a conjuntura de descontinuidades já existentes, a avaliação da estabilidade dos taludes pode causar um efeito positivo em relação à segurança das operações e minimizar os custos do projeto.

O projeto de um talude começa pela definição de sua altura, o ângulo de mergulho e a direção, baseada na finalidade da obra e na avaliação das rupturas que podem ocorrer. Além disso, para se efetuar dimensionamento de escavações em minas a céu aberto, desmontes e obras na cava em maciços rochosos é de extrema importância que se defina a quantidade de descontinuidades presentes na estrutura rochosa, sua localização no espaço e o máximo possível de informações que caracterizam as mesmas, a fim de se evitar futuros acidentes e prever danos aos taludes e, consequentemente, à mina.

As descontinuidades devem ser agrupadas em famílias segundo orientações preferenciais em virtude da semelhança do mergulho e da direção de mergulho das mesmas. A forma como essas famílias se distribui condiciona o comportamento das estruturas geológicas presentes no maciço, gerando os mecanismos e as geometrias de rupturas na rocha.

Para fazer as análises de estabilidade de taludes, alguns softwares são utilizados como ferramentas para facilitar a identificação de possíveis rupturas e de famílias de descontinuidades, os cálculos de estabilidade, as definições das seções da cava da mina, bem como futuras obras. Para utilização dos softwares, é necessário o conhecimento de determinados parâmetros fundamentais para geração dos resultados e análise. Parâmetros estes que são obtidos experimentalmente, teoricamente e por meio de dados coletados em campo, tais como litologia, alteração, características das descontinuidades como espaçamento, persistência, rugosidade, resistência das paredes, abertura, preenchimento e grau de fraturamento.

Através dessas informações contidas no banco de dados de Morro da Mina fornecido pela empresa Vale S. A., unidade de Conselheiro Lafaiete - MG, foram feitas análises com o uso do programa Heurística, em plataforma Scilab, desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, afim de se identificar os possíveis agrupamentos das

descontinuidades observadas em campo, cuja caracterização das mesmas está registrada em tal banco de dados.

Concomitante a esta análise, um estudo através do software Dips (2017) também identificou no espaço as famílias de descontinuidades, por meio de diagramas de frequência de polos e curvas de isofrequência, existentes em cada um dos 6 setores já pré-estabelecidos da mina.

Esse estudo viabiliza uma futura identificação dos potenciais mecanismos de ruptura, com base na análise e interpretação do mapa geológico-geotécnico e dos estereogramas das feições estruturais, conjugados com a direção e inclinação dos taludes da mina. Nestas atividades poderão ser identificados e qualificados os principais condicionantes e riscos geotécnicos associados e a estabilidade dos taludes atuais da cava, cujos fatores condicionantes são as descontinuidades presentes.

#### 2. OBJETIVO

O objetivo do trabalho é fazer a identificação das famílias de descontinuidades levantadas na mina Morro da Mina da empresa Vale S. A., unidade de Conselheiro Lafaeite – MG, em cada um dos seis setores da cava atual, por meio de análise de agrupamentos, juntamente com a construção e interpretação do diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência.

#### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão baseada na literatura, contextualizando os temas pertinentes a este trabalho.

#### 3.1 Unidade Morro da Mina - MG

A mina de manganês Morro da Mina está em operação há mais de cem anos, teve início em 1902 e produz minério de manganês, o qual é transportado por via rodoviária até as instalações siderúrgicas do Grupo Ferro Ligas na cidade de Barbacena no estado de Minas Gerais.

Morro da Mina localiza-se no setor sul do Quadrilátero Ferrífero, especificamente, no município de Conselheiro Lafaiete (MG), e está limitada pelas coordenadas geográficas 20° 39′ 3,75″ e 20° 39′ 22,5″ de latitude Sul e 43° 47′ 00″ e 43° 47′ 40″ de longitude oeste, conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2.

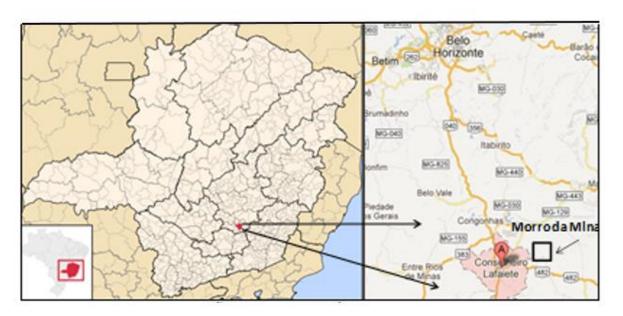


Figura 1: Mapa de localização e acessos à área de Morro da Mina. (Imagem fornecida pela Vale S. A.).



Figura 2: Localização da unidade de Morro da Mina nas proximidades da cidade de Conselheiro Lafaiete. (Imagem fornecida pela Vale S. A.).

Segundo relatório da Geoestável (2014), a estruturação da mina de Morro da Mina apresenta direção NW-SE (Figura 3), sendo constituída por rochas metamórficas inseridas na porção de borda de contato do Grupo Nova Lima (Supergrupo Rio das Velhas) e plutons graníticos pertencentes ao Batólito Alto Maranhão. Além destas, têm-se ainda a ocorrência de coberturas saprolíticas incidindo, predominantemente, nas bancadas superficiais da cava.

Nos domínios de rochas graníticas do Batólito Alto Maranhão, encontra-se litologias como Granodiorito e Monzogranito. Já em rochas do Grupo Nova Lima, as unidades de mapeamento atual da cava definem Anfibolito, Minério Sílico Carbonatado, Xisto Grafitoso e Quartzo Biotita Xisto.



Figura 3: Imagem aérea da vista de sudeste para noroeste das instalações da mina de manganês Morro da Mina. (Imagem fornecida pela Vale S. A.).

#### 3.2 Maciço Rochoso

Os maciços rochosos são o conjunto de porções de rocha intacta e descontinuidades. Essas porções de rocha intacta são compostas por grãos de minerais com a sua formação governada por processos geológicos (Hudson e Harrison, 1997). Já as descontinuidades são qualquer quebra mecânica ou fratura presente num maciço rochoso, de origem natural (Priest, 1993), que devem ser tomadas com grande relevância em estudos geotécnicos uma vez que são as estruturas menos resistentes e estão relacionadas às situações de ruptura.

Segundo ISRM (1981), as principais características das descontinuidades que influenciam no comportamento geotécnico dos maciços rochosos são a orientação, o espaçamento, a persistência, a abertura, a rugosidade, a resistência da parede e o preenchimento (Figura 4). Além destas, devem ser considerados a litologia do maciço em análise e o estado de alteração, a coerência do mesmo e a influência da água que pode percolar nas descontinuidades.

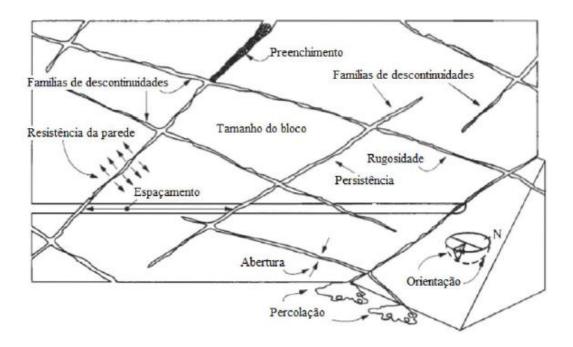


Figura 4: Caracterização das descontinuidades (ISRM, 1981)

#### 3.3 Caracterização geológico – geotécnica de maciços rochosos

#### 3.3.1 Litologia

A base geológica foi fundamentada nos dados do Modelamento de Blocos, segundo os relatórios da Geoestável (2014) fornecidos pela Vale, respeitando a terminologia implantada pela operação da mina, no que tange a classificação das litologias presentes na cava (Tabela 1).

Quartzo Biotita Xisto	XQB
Xisto Grafitoso	XGT
Anfibolito	ANF
Monzogranito	MNG
Granodiorito	GRD
Minério Silico Carbonatado	MSC

 $Tabela\ 1: Litologias\ da\ cava\ atual\ e\ respectiva\ terminologia\ usada\ pela\ Vale.$ 

#### QUARTZO BIOTITA XISTO (XQB)

Trata-se de uma rocha metamórfica de coloração esverdeada com níveis acinzentados ou pretos quando intercalada com camadas de xisto grafitoso. De forma geral, nota-se uma composição mineralógica formada por cristais de quartzo, anfibólio, biotita e granada esparsas.

Em geral esta litologia ocorre na porção central, SW, NW e SE da mina como encaixante do minério sílico-carbonatado, sendo, em termos percentuais, a unidade mais expressiva na região da cava, compondo 62,3% da extensão mapeada. (Geoestável, 2014)

#### XISTO GRAFITOSO (XGT)

Essa unidade ocorre, na área da mina, como pequenos corpos ou lentes na porção sul, sul e sudeste, ou mais frequentemente, como camadas ou bandas encaixadas no quartzo-biotita xisto, com direção N-S ou NW-SE. (Geoestável, 2014)

O xisto grafitoso é uma rocha metamórfica essencialmente composta por minerais de grafite e quartzo. Em amostra de mão essa rocha apresenta coloração preta ou cinza e aspecto graxo.

#### ANFIBOLITO (ANF)

O corpo de rocha anfibolítica aflora na porção oeste-sul da cava e apresenta mineralogia a base de anfibólio e feldspato (plagioclásio) exibindo coloração esverdeada. O solo saprolítico associado ao anfibolito apresenta textura siltosa com coloração amarela. (Geoestável, 2014)

#### MONZOGRANITO (MNG)

Essa unidade litoestratigráfica aflora predominantemente na porção oeste/noroeste da mina. Na região da cava o monzogranito geralmente não se apresenta foliado. Contudo nota-se na porção N/NE da mina em condições intempéricas bastante avançadas.

