



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



***SOFTWARE PARA DETERMINAÇÃO DA ORIENTAÇÃO
MÉDIA DE UMA FAMÍLIA DE DESCONTINUIDADES:
APLICAÇÃO NA LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS***

JOÃO PEDRO CORONA GAVA

**OURO PRETO – MG
Dezembro de 2019**

***SOFTWARE PARA DETERMINAÇÃO DA ORIENTAÇÃO MÉDIA DE UMA
FAMÍLIA DE DESCONTINUIDADES: APLICAÇÃO NA LAVRA DE
ROCHAS ORNAMENTAIS***

JOÃO PEDRO CORONA GAVA

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:** Planejamento de Lavra.

Orientador: Prof. ELTON DESTRO
(DEMIN/EM/UFOP)

**OURO PRETO – MG
Dezembro de 2019**



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

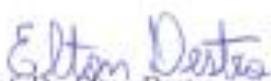
Aos 05 dias do mês de dezembro de 2019, às 10h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas DEMIN/EM, no Campus Universitário Morro do Cruzeiro, foi realizada a defesa da Monografia de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **"SOFTWARE PARA DETERMINAÇÃO DA ORIENTAÇÃO MÉDIA DE UMA FAMÍLIA DE DESCONTINUIDADES: APLICAÇÃO NA LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS"**, pelo aluno **João Pedro Corona Gava**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Elton Destro (orientador)**, **Prof. Dr. Tatiana Barreto dos Santos**, **Prof. Dr. Pedro Manuel Alameda Hernández** e **Prof. M. Sc. Juliano Tessinari Zagoto**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou pela *aprovação* do candidato, com a nota *9,5*, concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, 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 pelo discente.

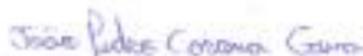
Ouro Preto, 05 de dezembro de 2019.


Prof. Dr. Elton Destro
Presidente da Comissão Avaliadora e Orientador


Prof. Dr. Tatiana Barreto dos Santos
Membro da Comissão Avaliadora


Prof. Dr. Pedro Manuel Alameda Hernández
Membro da Comissão Avaliadora


Prof. M. Sc. Juliano Tessinari Zagoto
Membro da Comissão Avaliadora


João Pedro Corona Gava


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 492 – Trabalho de Conclusão de Curso

Aos meus pais.

Aos amigos espalhados pelo mundo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a UFOP pelo ensino público de qualidade.

Aos meus pais, pelo apoio.

À Ingrid, por caminhar ao meu lado por tantos anos.

Ao prof. Elton pela paciência e excelente orientação.

Aos professores Juliano, Milene, Pedro, Rodrigo e Tatiana pela inspiração de vida e ajuda com a elaboração do trabalho.

À República Molotov e todos que me acompanharam por toda a graduação.

RESUMO

A presença de descontinuidades (falhas e fraturas) nos maciços rochosos causou e vem causando enormes prejuízos no setor de rochas ornamentais. Isto, porque os blocos cortados por estas estruturas fatalmente serão considerados como estéril e não serão aproveitados economicamente. Daí, é fácil imaginar as perdas financeiras e, também, os prejuízos ambientais que surgem em decorrência disto. Assim, esse projeto desenvolveu uma ferramenta computacional para representar as principais descontinuidades presentes nos maciços graníticos, calcular a atitude média da família e assim (re)orientar as faces dos blocos que serão lavrados, na tentativa de reduzir as perdas decorrentes da presença dessas estruturas, as quais inviabilizam o aproveitamento econômico dos blocos. É objetivo do trabalho, também, que o aplicativo computacional desenvolvido possa ser utilizado como uma ferramenta didático-pedagógica no estudo da lavra de blocos de rochas ornamentais pelos alunos e futuros engenheiros que venham a trabalhar nesse setor da mineração. O aplicativo desenvolvido nesse projeto demonstrou sua capacidade de auxiliar no planejamento da lavra de rochas ornamentais através da (re)orientação das faces dos blocos nos três casos analisados (uma descontinuidade horizontal e outra vertical; uma horizontal e outra com orientação qualquer; e duas descontinuidades com orientações quaisquer) com a possibilidade de aumentar a recuperação dos blocos lavrados na pedreira.

Palavras-chave: descontinuidades, atitude média, rochas ornamentais, aplicativo computacional.

ABSTRACT

The presence of discontinuities (faults and fractures) in the rock masses and has been causing huge economic losses to the ornamental stones sector. This happens because the blocks affected by these structures will inevitably be considered as waste and will not be used economically. Hence, it is easy to imagine the financial and environmental losses that arise as a result of this. Thus, this project developed a computational tool to represent the main discontinuities present in the granitic masses, to calculate the average attitude of the family and thus (re) orientate the faces of the blocks that will be mined in an attempt to reduce the losses resulting from the presence of these structures, which make the economic use of the blocks unfeasible. It is also the objective of this work that the software developed can be used as a didactic-pedagogical tool in the study of the ornamental stone blocks mining by the students and future engineers who will work in this mining sector. The software developed in this project demonstrated its ability to assist in the planning of ornamental rock mining by (re) orienting the faces of the blocks in the three cases analyzed (one horizontal and one vertical discontinuity, one horizontal and one with any orientation, and two discontinuities with any orientation) with the possibility of increasing the recovery of the quarry blocks.

Keywords: discontinuities, average attitude, ornamental stones, computational tool.

Sumário

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
Lista de Figuras	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Projeção Hemisférica	4
3.2. Projeção Polar e Equatorial	7
3.2.1. Projeção Polar.....	7
3.2.2. Projeção Equatorial.....	10
3.3. Atitude Média de Uma Família de Descontinuidades	12
3.4. Breve Estudo das Descontinuidades	14
3.5. Lavra de Rochas Ornamentais.....	15
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
6. CONCLUSÕES	32
Referências Bibliográficas	33

Lista de Figuras

- 3.1. *Trend* e *Plunge* de uma reta.
- 3.2. Orientação de um plano.
- 3.3. Esfera de referência, interceptada por uma linha de *trend* α e *plunge* β .
- 3.4. Seção vertical da esfera de referência mostrando a projeção de igual ângulo.
- 3.5. Rede de projeção polar de igual ângulo.
- 3.6. Traço ciclográfico ou grande círculo de um plano inclinado.
- 3.7. Rede da projeção equatorial de igual ângulo.
- 3.8. Exemplo de aglomeração de polos.
- 3.9. Desenho esquemático das principais propriedades geométricas das descontinuidades.
- 3.10. Métodos de lavra de blocos de rochas ornamentais.
- 3.11. Lavra de quartzito por bancadas altas em Gouveia, MG, com destaque para as principais descontinuidades presentes no maciço.
- 3.12. Ilustração esquemática do ciclo do desmonte com fio diamantado e perfuração.
- 3.13. Prancha separada aguardando tombamento, Governador Valadares, MG.
- 3.14. Bloco de rocha pronto para o beneficiamento, Governador Valadares, MG.
- 4.1. Entrada de dados do **SOF**.
- 4.2. Dados utilizados no 1º caso.
- 4.3. Dados utilizados no 2º caso.
- 4.4. Dados utilizados no 3º caso.
- 4.5. Vista em planta de uma representação de um maciço com duas famílias de descontinuidades.
- 5.1. Atitudes médias das famílias 1 e 2 (dip direction/dip).
- 5.2. Nuvem de polos com as atitudes médias (marcas “x”).

5.3. Orientação das faces do bloco (em azul) e polos das descontinuidades (em vermelho) para o 1º Caso.

5.4. Orientação das faces do bloco (em azul) e polos das descontinuidades (em vermelho) para o 2º Caso.

5.5. Orientação das faces do bloco (em azul) e polos das descontinuidades (em vermelho) para o 3º Caso.

1. INTRODUÇÃO

No livro *Recursos Naturais e Desenvolvimento: estudos sobre o potencial dinamizador da mineração na economia brasileira*, de 2013, os autores João Furtado e Eduardo Urias levantam a proposição que “*recursos naturais não existem, eles precisam ser criados*”. Aplicando a frase no contexto da mineração de rochas ornamentais, um maciço rochoso somente poderá dar origem a uma pedreira se existirem técnicas e equipamentos adequados para extrair os blocos.

Segundo Oliveira (2017), as rochas ornamentais podem ser definidas como a matéria-prima de origem mineral utilizada como material de construção com funções essencialmente decorativas. FRASCÁ (2014) cita várias definições para o termo rocha ornamental segundo a ABNT, ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e CEN (*European Committee for Standardization*), notando a ausência de uniformidade e consenso. Segundo a ABNT, rocha ornamental é material pétreo natural utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária. Já a ASTM define como “termo correspondente a *monumental stone*: rocha de qualidade adequada para ser lavrada e cortada como rocha dimensionada, tal qual existe na natureza e ser usada pela indústria de monumentos e memorial”. A CEN, por sua vez, não possui uma definição para tal termo.