Na condição de maciço rochoso, o monzogranito apresenta-se com coloração branca ou cinza com composição mineralógica essencialmente quartzo-feldspática, variavelmente com presença de muscovita. (Geoestável, 2014)

#### GRANODIORITO (GRD)

Essa unidade aflora nos bancos superiores do extremo norte, norte e noroeste da cava, com orientação NW-SE. Em algumas porções localizadas a noroeste do pit, é possível observar vestígios de pequenos fragmentos de XQB e XGT.

Na área da mina esse litotipo apresenta-se foliado, feição estrutural dúctil associada à orientação mineral, principalmente, das palhetas de mica. De forma geral, o granodiorito apresenta coloração branca com tons esverdeados, nota-se como composição mineralógica, a presença de cristais de quartzo, feldspato e biotita. (Geoestável, 2014)

#### MINÉRIO SÍLICO CARBONATADO (MSC)

O minério de manganês sílico-carbonatado ocorre essencialmente na porção central da cava e como pequenas lentes disseminadas nas porções oeste, sul e sudeste da mina.

Em geral, essa rocha apresenta-se maciça com coloração cinza-azulada e composição mineralógica a base de carbonato de manganês silicoso. Em determinados momentos sua distinção com o xisto grafitoso só é possível através do teste de reação ao ácido HCl.

Essa rocha não apresenta, em muitos casos, claras evidencias da deformação cisalhante (Geoestável, 2014).

#### 3.3.2 Alterabilidade e estado de alteração

Alteração de uma rocha é o processo de desagregação e decomposição causado por agentes físicos e químicos naturais que transformam a mesma, caracterizando-as como rochas sãs até rochas completamente intemperizadas, conforme classificação da Tabela 2.

Tabela 2: Classes de Alteração Intempérica das Rochas (ISRM, 2007).

TERMO	DESCRIÇÃO	CLASSE
SÃ	Nenhum sinal visível de alteração da matriz; possível leve descoloração ao longo das descontinuidades principais.	W1
LEVEMENTE INTEMPERIZADO	Descoloração indica intemperismo da matriz da rocha e de superfícies de descontinuidade. Toda a matriz da rocha pode estar descolorida pelo intemperismo e pode estar algo mais branda externamente do que na condição sã.	
MEDIANAMENTE INTEMPERIZADO	Menos da metade da matriz da rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida está presente, formando um arcabouço descontínuo ou como núcleos de rocha.	W3
ALTAMENTE INTEMPERIZADO	Mais da metade da matriz da rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida está presente, formando um arcabouço descontínuo ou como núcleos de rocha.	W4
COMPLETAMENTE INTEMPERIZADO	l desintegrada à condição de solo. A estrutura original do l	
SOLO RESIDUAL  Toda a rocha está convertida em solo. A estrutura do maciço e da matriz da rocha está destruída. Há uma grande variação de volume, mas o solo não foi significativamente transportado.		W6

#### 3.4 Descontinuidades

Descontinuidades são planos de fraqueza de origem geológica no maciço rochoso. As descontinuidades podem ser entendidas como qualquer feição geológica que interrompa a continuidade física de um dado meio rochoso. Sob a designação de descontinuidades tem-se, entre outras, as superfícies de foliação, acamamento, fraturas, falhas (ABGE, 1998). Um conjunto de descontinuidades com orientação próxima forma uma família de descontinuidades.

O estudo das descontinuidades de um maciço rochoso mostra-se de importância fundamental, pois estas estruturas condicionam o comportamento dos maciços rochosos, tendo forte influência na estabilidade do mesmo.

As descontinuidades podem ser encaradas como superfícies planas e, portanto, sua representação no espaço - atitude - se dá através de coordenadas geológicas expressas em

termos de seu mergulho e azimute de mergulho, podendo ser representada através de projeção hemisférica.

#### 3.4.1 Atitude

A atitude de um plano é seu mergulho e azimute, que são tomadas com auxílio de uma bússola. Strike (direção do plano) é a linha de intersecção entre o plano e a horizontal, medida no plano horizontal, perpendicular ao azimute de mergulho, ou seja, é o ângulo que uma linha horizontal do plano faz com o Norte; e o mergulho é dado por uma linha perpendicular à direção (linha de maior declive), sendo que o azimute desta linha nos dá o sentido do mergulho e o ângulo que esta linha faz com a horizontal nos dá o ângulo de mergulho (Figura 5).

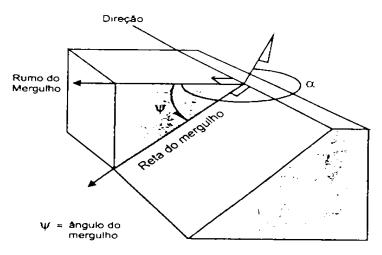


Figura 5: Orientação de uma descontinuidade (ISRM, 1981).

#### 3.4.2 Espaçamento

Corresponde à distância perpendicular entre duas descontinuidades adjacentes, medida com trena em campo, caracterizada segundo a Tabela 3. O espaçamento tem grande influência na permeabilidade do maciço e nas características de percolação.

CATEGORIA	ESPAÇAMENTO MÉDIO DAS FRATURAS (CM)	DESCRIÇÃO
L1	> 200	Muito afastadas
L2	200-60	Afastadas
L3	60-20	Medianamente afastadas
L4	20-6	Próximas
L5	<6	Muito próximas

Tabela 3: Condições das Descontinuidades - Espaçamento (Bieniawski, 1989).

#### 3.4.3 Persistência

É a extensão do traço de uma descontinuidade, medida com trena em campo, na qual uma descontinuidade com extensão variando até 10m é considerada pouco persistente e acima de 10m é definida com alta persistência (Tabela 4).

Tabela 4: Condições das Descontinuidades - Persistência (Bieniawski, 1989).

	< 1m	6
	1-3 m	4
PERSISTÊNCIA	3 -10 m	2
	10 – 20 m	1
	>20 m	0

#### 3.4.4 Rugosidade

É a ondulação da superfície das descontinuidades, definida na Tabela 5.

Tabela 5: Condições das Descontinuidades - Rugosidade (Bieniawski, 1989).

	Muito rugosa	6
	Rugosa	5
RUGOSIDADE	Levemente rugosa	3
	Lisa	1
	Espelhada	0

#### 3.4.5 Resistência da parede

Refere-se à resistência a compressão das paredes adjacentes a uma descontinuidade (Tabela 6). Esta resistência deve ser menor que a da rocha intacta devido à alteração das paredes proporcionada pela presença das descontinuidades.

Tabela 6: Classificação da Resistência das Paredes (ISRM, 1981).

DENOMINAÇÕES	DEFINIÇÃO PARA USO EM CAMPO
Extremamente fraca (R0)	Riscado pela unha.
Muito fraca (R1)	Esfarela sob pancadas firmes do martelo de geólogo, pode ser descascado pela lâmina do canivete.
Fraca (R2)	Pode ser descascado com dificuldade pela lâmina de um canivete, buracos rasos podem ser criados com uma pancada firme da ponta do martelo do geólogo.
Medianamente forte (R3)	Não pode ser riscado com um canivete, pode ser quebrado por uma única pancada firme do martelo de geólogo.
Forte (R4)	Requer mais de uma pancada de martelo de geólogo para quebrar.
Muito forte (R5)	Requer muitas pancadas do martelo de geólogo para quebrar.
Extremamente forte (R6)	Pode apenas ser lascado com um martelo de geólogo.

#### 3.4.6 Abertura

É a distância perpendicular entre as paredes adjacentes de uma descontinuidade, classificada de 0 a 6 segundo essa distância, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7: Condições das Descontinuidades- Abertura (Bieniawski, 1989).

	Fechada	6
	<0,1mm	5
ABERTURA	0,1 – 1,0mm	4
	1-5 mm	1
	>5mm	0

#### 3.4.7 Preenchimento

O preenchimento (Tabela 8) tem grande influência nos parâmetros geotécnicos de uma descontinuidade quanto à resistência ao cisalhamento e à deformabilidade. Em termos hidráulicos, uma descontinuidade preenchida por um material poroso e permeável também tem forte influência na estabilidade do maciço.

Tabela~8:~Condições~das~Descontinuidades~-~Preenchimento~(Bieniawski,~1989).

PREENCHIMENTO	Nenhum	6
	Duro; <5mm	4
	Duro;>5mm	2
	Macio;<5mm	2
	Macio;>5mm	0

#### 3.4.8 Grau de fraturamento

É normalmente apresentado em número de fraturas por metro linear, ao longo de uma dada direção, caracterizado de pouco a extremamente fraturado conforme parâmetros expostos na Tabela 9.

Tabela 9: Classificação do Grau de Fraturamento (ISRM,1981).

CATEGORIA	ESPAÇAMENTO MÉDIO DAS FRATURAS (CM)	N° DE FRATURAS POR METRO	DESCRIÇÃO
F1	> 200	<0,5	Maciço
F2	200-60	0,5-2	Pouco fraturado
F3	60-20	2-5	Medianamente fraturado
F4	20-6	5-17	Muito fraturado
F5	<6	<17	Extremamente fraturado

#### 4. METODOLOGIA

A primeira etapa deste trabalho consistiu no levantamento bibliográfico e revisão dos relatórios técnicos, bem como análise das informações contidas no banco de dados, ambos fornecidos pela Vale S.A. A revisão bibliográfica concentrou-se em averiguar na literatura aspectos relevantes para a caracterização das descontinuidades estudadas. Também fez parte do processo extrair destes relatórios informações consideráveis para o trabalho referente a Morro da Mina.