No contexto comercial, os diversos tipos de rochas e a grande variedade existente em cada um, são, resumidamente, agrupados em três grandes categorias, mesmo que muitas vezes confundidas entre si: rochas silicáticas, rochas silicosas e rochas carbonáticas. As rochas silicáticas são aquelas formadas por porções variadas de minerais silicáticos, como feldspatos e micas, e silicosas, como quartzo, abrangendo materiais comercialmente classificados como granitos, pegmatitos (“feldspatos”), xistos. As rochas silicosas são aquelas essencialmente formadas por quartzo e/ou sílica amorfa, abrangendo os materiais comercialmente conhecidos como quartzitos, metaconglomerados e quartzos. Já as rochas carbonáticas são aquelas formadas por porções variadas de calcita, dolomita e outros carbonatos e incluem os grupos dos mármore, travertinos, calcários, ônix (mármore ônix) e alabastros (ABIROCHAS, 2018). A designação comercial de rochas ornamentais não é objeto de regulação ou normalização. A

fim de se estabelecer uma organização mínima, tradicionalmente orientava-se o produtor a designar seu material utilizando-se da cor, seguida pela localidade em que a rocha ocorria como, por exemplo, Vermelho Capão Bonito, Branco Ceará, Branco Paraná entre outras (FRASCÁ, 2014).

O setor de rochas ornamentais sofre com a presença de estruturas que atingem os blocos lavrados. Essas estruturas, que podem ser falhas, juntas ou acamamento, constantemente governam o comportamento geomecânico do maciço como um todo (HUDSON e HARRISON, 2005). Do ponto de vista da mecânica de rochas, a importância do estudo dessas descontinuidades é a geração de zonas de concentração de tensões e planos de fraqueza no maciço, afetando sua resistência a esforços e, potencialmente, causando rupturas (LAJTAI, 1998; JAGGER *et al.*, 2007).

A busca de soluções que reduzam as perdas é um constante desafio que o setor de rochas ornamentais enfrenta. Enormes são as perdas e não faltam motivos para que estas soluções sejam encontradas. Segundo Silva e Castro (2016), considerando um aproveitamento médio nas pedreiras de 20 a 25%, a quantidade de resíduos provenientes da lavra pode passar de 30 milhões de toneladas no país. O conhecimento da orientação das descontinuidades permite planejar de forma mais adequada a exploração dos blocos na pedreira, podendo-se, dessa forma, promover uma lavra ordenada com uma máxima recuperação e, por consequência, menor geração de estéril (DESTRO, 2000).

Os aplicativos computacionais que auxiliam no planejamento da lavra de blocos de rochas ornamentais são relativamente escassos no mercado, porém o que foi desenvolvido nesse projeto (**SOF: *Software para Orientação das Faces***) permite o cálculo da atitude média de uma família de descontinuidades e facilita a representação gráfica das estruturas que potencializam a ruptura dos blocos, além de ser uma ferramenta didático-pedagógica, pois o aluno terá a chance de aprimorar os conceitos e as metodologias propostas para reduzir as perdas de blocos devido à presença de descontinuidades.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Otimizar a extração de blocos na lavra de rochas ornamentais.

2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma ferramenta computacional que auxilie na (re)orientação das faces dos blocos de rochas ornamentais com base no valor médio da direção e do mergulho das descontinuidades existentes no maciço visando o aumento da recuperação dos blocos lavrados;
- Calcular as atitudes médias das famílias de descontinuidades e utilizar os valores obtidos como base para analisar um maciço hipotético em três casos específicos: maciço com duas descontinuidades ortogonais (uma horizontal e uma vertical), maciço com uma descontinuidade horizontal e outra com orientação qualquer, e maciço com duas descontinuidades de atitudes quaisquer;
- Utilizar o aplicativo computacional desenvolvido como uma ferramenta didático-pedagógica no estudo da lavra de blocos de rochas ornamentais pelos alunos e futuros engenheiros que venham a trabalhar nesse setor da mineração.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Projeção Hemisférica

Segundo PRIEST (1985), a **projeção hemisférica** é um método gráfico em que a orientação tridimensional de planos e retas pode ser representada nas duas dimensões de uma folha de papel. Esse método é comumente denominado de **projeção estereográfica** e possui grande aplicação no estudo da mecânica de rochas por oferecer uma representação gráfica de estruturas como, por exemplo, as descontinuidades no maciço rochoso, e não apenas uma abstração numérica.

Esse método, porém, não é perfeito: há uma certa imprecisão de cerca de 2° (dois graus) em relação à real orientação do plano na natureza. Isso ocorre, essencialmente, porque as descontinuidades naturais são raramente planares ao longo de todo o maciço rochoso (PRIEST, 1985).

Os elementos de uma projeção estereográfica são apresentados a seguir.

- ***Plunge***

Plunge, também chamado de “inclinação”, representado comumente pela letra grega beta (β), é o ângulo agudo ($-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$), medido num plano vertical, entre uma dada linha e o plano horizontal. Por convenção, uma linha declinando a partir da horizontal possui *plunge* positivo. Já uma linha inclinando a partir da horizontal possui *plunge* negativo.

- ***Trend***

Trend, representado comumente pela letra grega alfa (α), é o azimute geográfico da linha de *plunge* β ($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$), medido em sentido horário a partir do Norte (0°). Por convenção, o *trend* é medido na direção do *plunge*.

Esses termos, mostrados na figura 3.1, geralmente são apresentados em termos de α e β como números de três e dois dígitos, respectivamente, separados por uma barra (e.g. 136/57).

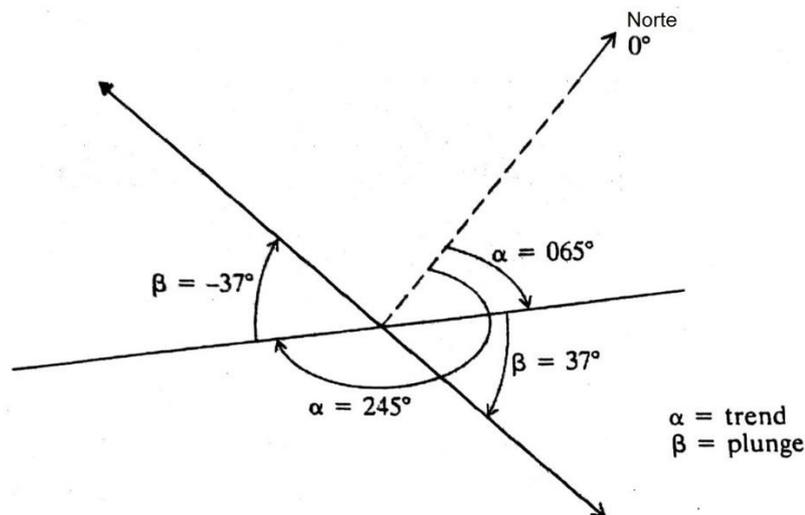


Figura 3.1 - Trend e Plunge de uma reta. **Fonte:** adaptado de PRIEST (1985).

Como se pode observar, a parte inferior da linha declinando possui um *trend* de 065° e um *plunge* de 37° , enquanto a parte superior da linha possui um *trend* de 245° ($065^\circ + 180^\circ$) e um *plunge* de -37° . Portanto, a notação utilizada para os dois casos é $065/37$ e $245/-37$, respectivamente.

Outras notações podem ser encontradas em livros relacionados à mecânica das rochas:

- a) α_d, β_d : para representar a linha de máximo mergulho (do inglês, *dip*) ou máxima inclinação de um plano. Essa é a linha imaginária contida no plano cujo mergulho excede o de todas as outras linhas desse plano. Para uma melhor assimilação dessa e das próximas definições, deve-se visualizar um plano como sendo um conjunto de infinitas linhas coplanares (contidas no mesmo plano) irradiando de um mesmo ponto. Uma dessas linhas será a de máximo mergulho. A orientação de um elemento de um plano inclinado é normalmente descrita em termos de α_d e β_d seguindo a notação citada anteriormente, ou seja, α_d/β_d . Nesses casos, α_d é chamado de *dip direction* ou direção de mergulho e β_d de *dip amount*, *dip*, *angle of dip*, isto é, ângulo de mergulho ou, ainda, apenas mergulho (PRIEST, 1985). Esses valores podem ser medidos no campo com o uso da bússola de geólogo. Nesse trabalho serão utilizados *dip direction* e *dip*, pois são os termos mais adotados na mineração.

- b) α_n, β_n : para representar a linha normal ao plano, o “polo”, que é uma linha imaginária perpendicular ao plano considerado. Para um dado plano, $\alpha_n = \alpha_d \pm 180^\circ$, $0^\circ \leq \alpha_n \leq 360^\circ$ e $\beta_n = 90^\circ - \beta_d$.
- c) α_t : para representar o *strike*. É o azimute geográfico de uma linha horizontal imaginária contida num plano inclinado. Por conveniência, apenas o azimute de uma das extremidades da linha precisa ser calculado, portanto $0^\circ \leq \alpha_t \leq 180^\circ$. Para um dado plano, $\alpha_t = \alpha_d - 90^\circ(\pm 180^\circ)$ ou $\alpha_t = \alpha_n - 90^\circ(\pm 180^\circ)$.
- d) γ : para representar o *pitch*. É o ângulo agudo ($-90^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$) medido em um plano específico entre uma dada linha e o *strike* do plano. Analogamente ao *plunge*, linhas declinando em relação à horizontal possuem *pitch* positivo; linhas inclinando em relação à horizontal possuem *pitch* negativo. É importante determinar a direção do *pitch* e de qual extremidade do *strike* o ângulo foi medido. Para tal propósito, é suficiente especificar o quadrante geográfico (Sudeste, Nordeste, Noroeste, Sudoeste) em vez do azimute (e.g. 55°NE).

A figura 3.2 mostra um plano de *dip direction/dip* 215/63 (α_d/β_d). A normal ao plano possui *trend/plunge* 035/27 (α_n/β_n) e o *strike* do plano é 125° (α_t). A linha cujo *pitch* é 41° NW possui um *trend/plunge* de 284/36. Os cálculos referentes a essa última orientação foram realizados utilizando métodos de projeção hemisférica.

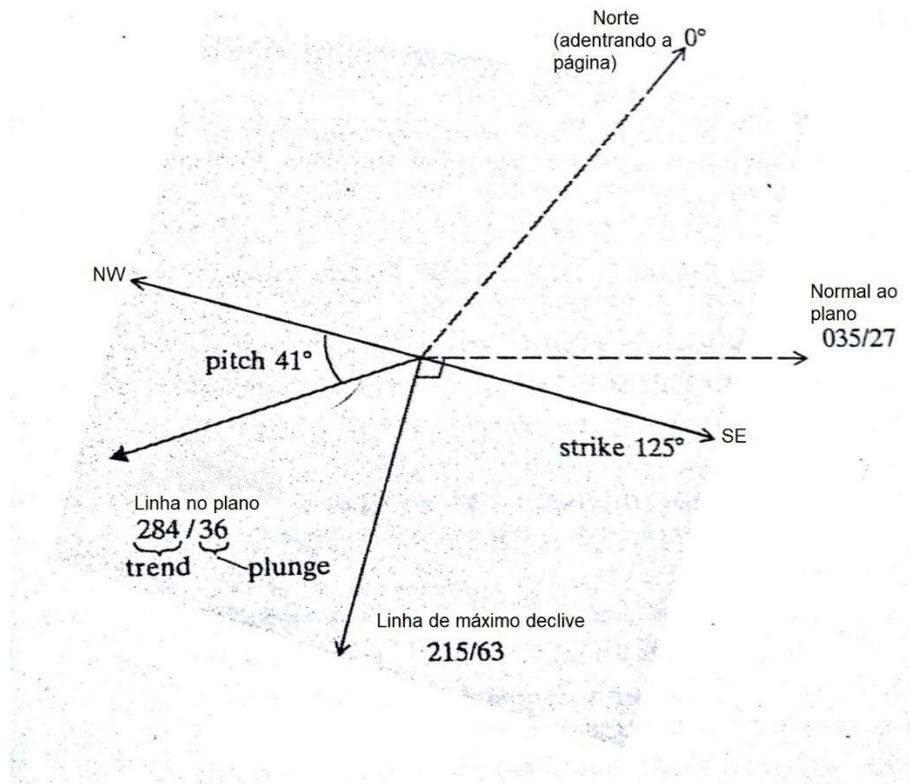


Figura 3.2 - Orientação de um plano. Fonte: adaptado de PRIEST (1985).

3.2. Projeção Polar e Equatorial

3.2.1. Projeção Polar

O princípio de todos os métodos de projeção é que a orientação de uma linha no espaço tridimensional é representada por um ponto num plano bidimensional chamado de área de projeção (PRIEST, 1985). Esse procedimento de converter três dimensões em duas recebe o nome de **projeção**, pois se assemelha a projetar uma sombra bidimensional de um objeto tridimensional utilizando uma fonte de luz. Na projeção hemisférica, a área de projeção é um círculo de raio R construído numa folha de papel. Uma linha de *plunge* igual a 90° se projeta como um ponto no centro do círculo; uma linha de *plunge* próximo de 0° se projeta como um ponto junto ao perímetro do círculo, com um azimute correspondente ao seu *trend*. A distância radial r do ponto, medido a partir do centro, é uma função do *plunge* da linha. A forma exata dessa função que relaciona r e β depende do método de projeção utilizado.

A base mais comum de todo método de projeção é uma esfera imaginária, chamada de esfera de referência, de raio R , posicionada com seu centro no centro da área de projeção. A figura 3.3 ilustra essa esfera de referência.

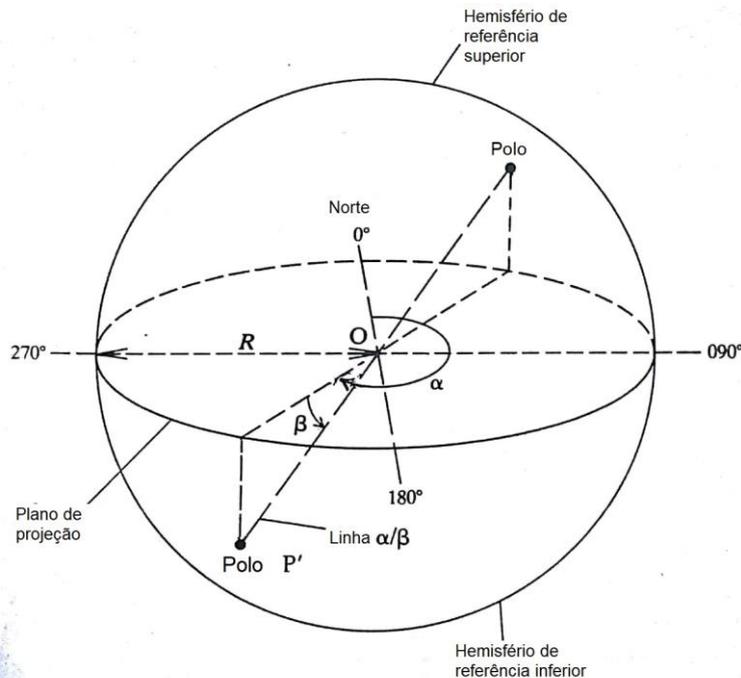


Figura 3.3 - Esfera de referência interceptada por uma linha de *trend* α e *plunge* β . **Fonte:** Adaptado de PRIEST (1985).

A linha, quando estendida, intercepta a esfera em dois pontos ou polos. A posição de qualquer ponto sobre a esfera de referência possui uma relação única com a linha que o gerou. Essa posição pode ser transferida ou projetada em qualquer plano. Nesse caso, o plano de projeção é um plano horizontal que passa pelo centro da esfera de referência. Esse plano divide a esfera em hemisférios superior e inferior. Este trabalho utiliza apenas o hemisfério inferior, visto que o hemisfério superior está associado apenas às linhas de *plunge* negativo. O ponto, ou polo, no hemisfério inferior pode ser projetado no plano horizontal de projeção por vários métodos diferentes, dois dos quais estão ilustrados na figura 3.4. O método de projeção por igual ângulo foi utilizado neste projeto de pesquisa.

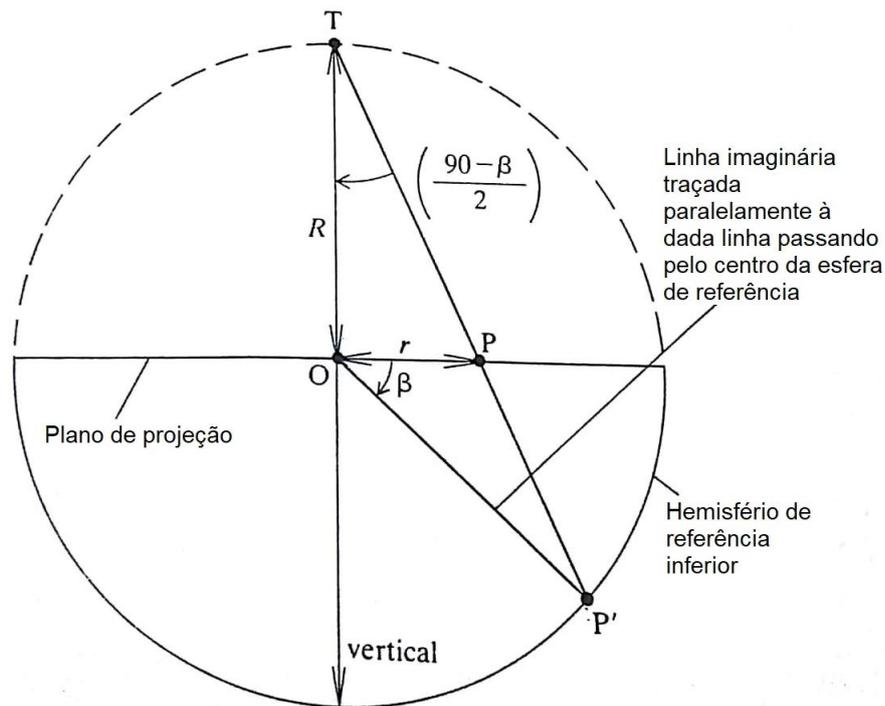


Figura 3.4 - Seção vertical da esfera de referência mostrando a projeção de igual ângulo. **Fonte:** adaptado de PRIEST (1985).

A figura 3.4 mostra que a linha de *trend/plunge* (α/β) intercepta o hemisfério inferior da esfera de referência no ponto P' . A projeção é feita desenhando-se uma linha reta entre os pontos P' e T , ambos a uma distância R do centro do hemisfério de referência. A projeção de P' , P , ocorre quando essa linha reta passa pelo plano de projeção. Para essa projeção, a relação entre r (distância radial entre O e P) e β é dada por:

$$r = R \times \operatorname{tg} \left(\frac{90 - \beta}{2} \right)$$

A figura 3.5 mostra a rede usada na projeção polar de igual ângulo. Os números na borda do círculo representam os valores de *trend* ($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$), enquanto os círculos internos representam os valores de *plunge* ($0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$, com β igual a zero na borda do círculo externo e 90° no centro), compondo o par de coordenadas α/β .