A setorização da cava (Figura 6) foi definida previamente com base nas litologias, feições estruturais, classes de alteração e direções dos taludes de bancada e global. Foram definidos 06 setores subdivididos em subsetores A e B que correspondem respectivamente à regiões de domínio de cobertura terrosa (subsetores A) e domínio de maciços rochosos (subsetores B) (Geoestável, 2014).

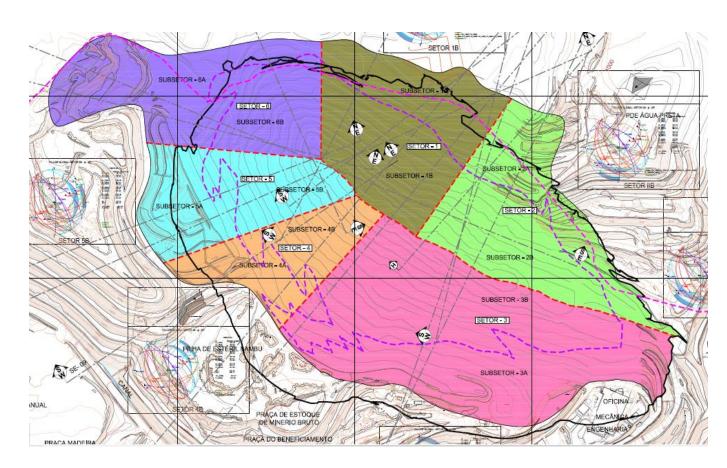


Figura 6:Figura ilustrativa da setorização da cava (Geoestável, 2014)

As descontinuidades estudadas foram apenas as existentes nos subsetores B. Para os subsetores A não houve essa análise devido aos mesmos serem compostos integralmente por litologias propensas a apenas ocorrência de rupturas circulares e serem caracterizadas como solo ou rocha branda, por possuírem comportamento de solo em termos geomecânicos, uma vez que são muito intemperizados.

Observa-se uma estratificação das classes de intemperismo em relação à profundidade da cava. Assim, nas proximidades da superfície (bancadas superiores da cava) os maciços encontram-se mais intemperizados, nas classes de alteração W4 e W5, sendo representado, no setor norte, por afloramentos do quartzo-biotita xisto e principalmente granodiorito. No setor sul, constatou-se que o manto de intemperismo é sustentado por afloramentos de anfibolito, monzogranito e principalmente quartzo-biotita xisto (Geoestável, 2014).

A partir da consecução de tais dados, foi executada uma análise de agrupamento por meio do algoritmo Heurística, desenvolvido por Klen (2014), no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, que tem como plataforma o software Scilab, baseado no método *Fuzzy K-Means*. No entanto, foi feito o uso do Software Dips (2017) para estudo e análise concomitante, uma vez que ele permite de forma visual a representação das famílias no espaço pela técnica de projeção hemisférica e gera os diagramas de frequência de polos e curvas de isofrequência.

O Heurística é aplicado a indivíduos multivariados e tem como objetivo particionar o espaço amostral em subgrupos, agrupamentos ou famílias. Estes são formados por elementos que apresentam elevado grau de similaridade, o que confere homogeneidade aos agrupamentos gerados. A principal vantagem desta técnica é a sua independência em relação à necessidade de se modelar os parâmetros, média e dispersão de cada família a uma função de distribuição de probabilidade (Klen, 2014).

A construção e interpretação do diagrama de frequência de polos, com vistas a determinação das famílias de descontinuidades, chamado método clássico, é gerado a partir da projeção polar das descontinuidades, e sua aplicação é aceitável quando o estereograma contiver um número elevado de polos. Nos diagramas de frequência, as famílias de descontinuidades são representadas por concentrações polares e seus planos médios, sendo estas definidas por regiões com maior densidade de polos. Curvas de isofrequência caracterizam e delimitam tais famílias.

O agrupamento de descontinuidades em famílias nem sempre é uma tarefa trivial, particularmente quando se utiliza apenas o diagrama de frequência de polos, método clássico. Este, em alguns casos, apresenta caráter subjetivo, uma vez que o tamanho da área da célula de

contagem, a sobreposição entre os agrupamentos e a presença de *outliers* dificultam a definição visual das famílias. Por isso, nestes casos, é útil a aplicação de métodos estatísticos em conjunto com o método clássico. A sobreposição dificulta a interpretação do diagrama, pois a fronteira entre as famílias que se interceptam não fica clara, podendo gerar interpretação ambígua. (Klen, 2014).

Dessa forma, o Heurística permite agrupar as descontinuidades em famílias sem a influência dessas fontes de erro, uma vez que o método *Fuzzy K-means* considera a incerteza de uma descontinuidade pertencer simultaneamente a mais de uma família, amenizando o problema da sobreposição, possibilita a aplicação de critérios para identificação de *outliers* - amostras aleatórias que não se encaixam perfeitamente em nenhuma das famílias - e não utiliza células de contagem de polos, que pode potencializar o efeito da sobreposição. Além disso, é um método que requer pouco conhecimento prévio da estrutura dos agrupamentos e se utiliza de medidas de validação para determinar o número de famílias.

A presença de *outliers* e de regiões de sobreposição afetam diretamente a interpretação visual do diagrama de frequência de polos, impedindo, em muitos casos, que as famílias sejam separadas razoavelmente. A associação equivocada dessas descontinuidades pode alterar a atitude média, o tamanho, o formato e a densidade das famílias (JAIN, 2010). Essas alterações podem influenciar diretamente no cálculo da probabilidade de ruptura de um talude de cava quando tais rupturas são condicionadas por descontinuidades.

O Heurística tem como parâmetro de entrada a atitude de todos os pontos coletados em campo, ou seja, o mergulho (dip) e azimute de mergulho (dip direction) de cada descontinuidade. Além disso é necessário atribuir o número de agrupamentos que se deseja gerar, que neste trabalho variou de 3 a 6 conjuntos até se obter um resultado adequado e válido para cada situação, e o limite mínimo de inclusão de uma descontinuidade em uma família, que foi adotado 0,6 para todos os casos, de acordo com proposição de Klen (2014).

Outro ponto considerado é o fato do banco de dados disponibilizado ser extenso e de grande variabilidade. Sendo assim, para maior uniformidade dos resultados e por serem mais atuais, filtraram-se os dados de Morro da Mina a partir de 2015.

Para melhor visualização das famílias, primeiramente foi feita uma análise das mesmas dentro de cada estrutura separadamente, sendo consideradas as falhas, as fraturas e a foliação. Sendo que esta última estrutura foi tratada como uma única família, e por ser facilmente identificada em campo, não requer a utilização do Heurística para sua definição. A foliação varia pouco na cava apresentando trend mais ou menos contínuo. Além disso, em decorrência do pequeno número de pontos caracterizados como falhas, também não houve necessidade do

uso do Heurística nesse caso, o agrupamento pode ser feito visualmente, considerando ponto a ponto, visto que a persistência das mesmas é elevada. Tais análises encontram-se nos anexos deste trabalho.

O Heurística requer como parâmetro de entrada o número máximo de agrupamentos (famílias) que se deseja gerar. Por exemplo, se esse número for igual a 5, o Heurística gera agrupamentos de 2, 3, 4 e 5 famílias.

Como saída são apresentados o número ideal de famílias de descontinuidades, quais são e quantos são os elementos que compõem as famílias, a atitude média de cada família e as descontinuidades consideradas como sobreposições e *outliers*. Com as famílias previamente definidas pelo algoritmo, este permite que os resultados sejam introduzidos no Software Dips de projeção hemisférica para a visualização dos agrupamentos de descontinuidades e de suas características, juntamente com as sobreposições e os *outliers*, que podem ser removidos da análise, se assim desejar o usuário, já que foram identificados e caracterizados como família 0 (set 0.0) dentro do programa.

O número ideal de famílias é definido no Heurística a partir das medidas de validação utilizadas na análise (Klen, 2014). O usuário pode usar essa informação, mas também é fundamental associá-la à visualização do diagrama de polos na projeção hemisférica e à interpretação dessas famílias com base no conhecimento do especialista.

#### 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 5.1 Análise inicial

A Figura 7, a seguir, ilustra o método clássico, ou seja, um diagrama de frequência de polos e as curvas de isofrequência para as famílias de descontinuidades apenas do setor 1B da mina Morro da Mina, considerando o banco de dados desde 2013.

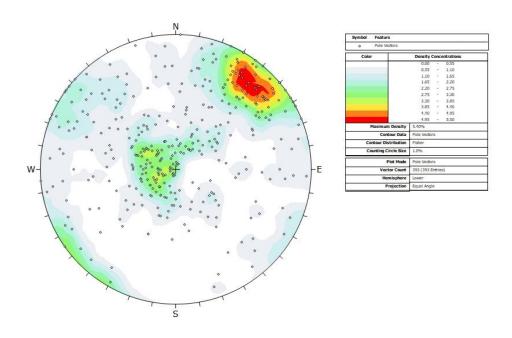


Figura 7: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para identificação de famílias.

Como é de se notar é muito difícil a determinação do número exato de famílias e das descontinuidades incluídas nessas famílias, devido à grande quantidade de pontos dispersos.

Para uma melhor análise, filtraram-se os pontos pelas estruturas: falhas, fraturas e foliação, para esse mesmo setor 1B, mas ainda assim mantendo a grande quantidade de pontos coletados desde 2013. A Figura 8 ilustra o diagrama de frequência de polos e as curvas de isofrequência para as famílias de descontinuidades considerando apenas as fraturas existentes no setor 1B da mina Morro da Mina.