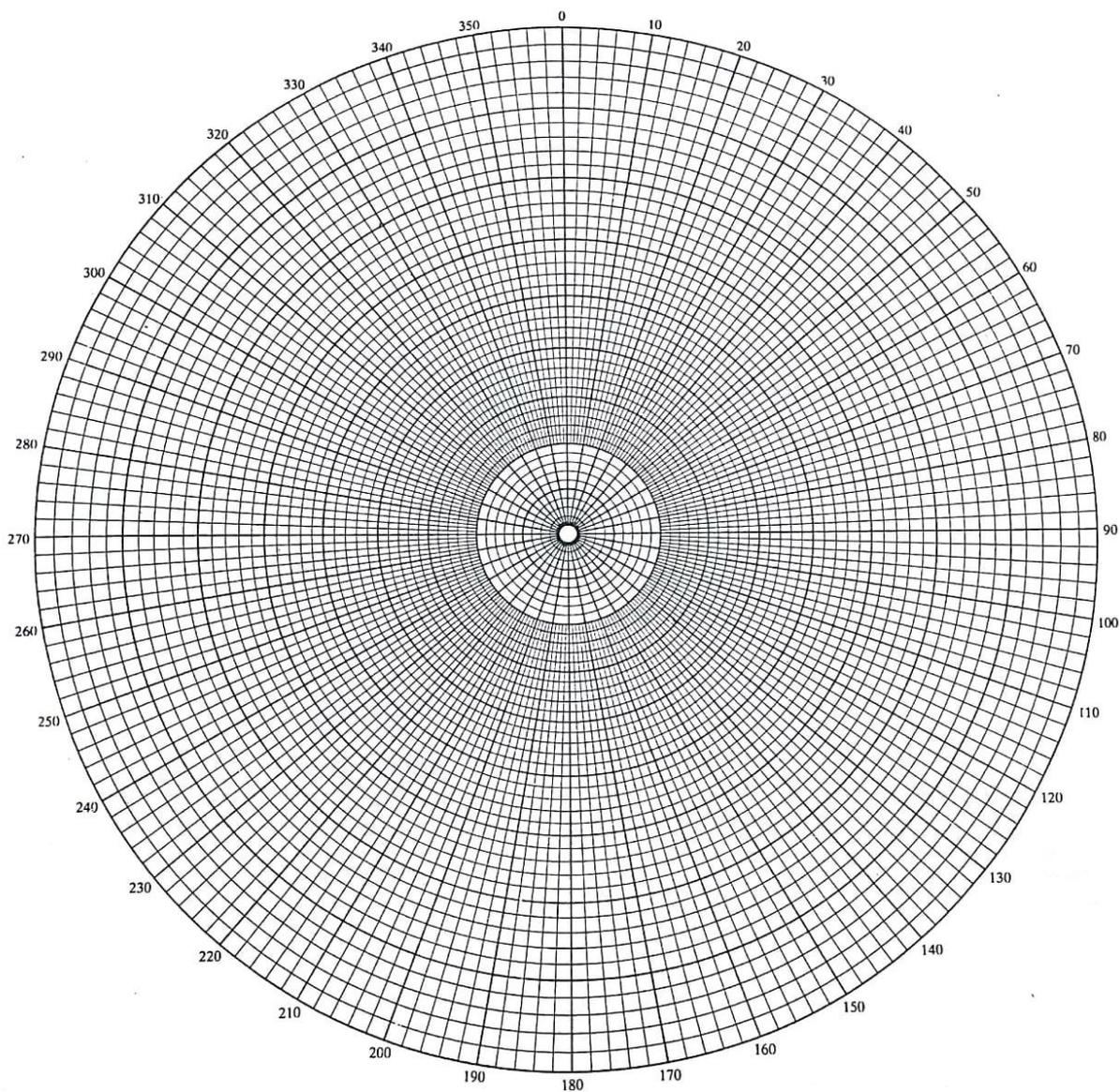


Figura 3.5: Rede de projeção polar de igual ângulo. **Fonte:** adaptado de PRIEST (1985).

3.2.2. Projeção Equatorial

Em uma projeção equatorial também é possível plotar e analisar linhas e planos de diversas orientações. Os princípios da projeção hemisférica usados na construção de projeções equatoriais são os mesmos das projeções polares. E, assim como na projeção polar, também existem as redes para projeções de igual ângulo e área.

A figura 3.6 mostra uma semiesfera de raio R sendo interceptada por um plano de *dip direction/dip* (α_d/β_d) passando pelo centro O . Esse plano pode ser visualizado como infinitas linhas $OP'(\gamma)$, de *pitch* (γ) negativo, irradiando do centro O . Duas linhas especiais, $OP'(0^\circ)$ e $OP'(90^\circ)$, são o *strike* e a linha de máximo declive do plano, respectivamente. O grande círculo é, portanto, a nuvem de pontos $P'(\gamma)$. Esses pontos podem ser projetados no plano horizontal utilizando construções de igual ângulo e igual área. Essa nuvem de pontos é chamada de **traço ciclográfico** ou, de forma mais simples, de **grande círculo** do plano inclinado.

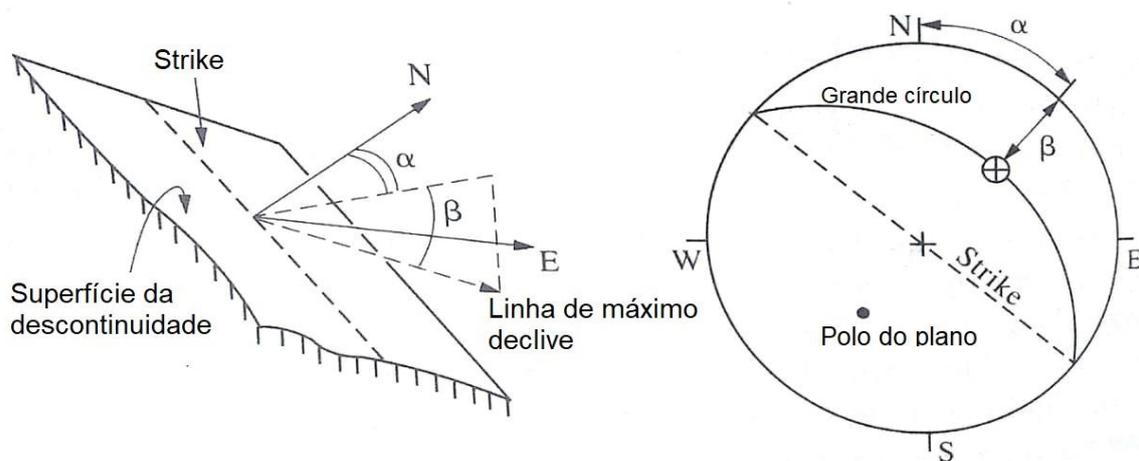


Figura 3.6: Traço ciclográfico ou grande círculo de um plano inclinado. **Fonte:** adaptado de PRIEST (1985).

A figura 3.7 mostra uma rede de igual ângulo para a projeção equatorial. As distâncias entre os traços ciclográficos representam intervalos de 2° no *dip*, que aumenta da borda para o centro. Os valores da *dip direction* encontram-se no entorno da rede.

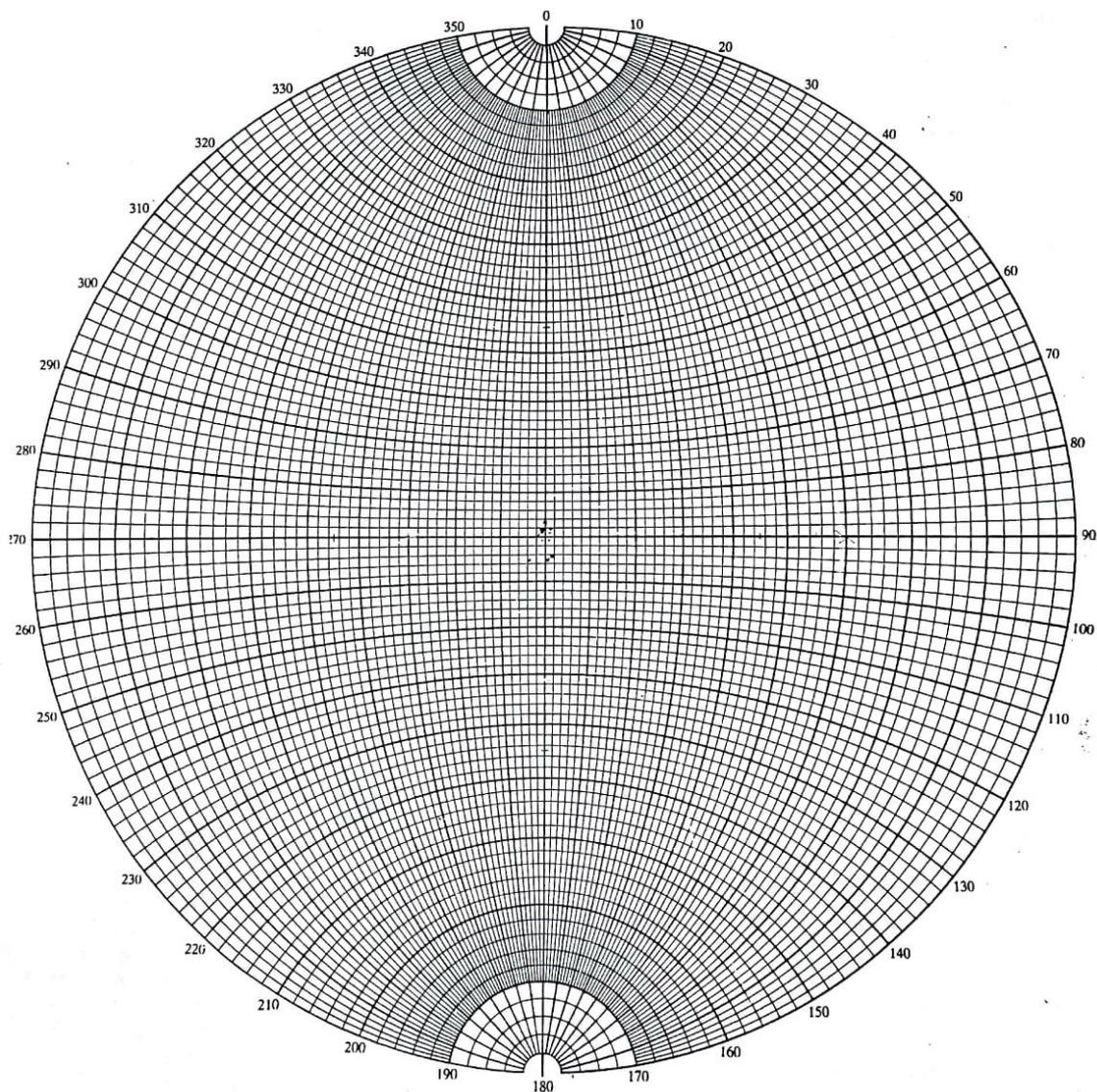


Figura 3.7: Rede da projeção equatorial de igual ângulo. **Fonte:** adaptado de PRIEST (1985).

3.3. Atitude Média de Uma Família de Descontinuidades

Uma reta pode ser representada pela projeção do ponto onde ela intercepta a esfera de referência e que essa projeção é chamada de polo da reta. Quando há uma aglomeração de polos numa determinada região da projeção, existe um forte indício de que essas retas representem uma única família de descontinuidades. A figura 3.8 ilustra essa propriedade, em que os círculos e quadrados representam, respectivamente, as atitudes das falhas e acamamento medidas na face aflorante de um maciço rochoso.

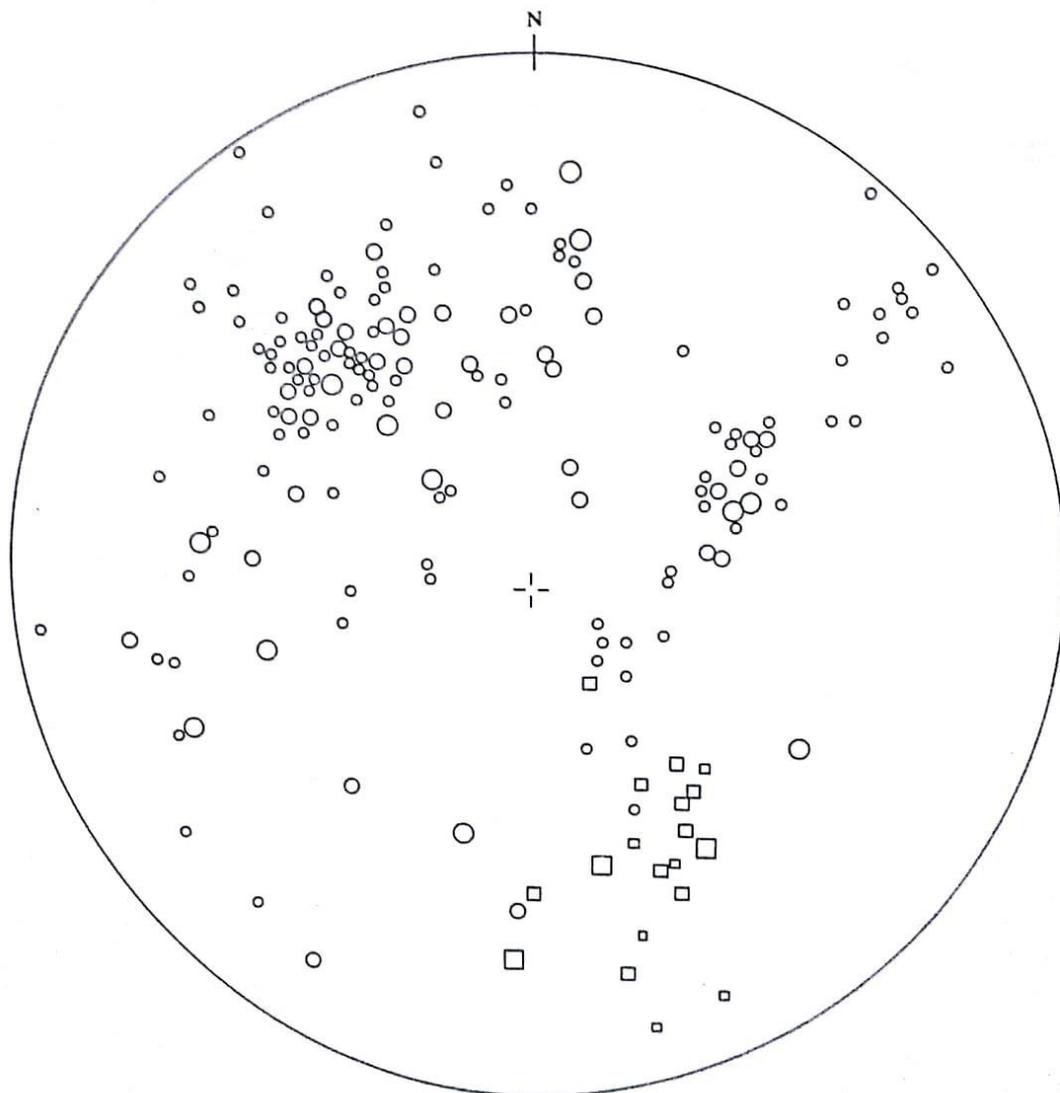


Figura 3.8 - Exemplo de aglomeração de polos. **Fonte:** adaptado de PRIEST (1985).

É fácil notar uma grande aglomeração de pontos na região superior esquerda do diagrama e outras aglomerações menores na parte direita, indicando a presença de, no mínimo, duas famílias de descontinuidades. É possível, também, calcular a atitude média dessas famílias. É um cálculo relativamente complexo, utilizando o *plunge* e *trend* das descontinuidades em um sistema de coordenadas esféricas conforme demonstra GROSSMANN, 1983.

3.4. Breve Estudo das Descontinuidades

As descontinuidades nos maciços rochosos aflorantes ou túneis se apresentam apenas como traços. Medir o tamanho real dessas estruturas ainda é um desafio nos dias de hoje (ZHANG & EINSTEIN, 1998). A figura 3.9 mostra outras características das descontinuidades, com algumas definições em seguida:

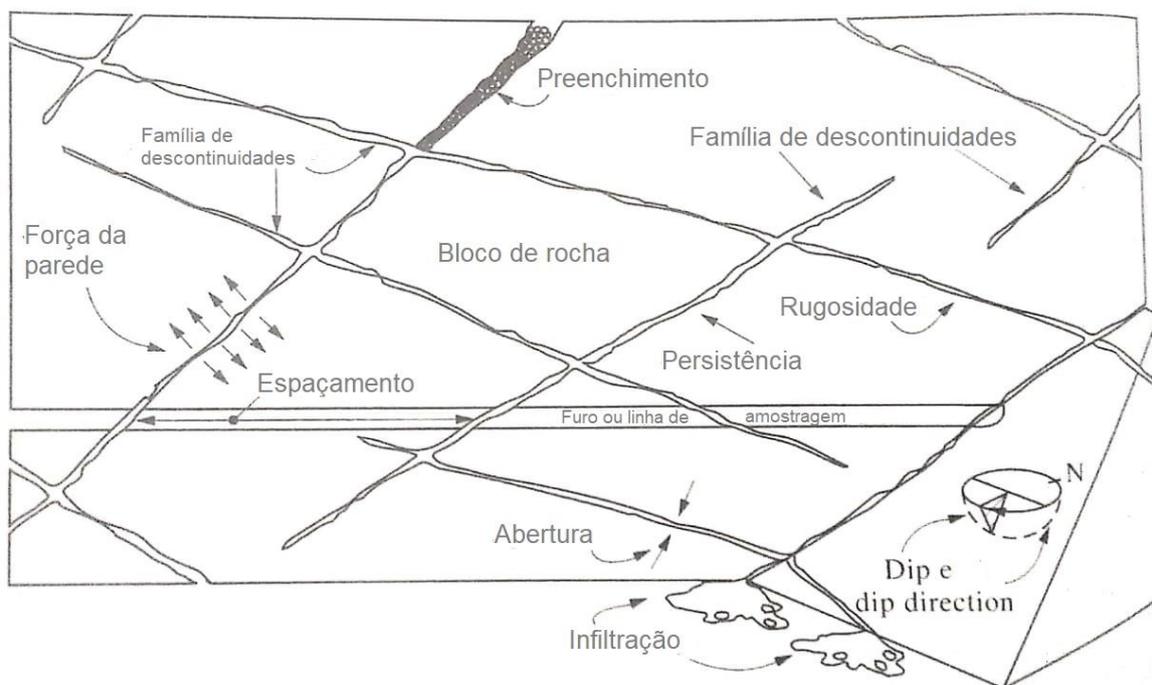


Figura 3.9 - Desenho esquemático das principais propriedades geométricas das descontinuidades.
Fonte: adaptado de HUDSON & HARRISON (2005).