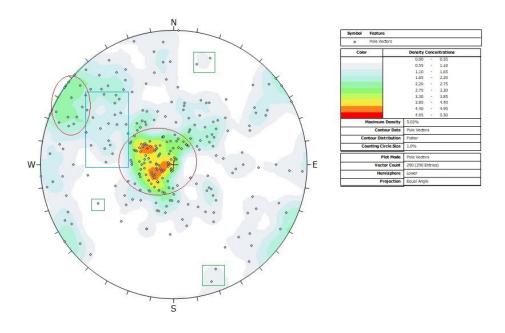


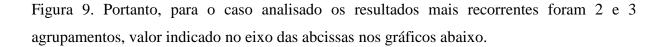
Figura 8: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência com um número menor de pontos.

As regiões marcadas com elipses vermelhas representam as duas possíveis famílias, os quadrados verdes representam possíveis *outliers* e o retângulo azul, a região de sobreposição. Mas diversos outros polos aparecem na Figura 8, sendo muito difícil sua classificação; são *outliers*, regiões de sobreposição ou há mais famílias presentes?

Pode-se observar como é ambíguo e dificultoso determinar em qual família os pontos da região de sobreposição devem ser alocados, mesmo que reduzindo a quantidade de pontos em análise. Bem como definir quais são exatamente os *outliers*. Ainda que limitando a análise apenas para as fraturas do setor 1B, há um grande número de pontos dispersos, dificultando a definição do número de famílias. Assim sendo, foram utilizadas apenas informações provenientes de mapeamentos mais atualizados (a partir de 2015) e o uso do Heurística para a definição das famílias de fraturas, nas quais há grande número de pontos e não é possível agrupá-las visualmente.

#### **5.2 Setor 1B**

Foram definidas 2 ou 3 famílias pelo Heurística, para as fraturas, de acordo com as medidas de validação utilizadas pelo programa (Figura 9). Essas medidas representam a eficácia do algoritmo utilizado para definição dos agrupamentos, segundo Klen (2014). Através delas é possível verificar qual o número de agrupamentos ideal. Em algumas dessas medidas são avaliados seus valores máximos; em outras os valores mínimos, conforme pode ser visto na



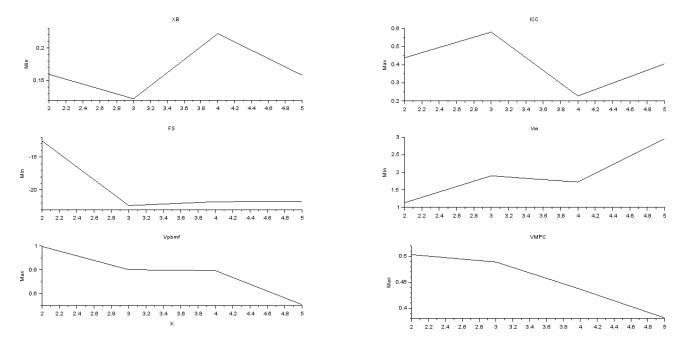


Figura 9: Medidas de validação para fraturas do setor 1B.

Quando os resultados do Heurística são visualizados no Dips, duas famílias se tornam evidentes, sendo este o melhor resultado. O diagrama de famílias de descontinuidades das fraturas encontra-se no ANEXO 1 deste trabalho, bem como as médias da atitude das mesmas. A região de sobreposição e os outliers foram retirados do diagrama para facilitar a visualização das famílias. A Figura 10 ilustra as características das fraturas desse setor.

Comparando os resultados encontrados com os dados da Figura 8, em que se utilizaram pontos coletados desde 2013 juntamente com *outliers* e sobreposições, há alterações de forma, densidade e tamanho. As famílias ficaram mais nítidas, bem definidas e a média (indicada na legenda por set 100.0) localizada no centro de concentração das curvas está bem posicionada e representativa da concentração de polos.

Para as falhas deste setor, foi possível a determinação de 3 famílias visualmente, visto que são apenas 6 pontos de descontinuidades identificadas em campo. A Figura 11 ilustra uma falha deste setor. O diagrama de polos para as famílias de falhas e o diagrama da foliação (estrutura ilustrada na Figura 12) desse setor estão no ANEXO 1 deste trabalho, com as médias das atitudes indicadas.

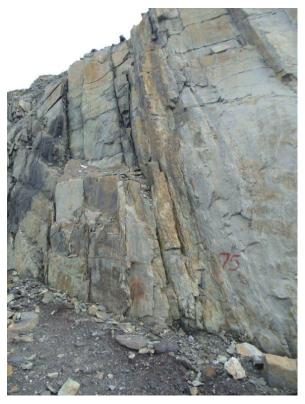


Figura 10: Fraturas do setor 1B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).



Figura 11: Falha do setor 1B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).



Figura 12: Foliação do setor 1B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).

Ao todo, foram então determinadas 6 famílias de descontinuidades no setor 1B. Sendo 2 famílias de fraturas, 3 famílias de falhas e a foliação. Todas as estruturas estão representadas na Figura 13.

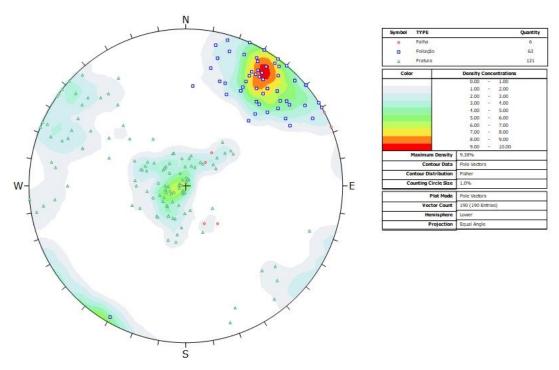


Figura 13: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para as famílias de descontinuidades do setor 1B.

#### **5.3 Setor 2B**

Pelos gráficos das medidas de validação do Heurística tem-se que o melhor resultado são 2 famílias de fraturas para o setor 2B (Figura 14).

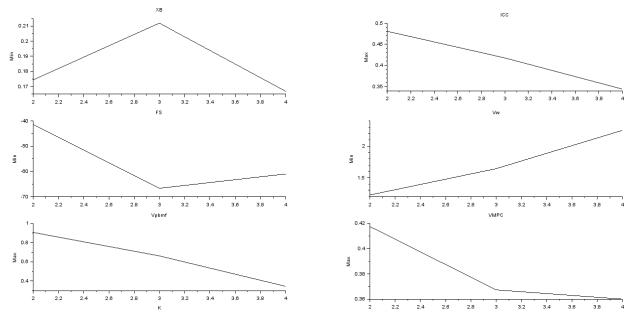


Figura 14: Medidas de validação para fraturas do setor 2B.

O diagrama de famílias de fraturas e a atitude média das descontinuidades das mesmas encontram-se no ANEXO 2 deste trabalho.

Para as falhas deste setor, foi possível a determinação de 3 famílias visualmente. O diagrama de polos para as famílias de falhas do setor 2B está no ANEXO 2 deste trabalho, bem como, o diagrama da foliação e a média das atitudes das descontinuidades de ambas estruturas.

As figuras 15, 16 e 17, a seguir, ilustram, respectivamente pontos coletados em campo para fraturas, falhas e foliação desse setor.



Figura 15: Fraturas do setor 2B (Imagem fornecida pela Vale S.A.).



Figura 16: Falha do setor 2B (Imagem fornecida pela Vale S.A.).



Figura 17: Foliação do setor 2B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).

Ao todo, foram então determinadas 6 famílias de descontinuidades do setor 2B. Sendo 2 famílias de fraturas, 3 famílias de falhas e a foliação. Todas as estruturas estão representadas na Figura 18.

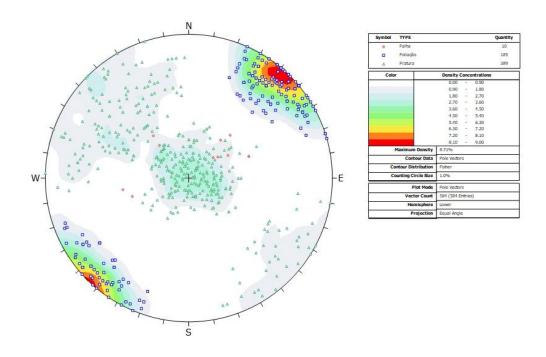


Figura 18: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência as famílias de descontinuidades do setor 2B.

## **5.4 Setor 3B**

Pelos gráficos das medidas de validação fornecidos pelo Heurística, tem-se definidas, para as fraturas do setor 3B, 3 famílias (Figura 19).

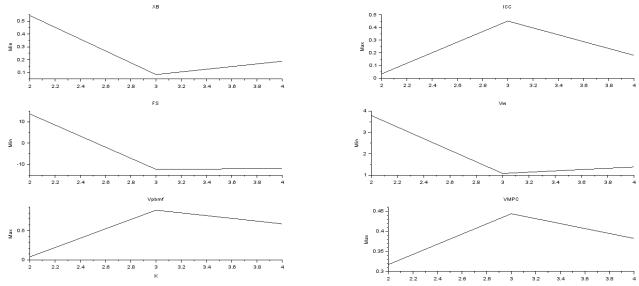
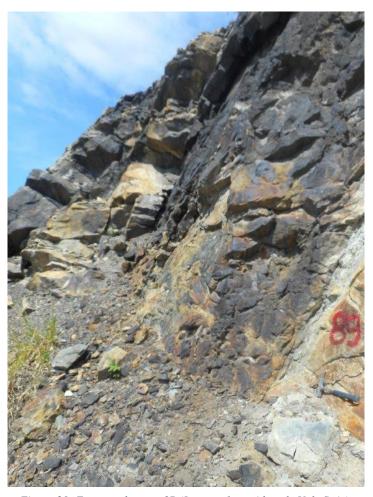


Figura 19: Medidas de validação para fraturas do setor 3B.

O diagrama de famílias de fraturas e as médias das atitudes destas encontram-se no ANEXO 3 deste trabalho. Uma das famílias de fraturas identificadas é sub vertical e duas dessas famílias são sub-horizontais que se sobrepõem no centro da projeção, não fornecendo uma interpretação satisfatória. No entanto, o Heurística divide esses pontos amostrados em dois agrupamentos distintos, pois considera *outliers* existentes entre ambas famílias. Dessa forma, para esse caso, os *outliers* (representados no diagrama por set 0.0) não foram removidos da projeção a fim de se obter uma melhor visualização e alocação das descontinuidades. A Figura 20 ilustra as fraturas deste setor.

Para as falhas (ilustradas na Figura 21) deste setor, foi possível a determinação de 3 famílias visualmente. O diagrama de polos para as famílias de falhas do setor 3B estão no ANEXO 3 deste trabalho, assim como o diagrama da foliação e a média das atitudes. A Figura 22 ilustra a foliação do setor.



Figura~20:~Fraturas~do~setor~3B~(Imagem~fornecida~pela~Vale~S.~A.).



Figura 21: Falha do setor 3B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).



Figura 22: Foliação do setor 3B (Imagem fornecida pela Vale S. A.)

Ao todo, foram então determinadas 7 famílias de descontinuidades do setor 3B. Sendo 3 famílias de fraturas, 3 famílias de falhas e a foliação. Todas as estruturas estão representadas na Figura 23.

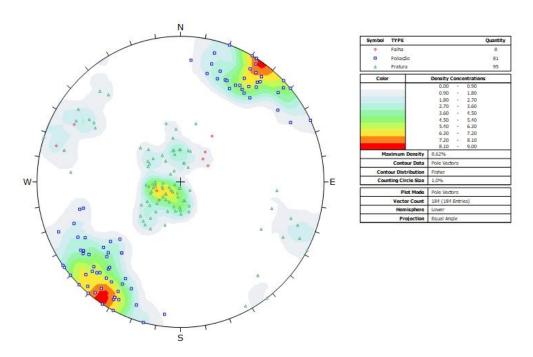


Figura 23: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para as famílias de descontinuidades do setor 3B.

## **5.5 Setor 4B**

No setor 4B ocorre um problema nas medidas de validação para as famílias de fraturas. Os gráficos com as medidas de validação definem 2, 3 ou até mesmo a possibilidade de 5 agrupamentos (Figura 24).

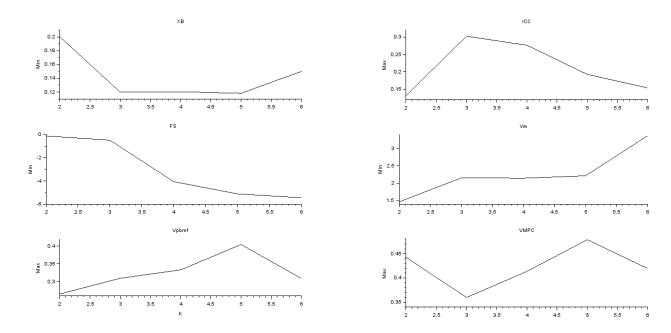


Figura 24: Medidas de validação para fraturas do setor 4B.

No entanto, quando se faz a averiguação dessas descontinuidades no Dips e tenta-se agrupar os pontos em 5 famílias, o resultado é inadequado, visto que são poucos pontos amostrados e a atitude deles se aproximam, como ilustrado na Figura 25. É dificultoso determinar em qual família os pontos devem ser alocados ou se deveriam se enquadrar em uma única família, visto que são muito próximos e concentrados em uma só região. Além disso, o algoritmo atribui um único ponto de fratura como sendo uma família, o que é errôneo.

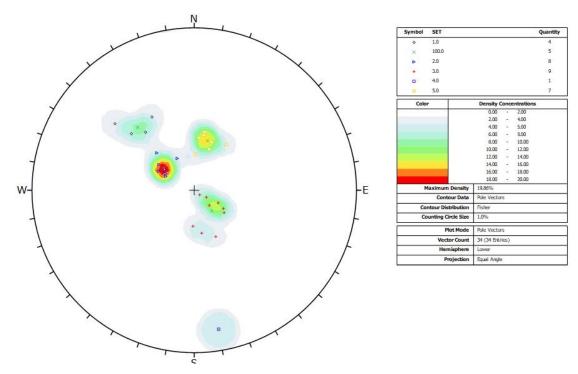


Figura 25: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para identificação de 5 famílias de descontinuidades nas fraturas do setor 4B.

Na Figura 26 também se destaca um problema. Ao utilizar 3 famílias para as fraturas do setor 4B, surge uma família subvertical que interfere de forma negativa na definição das demais, que se confundem no centro da projeção.

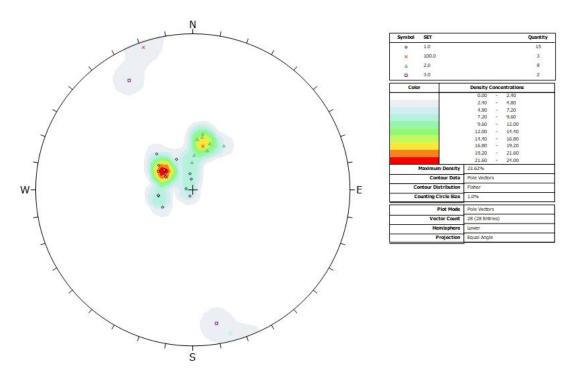


Figura 26: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para 3 famílias de fraturas no setor 4B.

A família subvertical tem apenas 2 pontos, o que também é inadequado. Embora essa família se mostre claramente presente em outros setores aqui ela parece ser *outlier*, provavelmente pelo número reduzido de dados.

Sendo assim, para o setor 4B, após uma análise conjunta dos resultados do Heurística e dos resultados do Dips, conclui-se que 2 é o melhor número de famílias para as fraturas. O diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para fraturas encontra-se no ANEXO 4 deste trabalho, bem como o de falhas e o de foliação e a média das atitudes.

Da mesma forma como ocorreu no setor 3B, os *outliers* não foram removidos da projeção, visto que ajudam a identificar visualmente a separação das duas famílias subhorizontais.

Para as falhas deste setor, foi possível a determinação de 2 famílias visualmente, visto que são apenas 2 pontos. É importante ressaltar que para falhas é crucial se considerar todos os pontos amostrados, porque embora pouco frequentes, representam descontinuidades de grande impacto na estabilidade dos taludes.

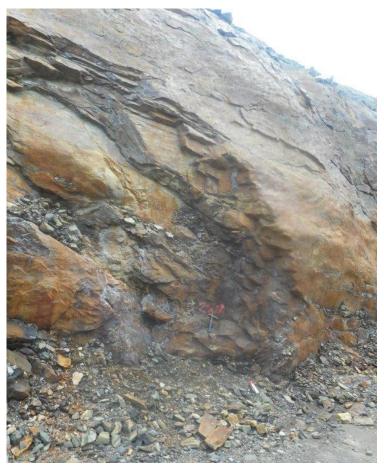
As Figuras 27, 28 e 29 a seguir, ilustram, respectivamente, as fraturas, as falhas e a foliação deste setor.



Figura 27: Fraturas do setor 4B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).



Figura 28: Falha do setor 4B (Imagem fornecida pela Vale S.A.).



 $Figura\ 29:\ Foliação\ do\ setor\ 4B\ (Imagem\ fornecida\ pela\ Vale\ S.A.).$ 

Ao todo, foram então determinadas 5 famílias de descontinuidades do setor 4B. Sendo 2 famílias de fraturas, 2 famílias de falhas e a foliação. Todas as estruturas estão representadas na Figura 30.

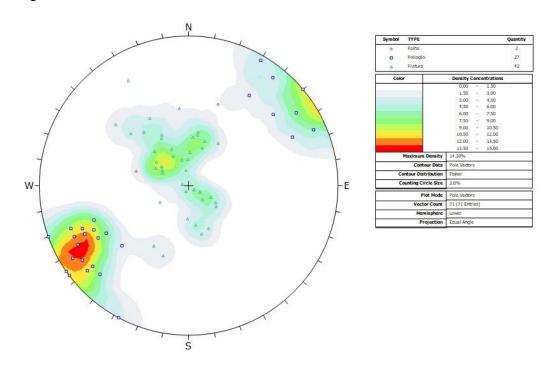


Figura 30: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para as famílias de descontinuidades do setor 4B.

## **5.6 Setor 5B**

Para as fraturas do setor 5B, o Heurística indica a presença de 3 agrupamentos, como é possível observar pela frequência de máximos e mínimos dos gráficos das medidas de validação apresentados na Figura 31.

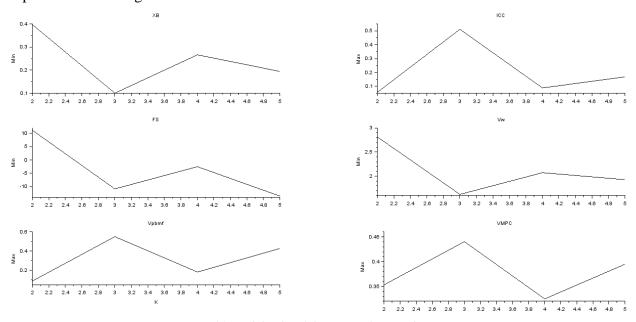


Figura 31: Medidas de validação para fraturas do setor 5B.

O diagrama de famílias de fraturas e a média das atitudes delas encontram-se no ANEXO 5 deste trabalho. Há apenas uma falha identificada neste setor, cujo diagrama, juntamente com o diagrama da foliação, também se encontra nesse anexo. As Figuras 32, 33 e 34 ilustram, respectivamente, as fraturas, as falhas e a foliação deste setor.