1. Espaçamento e frequência: espaçamento é a distância entre duas descontinuidades adjacentes, medida na linha de amostragem. Frequência é o número de vezes que as descontinuidades ocorrem numa unidade de distância e está inversamente relacionada ao espaçamento;

2. Persistência: é a extensão da descontinuidade em seu próprio plano. Pode-se dizer, também, que a persistência é o traço da descontinuidade na superfície aflorante. Nos trabalhos de ZHANG & EINSTEIN (1998) e KULATILAKE & WU (1984) são demonstrados métodos matemáticos para a determinação da persistência média das descontinuidades, porém não serão abordados nesse trabalho;

3. Rugosidade: é a ondulação da superfície das paredes das descontinuidades. Embora as descontinuidades sejam consideradas planas na análise da orientação e persistência, suas superfícies tendem a ser rugosas;

4. Abertura: é a distância perpendicular entre as paredes da descontinuidade.

3.5. Lavra de Rochas Ornamentais

A lavra de rochas ornamentais data de muitos anos antes de Cristo. Egípcios já utilizavam largamente todos os tipos de rocha, principalmente calcários e arenitos, em suas construções e esculturas. Já para ornamentos, granitos, mármore, pedras-sabão, basaltos, entre outras eram as mais utilizadas (VIDAL *et al.*, 2014).

No Brasil, apesar de existir de forma pontual em várias regiões, a tecnologia de lavra de rochas ornamentais começou a se desenvolver em meados dos anos 1960 e, somente depois do final da década de 1980, começou a ter destaque como atividade mineradora (VIDAL *et al.*, 2014). O aspecto estético é o principal fator que influencia no valor comercial do produto, muitas vezes colocando outras propriedades importantes em segundo plano.

A lavra de rochas ornamentais pode ser dividida em duas grandes categorias: a lavra de matacões e de maciços, sendo esta a mais comum atualmente. A figura 3.10 mostra subdivisões da lavra de maciços.

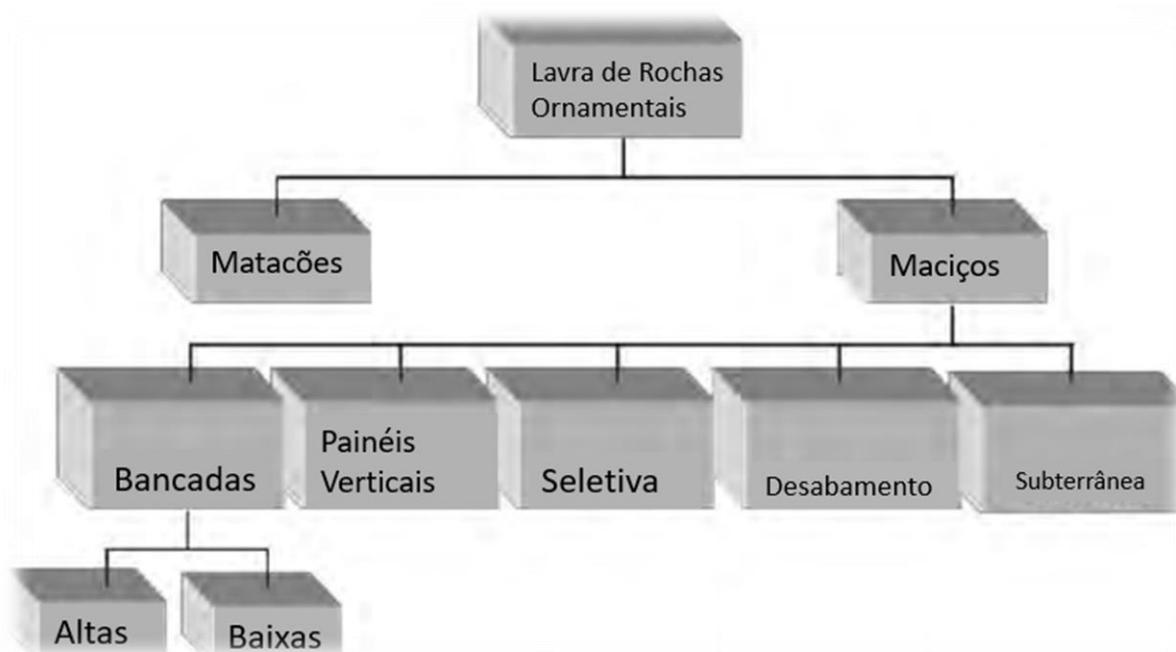


Figura 3.10 – Métodos de lavra de blocos de rochas ornamentais. **Fonte:** VIDAL *et al.* (2014).

O método mais utilizado no Brasil é o de bancadas altas (figura 3.11), juntamente com painéis verticais, embora os demais também são utilizados. A principal tecnologia de extração dos blocos é o corte por fio diamantado, porém explosivos também podem ser empregados em alguns granitos, principalmente para cortes e desmonte de estéril (VIDAL *et al.*, 2014).



Figura 3.11: Lavra de quartzito por bancadas altas em Gouveia, MG, com destaque para as principais descontinuidades presentes no maciço. **Fonte:** acervo do autor, 2019.

A figura 3.12 esquematiza o fio diamantado sendo utilizado para separar uma grande porção de rocha, conhecido no setor por *quadrote*. Em seguida, furos verticais e horizontais dividem o quadrote em porções cada vez menores até chegar numa porção de rocha chamada

prancha. A prancha normalmente possui a altura da bancada e a largura ligeiramente maior que a largura de um bloco comercial. Toda essa sequência de operações na lavra é chamada de *desdobramento* (VIDAL *et al.*, 2014).

Com a prancha separada (figura 3.13), prepara-se uma superfície de terra ou material desagregado na base da bancada, chamada de *cama* pelo setor, que servirá para amortecer o impacto da prancha na operação de tombamento. Como o nome sugere, o tombamento da prancha consiste em separar a prancha do resto do maciço aplicando uma força em sua parte superior, trazendo-a ao chão e permitindo que os operadores trabalhem sobre ela, separando os blocos, numa operação chamada de *esquadrejamento*. Blocos de rocha com volume entre 9 e 12 m³ (figura 3.14) são o produto final da lavra, podendo ser comercializados diretamente ou então levados para uma usina de beneficiamento, onde serão cortados e transformados em chapas.

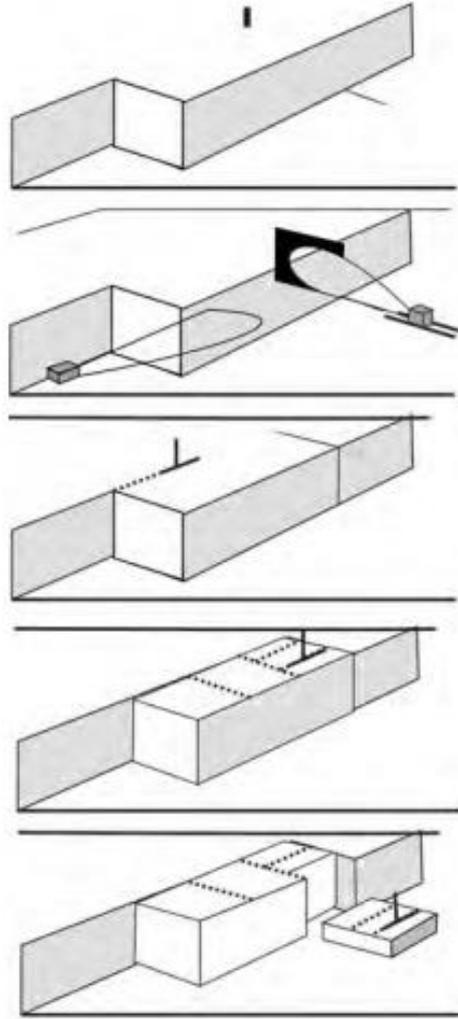


Figura 3.12: Ilustração esquemática do ciclo do desmonte com fio diamantado e perfuração. **Fonte:** VIDAL *et al.* (2014).



Figura 3.13: Prancha separada aguardando tombamento em pedreira de Governador Valadares, MG. **Fonte:** acervo do autor, 2019.



Figura 3.14: Bloco de rocha pronto para o beneficiamento em Governador Valadares, MG. **Fonte:** acervo do autor, 2019.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, o método proposto por Grossmann (1983) foi utilizado para a determinação da orientação média de uma família de descontinuidades. As expressões utilizadas no cálculo das coordenadas dos polos das atitudes médias são mostradas nas equações 4.1 a 4.3, em que $\bar{\alpha}$ e $\bar{\beta}$ representam, respectivamente, a direção de mergulho e mergulho médios da família e α_i e β_i as direções de mergulho e mergulhos de cada plano pertencente à da família.

$$\bar{\alpha} = \arctg \left[\frac{\sum_{i=1}^{i=N} \frac{\text{sen}(\alpha_i)\text{sen}(\beta_i)}{\text{cos}(\varepsilon_i)}}{\sum_{i=1}^{i=N} \frac{\text{sen}(\alpha_i)\text{cos}(\beta_i)}{\text{cos}(\varepsilon_i)}} \right] \quad (4.1)$$

$$\bar{\beta} = \arctg \left[\frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{i=N} \frac{\text{sen}(\alpha_i)\text{sen}(\beta_i)}{\text{cos}(\varepsilon_i)} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{i=N} \frac{\text{sen}(\alpha_i)\text{cos}(\beta_i)}{\text{cos}(\varepsilon_i)} \right)^2}}{\sum_{i=1}^{i=N} \frac{\text{cos}(\beta_i)}{\text{cos}(\varepsilon_i)}} \right] \quad (4.2)$$

$$\text{cos}(\varepsilon_i) = \text{cos}(\bar{\varphi}) \text{cos}(\varphi_i) + \text{sen}(\bar{\varphi})\text{sen}(\varphi_i) \text{cos}(\bar{\theta} - \theta_i) \quad (4.3)$$

A solução do sistema é obtida por uma técnica iterativa. O processo inicia-se considerando o elemento $\text{cos}(\varepsilon_i)$, que representa o cosseno do mergulho no sistema de coordenadas esféricas cujo eixo de revolução passa pela atitude média dos polos dos planos das descontinuidades (GROSSMANN, 1983), como sendo igual a 1. As médias são calculadas pelas relações 4.1 e 4.2 e os valores são utilizados para obter um novo valor para $\text{cos}(\varepsilon_i)$ a partir da equação 4.3, e assim sucessivamente, até atingir a precisão desejada (LANA, 2000). Para esse trabalho, optou-se por uma precisão de duas casas decimais. Os dados são inseridos nas tabelas da figura 4.1 acessadas pela tela inicial do **SOF**. As atitudes foram escolhidas de forma a gerar uma nuvem de polos que se aproxima da realidade.