Figura 32: Fraturas do setor 5B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).



Figura 33: Falha do setor 5B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).



Figura 34: Foliação do setor 5B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).

Ao todo, foram então determinadas 5 famílias de descontinuidades do setor 5B. Sendo 3 famílias de fraturas, 1 falha e a foliação. Todas as estruturas estão representadas na Figura 35.

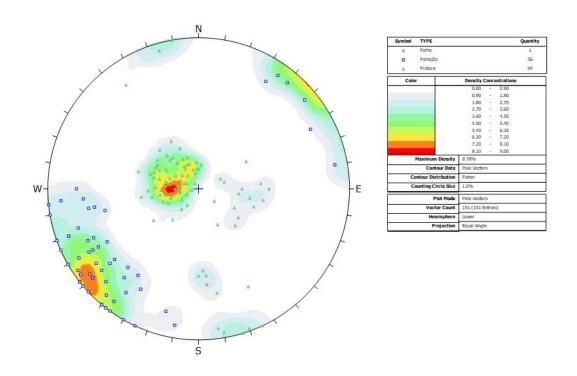


Figura 35: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para as famílias de descontinuidades do setor 5B.

## **5.7 Setor 6B**

O algoritmo Heurística indica a presença de 3 famílias de fraturas para o setor 6B, de acordo com as medidas de validação apresentadas na Figura 36.

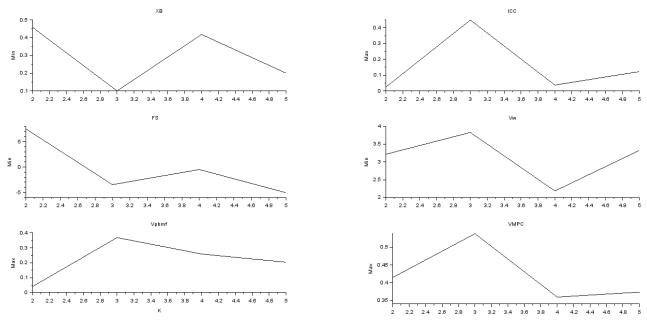


Figura 36: Medidas de validação para fraturas do setor 6B.

Mesmo que o Heurística tenha definido 3 agrupamentos para as fraturas, a interpretação dos dados quando visualizados no Dips é de extrema importância. Para esse caso, pode-se observar que é melhor considerarmos apenas a família sub-horizontal para as fraturas. O restante dos pontos podem ser caracterizados como *outliers* uma vez que se encontram muito dispersos, o que faz com que o agrupamento de pontos neste setor não seja satisfatório, além disso, há um pequeno volume de dados. O diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência das fraturas, tanto com o resultado proveniente do Heurística, quanto com a definição de uma única família, encontra-se no ANEXO 6 deste trabalho. Os *outliers* não foram removidos para uma melhor visualização da família sub-horizontal.

O diagrama de falhas e o de foliação e as médias das atitudes encontram-se no mesmo anexo. Há apenas uma família de falhas identificada neste setor, composta por duas descontinuidades de atitude semelhante.

As imagens a seguir (Figuras 37, 38 e 39) ilustram, respectivamente, as fraturas, as falhas e a foliação do setor 6B.



Figura 37: Fraturas do setor 6B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).



Figura 38: Falha do setor 6B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).



Figura 39: Foliação do setor 6B (Imagem fornecida pela Vale S. A.).

Ao todo, foram então determinadas 3 famílias de descontinuidades do setor 6B. Sendo 1 família de fraturas, 1 família de falhas e a foliação. Todas as estruturas estão representadas na Figura 40.

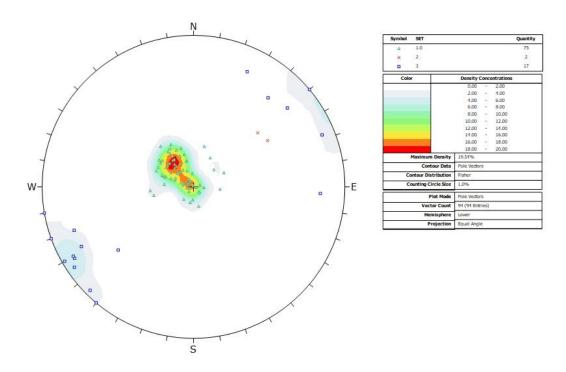


Figura 40: Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para as famílias de descontinuidades do setor 6B.

# 5.8 Atitudes médias

A Tabela 10 informa a média das atitudes de todas as famílias de falhas, fraturas e foliação para cada um dos seis setores. Na qual a coluna "SET" representa a classificação daquela família dentro do setor em estudo.

Tabela 10: Médias das atitudes das famílias de descontinuidades de cada setor.

	FI	RATUR	AS	]	FALHA	S	F	OLIAÇÂ	ΟŽ
_	DIP	DD	SET	DIP	DD	SET	DIP	DD	SET
	82	122	1	26	219	3	80	217	6
Setor 1B	9	91	2	32	327	4			
				90	245	5			
	75	131	1	47	76	3	87	223	6
Setor 2B	5	234	2	38	139	4			
				36	233	5			
	23	161	1	30	224	4	88	39	7
Setor 3B	18	42	2	21	60	5			
	92	299	3	82	112	6			
Setor 4B	18	341	1	40	105	3	85	55	5
Setor 4D	32	155	2	60	200	4			
	21	108	1	65	355	4	84	54	5
Setor 5B	31	281	2						
	84	345	3						
Setor 6B	15	138	1	59	234	2	90	58	3

#### 6. CONCLUSÕES

Os objetivos do trabalho foram alcançados. As famílias de descontinuidades foram definidas dentro de cada setor de Morro da Mina. Quando os agrupamentos são claramente separados e compactos, não existe ambiguidade ou incerteza na associação de cada descontinuidade a sua respectiva família, podendo ser feito a identificação visual dentro do diagrama de polos gerado pelo método clássico, no software Dips. Porém, quando os agrupamentos se sobrepõem ou possuem suas fronteiras muito próximas, a alocação das descontinuidades que estão nesta região não é clara, necessitando do uso de ferramentas numéricas e cuidadosa interpretação dos diagramas de polos e da estruturação do maciço rochoso.

Mesmo que esse trabalho em conjunto, do Heurística e do Dips, se mostre bastante eficaz para a consumação do objetivo, algumas dificuldades foram encontradas, como por exemplo no setor 4B. Devido à pequena quantidade de dados e a grande dispersão dos mesmos, o Heurística não definiu de forma eficiente os agrupamentos destes, necessitando de generalizações e suposições. Fez-se necessário, para este caso, uma análise mais detalhada pelo método de tentativas e erros, averiguando-se cautelosamente qual resultado mais se aproxima da realidade encontrada em campo. O mesmo ocorreu no setor 6B.

Pode se observar a família sub-horizontal recorrente em todos os setores e a uniformidade da localização da foliação no maciço. Além disso, conclui-se que as falhas são estruturas que devem ser consideradas ponto a ponto, mesmo que pouco frequentes, devido à grande persistência das mesmas no maciço e sua forte influência na estabilidade dos taludes.

#### 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As descontinuidades estudadas foram apenas as existentes nos subsetores B, julgadas pertinentes para realização de análises cinemáticas, caso o intuito seja avaliar posteriormente o potencial desenvolvimento de rupturas, tais como planar, em cunha, tombamento flexural e tombamento de blocos. Para os subsetores A essa análise não foi feita devido aos mesmos serem compostos integralmente por litologias propensas a apenas ocorrência de rupturas circulares, não havendo necessidade de análises cinemáticas.

Dessa forma, com a definição das famílias de descontinuidades dos subsetores B, a análise cinemática dentro do software Dips torna-se próximo passo para um estudo da estabilidade dos taludes de cada setor B de Morro da Mina.

Outro estudo de grande importância conseguinte a este trabalho é a análise das características das descontinuidades, em que se assemelham ou se divergem dentro de um mesmo setor, podendo averiguar se as famílias seguem um padrão coerente de caracterização e se correspondem às reais peculiaridades observadas em campo, visto que essas estruturas condicionam o comportamento dos maciços rochosos, tendo forte influência na estabilidade do mesmo.

Além disso, análise de grau de fraturamento e subsídios para desmonte podem ser feitos a partir deste estudo.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia), 1998 — Geologia de Engenharia. Editores: António Manoel dos Santos Oliveira e Sérgio Nertan Alves de Brito. Pág. 214-216.

ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Geologia de Engenharia. São Paulo: BGE/FAPESP/CNPQ, 1998. 576 p.

BARTON, N., LIEN, R.; LUNDE, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of rock support. Rock Mechanics.

BIENIAWSKI, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. Wiley-Interscience. pp. 40–47. ISBN 0-471-60172-1.

GEOESTÁVEL (2014). Projeto Básico Cava e Depósito de Estéril. Laudo de Segurança da Cava Atual. Relatório Técnico Interno, 153p.

HUDSON, J.A.; HARRISON J.P. (1997). Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. ELSEVIER SCIENCE Ltd Oxford,UK.

ISRM (1981). Rock Characterization Testing and Monitoring. E.T.Brown, 211 p. London 470 p.

ISRM (2007). Rock Characterization Testing and Monitoring. E.T.Brown.

JAIN, A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means. Pattern Recognition Letters, n. 31, p. 651-666, 2010.

KLEN, A.M. (2014). Algoritmo para agrupamento de descontinuidades em famílias baseado no método fuzzy k-means. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia (NUGEO), UFOP, 157 p.

PRIEST, S. D. (1993). Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman & Hall.

ROCSCIENCE INC. (2017), Dips Version 7.012 - Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.

SANTOS, T. B. (2015). Aplicabilidade das classificações geomecânicas e retroanálises para estimação das propriedades dos maciços rochosos. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral (PPGEM), UFOP, 154 p.

# **ANEXOS**

# ANEXO 1

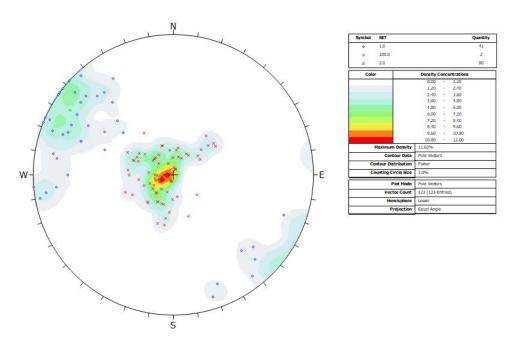


Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência mostrando 2 famílias de fraturas no setor 1B. A legenda indicando set 100.0 representa a localização das médias na projeção, bem como o valor dessa atitude média foi indicado na tabela a seguir.

DIP	DIP DIRECTION	SET
82.0	122.0	100.0
9.0	91.0	100.0

Tabela com as atitudes médias das fraturas do setor 1B geradas pelo Heurística.

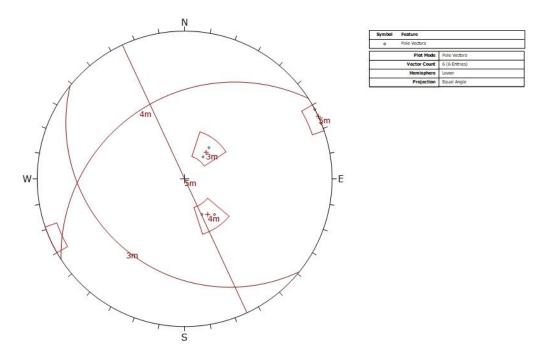


Diagrama de polos para 3 famílias de falhas do setor 1B.

<b>FALHAS</b>			
PONTO	DIP	DD	SET
03/15	35	320	4
04/15	30	334	4
67/15	90	242	5
67/15	90	248	5
79/15	30	218	3
79/15	22	220	3

Tabela com as atitudes das falhas do setor 1B.

DIP	DIP DIRECTION	SET
26	219	3
32	327	4
90	245	5

Tabela com as atitudes médias das falhas do setor 1B.

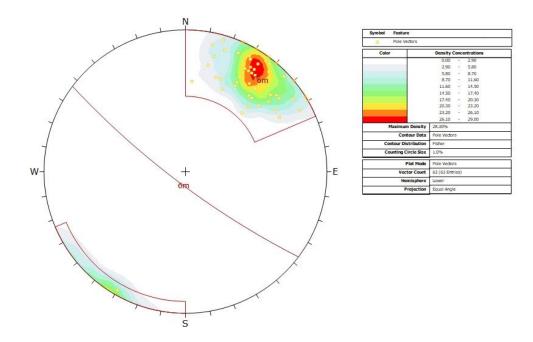


Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para família de descontinuidades de foliação do setor 1B.

DIP	DIP DIRECTION	SET
80	217	6

Tabela com a atitude média da foliação do setor 1B.

# ANEXO 2

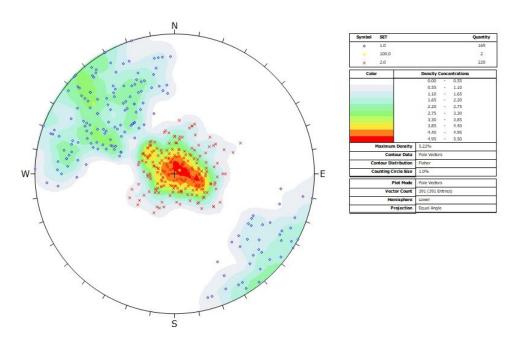


Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência mostrando 2 famílias de fraturas no setor 2B. A legenda indicando set 100.0 representa a localização das médias na projeção, bem como o valor dessa atitude média foi indicado na tabela a seguir.

DIP	DIP DIRECTION	SET
75.0	131.0	100.0
5.0	234.0	100.0

Tabela com as atitudes médias das fraturas do setor 2B geradas pelo Heurística.

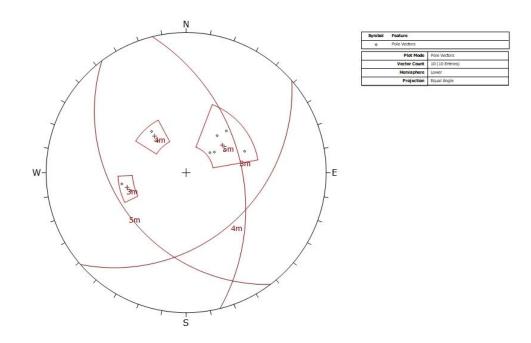


Diagrama polos para 3 famílias de falhas do setor 2B.

<b>FALHAS</b>			
PONTO	DIP	DD	SET
42/15	45	72	3
42/15	50	80	3
83/15	34	138	4
83/15	42	140	4
93/15	45	224	5
93/15	38	220	5
118/15	35	240	5
118/15	28	234	5
120/15	25	230	5
208/15	48	250	5

Tabela com as atitudes das falhas do setor 2B.

DIP	DIP DIRECTION	SET
47	76	3
38	139	4
36	233	5

Tabela com as atitudes médias das falhas do setor 2B.

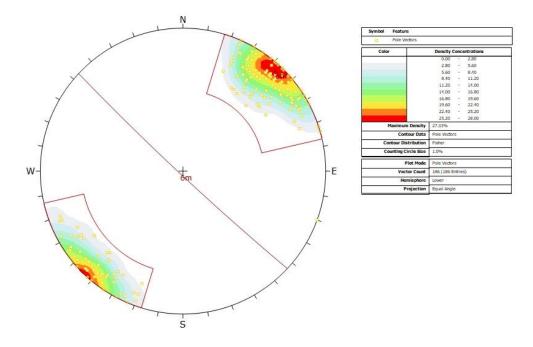


Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para família de descontinuidades de foliação no setor 2B.

DIP	DIP DIRECTION	SET
87	223	6

Tabela com a atitude média da foliação do setor 2B.

## **ANEXO 3**

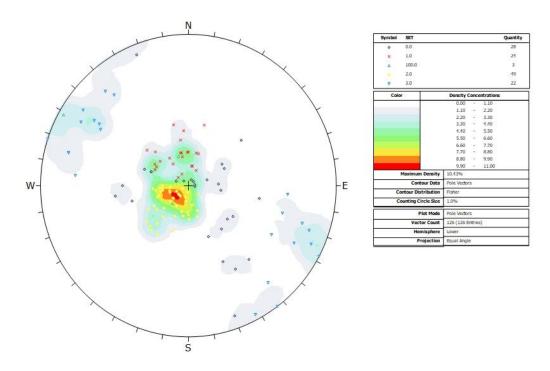


Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência mostrando 3 famílias de fraturas do setor 3B. A legenda indicando set 100.0 representa a localização das médias na projeção, bem como o valor dessa atitude média foi indicado na tabela a seguir.

DIP	DIP DIRECTION	SET
23.0	161.0	100.0
18.0	42.0	100.0
92.0	299.0	100.0

Tabela com as atitudes médias das fraturas do setor 3B geradas pelo Heurística.

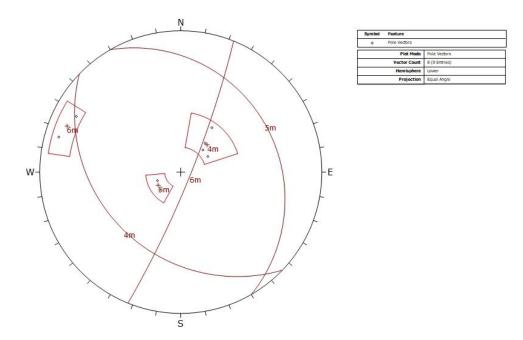


Diagrama de polos para 3 famílias de falhas do setor 3B.

<b>FALHAS</b>			
PONTO	DIP	DD	SET
252/15	42	215	4
253/15	22	50	5
253/15	20	70	5
254/15	80	118	6
254/15	84	106	6
380/16	25	240	4
381/16	25	225	4
383/16	30	220	4

Tabela com as atitudes das falhas do setor 3B.

DIP	DIP DIRECTION	SET
30	224	4
21	60	5
82	112	6

Tabela com as atitudes médias das falhas do setor 3B.

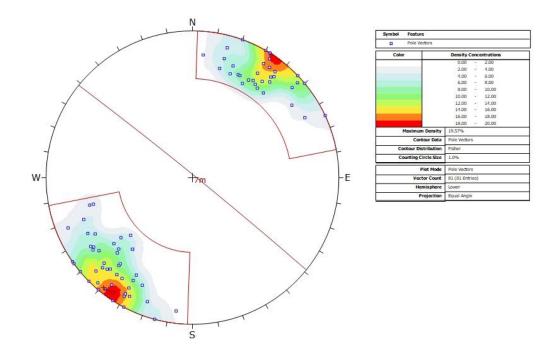


Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para família de descontinuidades de foliação do setor 3B.

DIP	DIP DIRECTION	SET
88	39	7

Tabela com a atitude média da foliação do setor 3B.