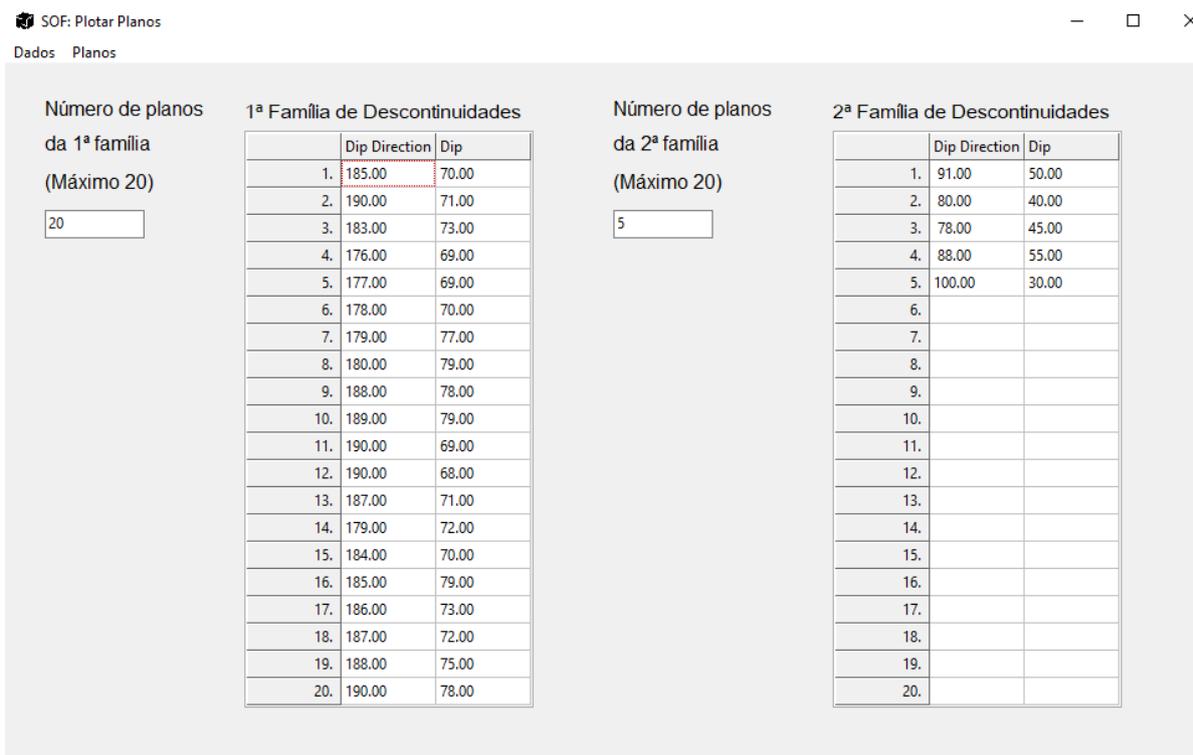


Figura 4.1: Entrada de Dados do SOF.

Vale ressaltar que o aplicativo mostra os polos dos planos e, por isso, o valor *dip direction* calculado é somado ou subtraído de 180° e o valor do mergulho para o polo do plano é o complemento do *dip*.

Com as médias calculadas, pode-se utilizar esses dados para determinar a melhor orientação das faces de um bloco comercial de dimensões 2 m de largura, 2 m de altura e 3 m de comprimento, sendo a primeira face a horizontal, a segunda a vertical de maior dimensão (2m x 3m) e a terceira a vertical de menor dimensão (2m x 2m), no momento da lavra. Neste trabalho foram feitas análises para três casos: o primeiro maciço com duas descontinuidades ortogonais (uma horizontal e uma vertical), o segundo com uma descontinuidade horizontal e outra com atitude qualquer e, por fim, um terceiro com duas descontinuidades de atitudes quaisquer. A figura 4.2 representa os dados utilizados para o 1º caso, sendo considerada somente a direção de mergulho da 1ª família de descontinuidades. Optou-se por arredondar o valor de $184,56^\circ$ para 185° , pois na prática um corte dificilmente será feito com tamanha precisão. O mesmo foi feito para os demais casos.

SOF: 1º Caso

Plotar

	Dip direction	Dip
1ª Face - Desc. Horizontal:	Não há	0
2ª Face - Desc. Vertical:		
< <input type="range"/> >	<input type="text" value="185"/>	90
3ª Face:	<input type="text" value="275"/>	90

Figura 4.2: Dados utilizados no 1º caso.

De forma semelhante, para o 2º caso foi utilizada a atitude da 1ª família de descontinuidades (Figura 4.3).

SOF: 2º Caso

Plotar

1ª Desc. (horizontal) = 1ª Face

Dip Direction Não há

Dip 0°

2ª Descontinuidade (qualquer)

Dip Direction

< >

Dip

< >

2ª Face:

Dip Direction

Dip 90°

3ª Face:

Dip Direction

Dip 90°

Figura 4.3: Dados utilizados no 2º caso.

Para o 3º caso, foi necessário utilizar os dados da 2ª família de descontinuidades, além da atitude da 1ª família, a qual foi chamada de “descontinuidade predominante” (Figura 4.4). O *software* permite escolher qual das famílias é a predominante, ou seja, qual possui um espaçamento menor entre as descontinuidades membros. Quando não há predominância, o *software* seleciona a 1ª família para orientar o corte de blocos. As caixas de checagem (*checkboxes*), se marcadas, identificam na projeção a família de descontinuidades (ID = Identificar Descontinuidade) e também as faces do bloco (IF = Identificar Face).

 SOF: 3º Caso

Descontinuidade Predominante 1ª Descontinuidade ▾

1ª Descontinuidade ID 1

Dip Direction < > 185

Dip < > 73

2ª Descontinuidade ID 2

Dip Direction < > 90

Dip < > 46

1ª Face - Horizontal IF 1

Dip Direction Não há

Dip 0°

2ª Face IF 2

Dip Direction 185

Dip 90°

3ª Face IF 3

Dip Direction 275

Dip 90°

Figura 4.4: Dados utilizados no 3º caso.

Optou-se por orientar a face de maior dimensão paralelamente à direção de mergulho da família de descontinuidades predominante pois com isso a chance de o bloco ser interceptado por alguma descontinuidade é menor. A figura 4.5 esquematiza um bloco (verde)

num maciço com duas famílias de descontinuidades, uma predominante, em azul, e uma não predominante, em vermelho.

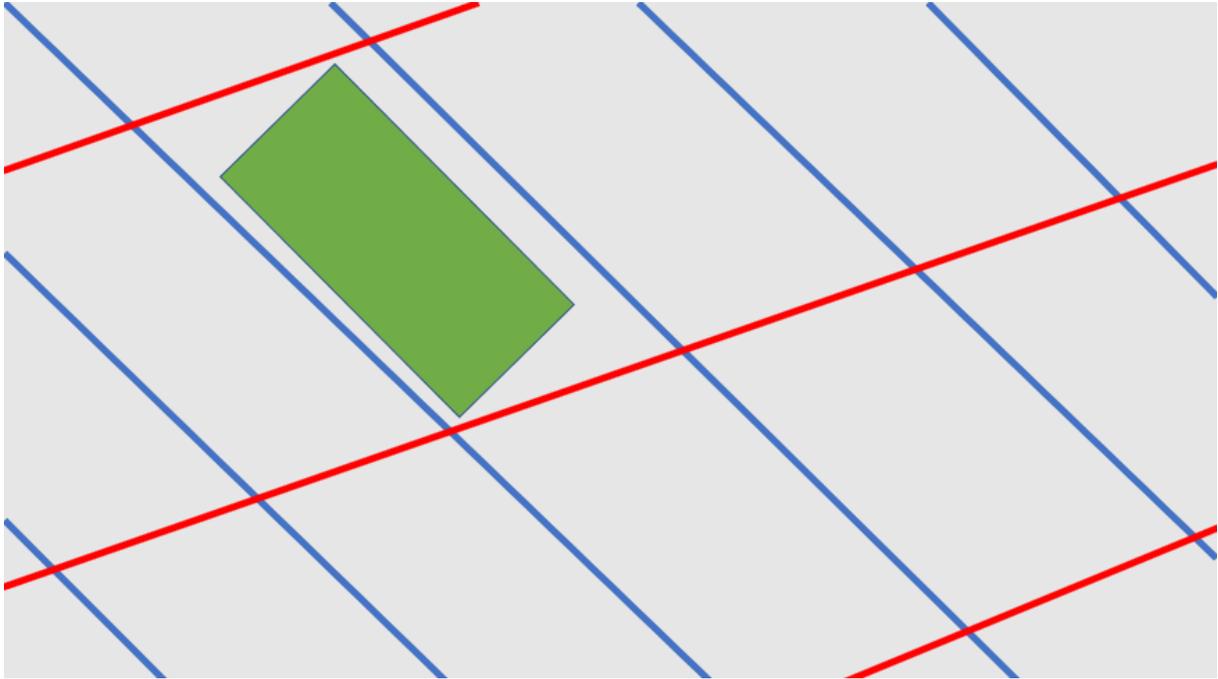


Figura 4.5: Vista em planta de uma representação de um maciço com duas famílias de descontinuidades.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras 5.1 e 5.2 mostram, respectivamente, as atitudes médias calculadas para as famílias 1 e 2 e projeção com as nuvens de polos dessas famílias de descontinuidades (figura 4.1). Em vermelho são representados os polos dos planos da 1ª família de descontinuidades e, em azul, os da 2ª família. É possível observar a marca “x” junto aos polos. Ela representa o polo do plano de atitude média: 184,56/73,05 e 090,12/46,28, para a 1ª e 2ª famílias, respectivamente.