## **ANEXO 4**

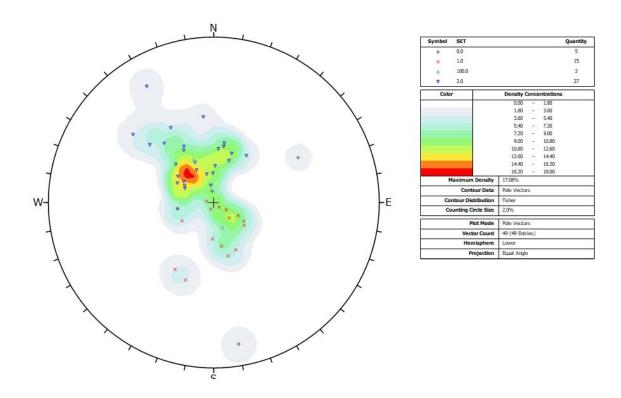


Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência mostrando 2 famílias de fraturas do setor 4B, visualizando os *outliers* ( representados por set 0.0) juntamente. A legenda indicando set 100.0 representa a localização das médias na projeção, bem como o valor dessa atitude média foi indicado na tabela a seguir.

DIP	DIP DIRECTION	SET
18.0	341.0	100.0
32.0	155.0	100.0

Tabela com as atitudes médias das fraturas do setor 4B geradas pelo Heurística.

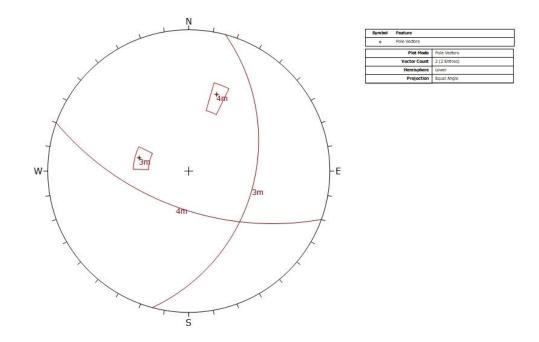


Diagrama de polos para 2 famílias de falhas do setor 4B.

<b>FALHAS</b>			
PONTO	DIP	DD	SET
83/17	40	105	3
85/17	60	200	4

Tabela com as atitudes das falhas do setor 4B.

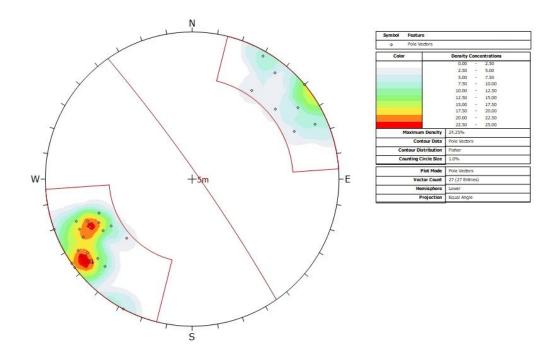


Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para família de descontinuidades de foliação do setor 4B.

DIP	DIP DIRECTION	SET
85	55	5

Tabela com a atitude média da foliação do setor 4B.

# **ANEXO 5**

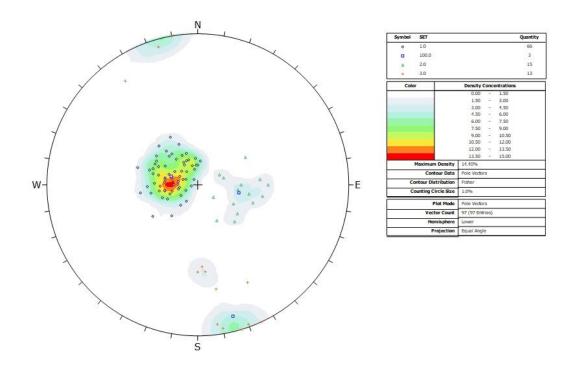


Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência mostrando 3 famílias de fraturas do setor 5B. A legenda indicando set 100.0 representa a localização das médias na projeção, bem como o valor dessa atitude média foi indicado na tabela a seguir.

DIP	DIP DIRECTION	SET
21.0	108.0	100.0
31.0	281.0	100.0
84.0	345.0	100.0

Tabela com as atitudes médias das fraturas do setor 5B geradas pelo Heurística.

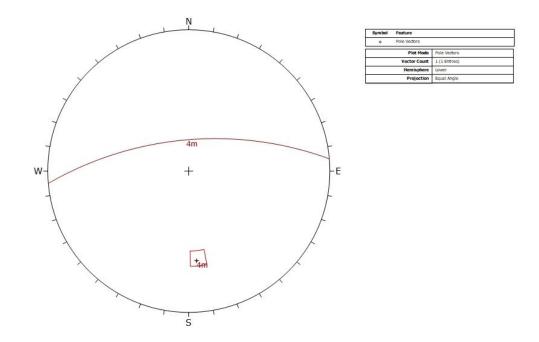


Diagrama de polos para a falha do setor 5B.

<b>FALHAS</b>			
PONTO	DIP	DD	SET
19/17	65	355	4

Tabela com a atitude da falha do setor 5B.

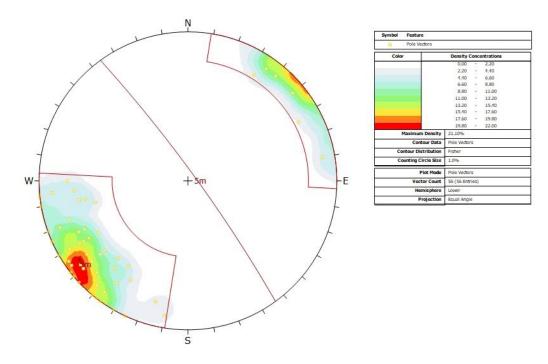


Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para família de descontinuidades de foliação do setor 5B.

DIP	DIP DIRECTION	SET
84	54	5

Tabela com a atitude média da foliação do setor 5B.

ANEXO 6

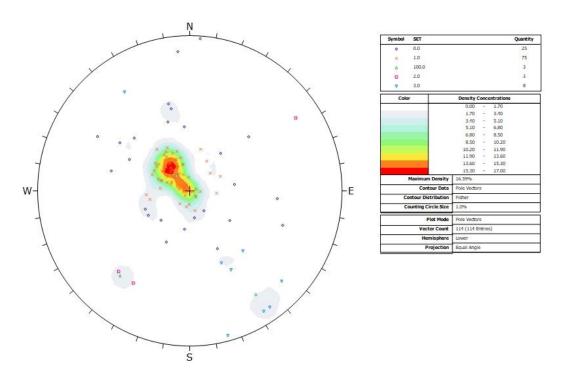


Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência mostrando 3 famílias de fraturas mais *outliers* (representado por set 0.0) do setor 6B. A legenda indicando set 100.0 representa a localização das médias na projeção, bem como o valor dessa atitude média foi indicado na tabela a seguir.

DIP	DIP DIRECTION	SET
15.0	138.0	100.0
71.0	40.0	100.0
77.0	327.0	100.0

Tabela com as atitudes médias das fraturas do setor 6B geradas pelo Heurística.

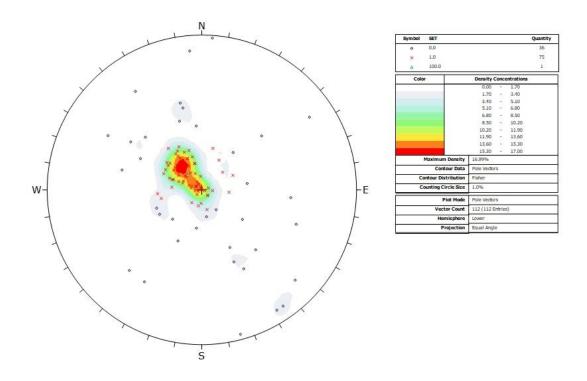


Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência mostrando 1 família de fraturas (família sub-horizontal) do setor 6B, considerando todos os demais pontos como *outliers* (indicado na legenda por set 0.0).

DIP	DIP DIRECTION	SET
15.0	138.0	100.0

Tabela com a atitude média da família de fraturas sub-horizontal do setor 6B gerada pelo Heurística.

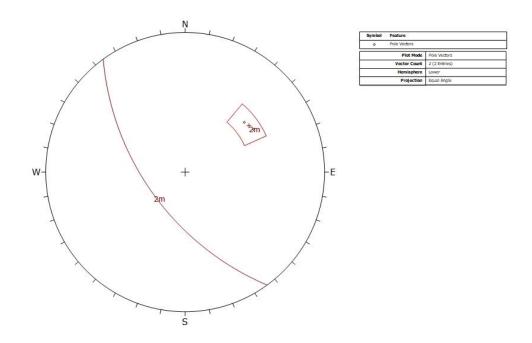


Diagrama de polos para a família de falhas do setor 6B.

<b>FALHAS</b>			
PONTO	DIP	DD	SET
314/15	60	238	2
314/15	58	230	2

Tabela com as atitudes das falhas do setor 6B.

DIP	DIP DIRECTION	SET
59	234	2

Tabela com a atitude média das falhas do setor 6B.

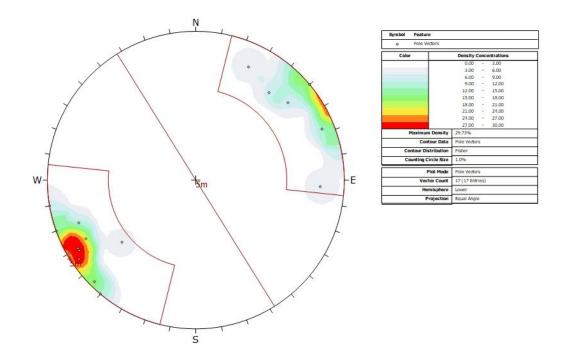


Diagrama de frequência de polos e curvas de isofrequência para família de descontinuidades de foliação do setor 6B.

DIP	DIP DIRECTION	SET
90	58	3

Tabela com a atitude média da foliação do setor 6B.