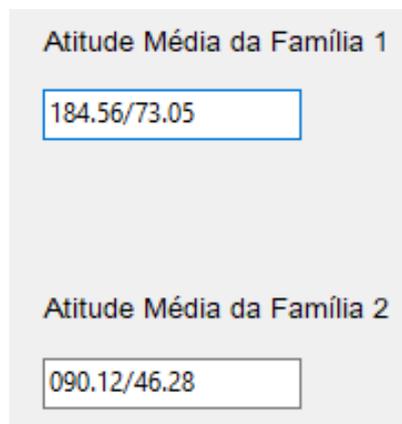


Figura 5.1: Atitudes médias das famílias 1 e 2 (*dip direction/dip*).

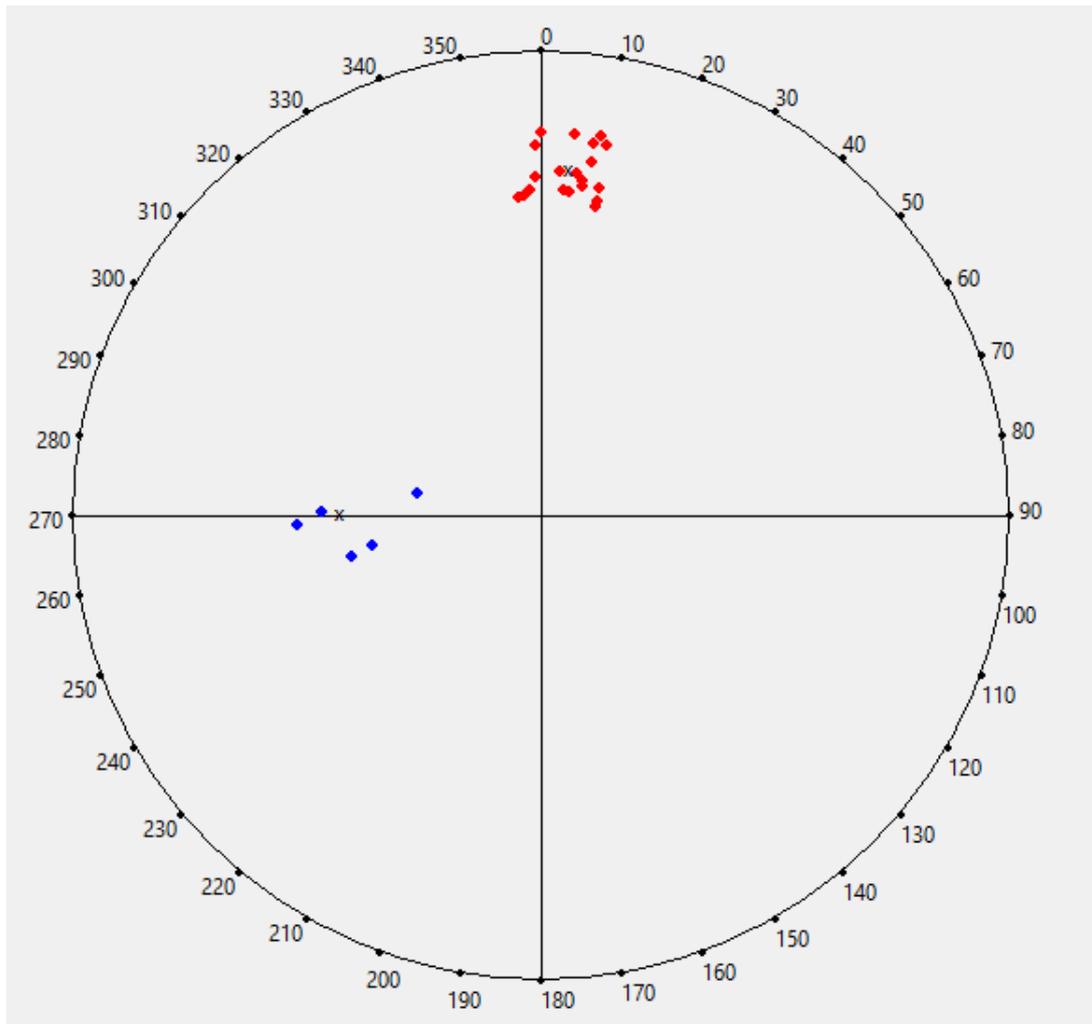


Figura 5.2: Nuvem de polos com as atitudes médias (marcas “x”).

O 1º caso analisado está ilustrado na figura 5.2. Em azul estão os polos dos planos das faces do bloco e, em vermelho, os das discontinuidades. Como se pode observar, a face de maior dimensão está orientada para coincidir com a direção de mergulho da família de discontinuidades subverticais.

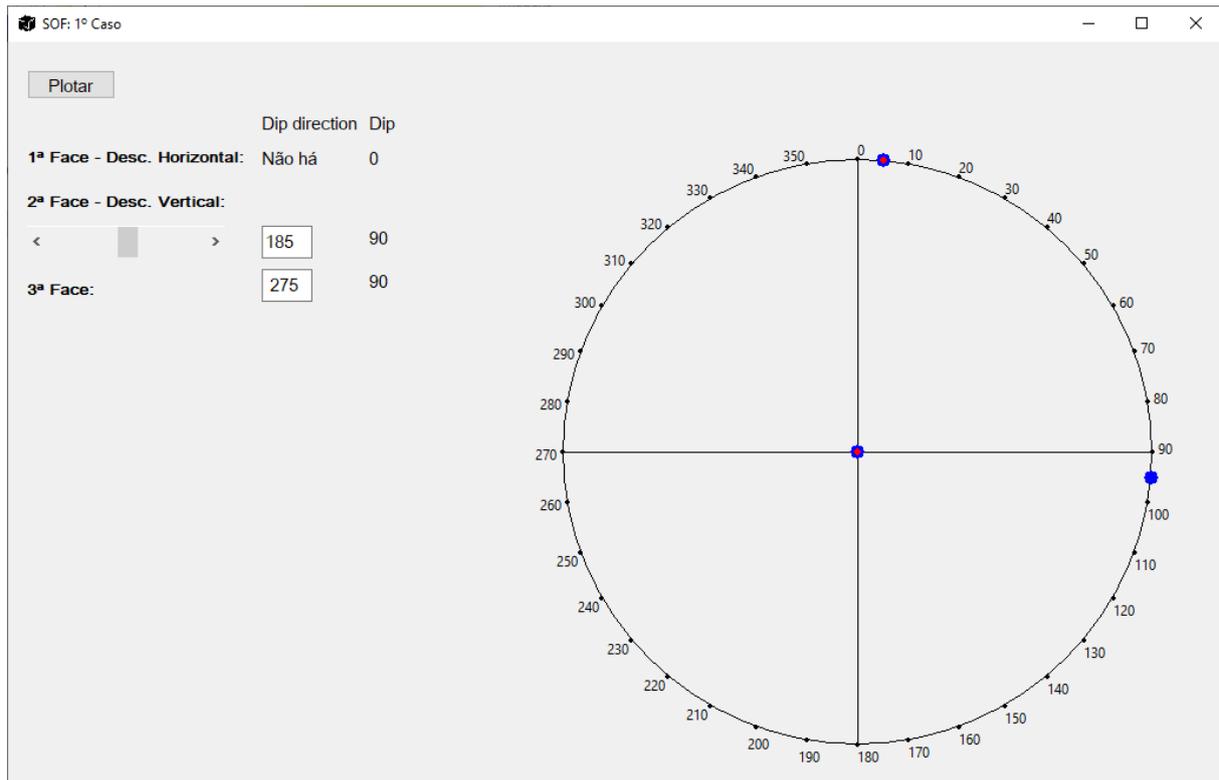


Figura 5.3: Orientação das faces do bloco (em azul) e polos das discontinuidades (em vermelho) para o 1º Caso.

A figura 5.3 ilustra o 2º Caso. É possível notar que o mergulho da 2ª família de discontinuidades não influencia na inclinação da 2ª da face do bloco, pois ela é vertical. Com a tecnologia atual, retirar blocos inclinados não é operacionalmente viável.

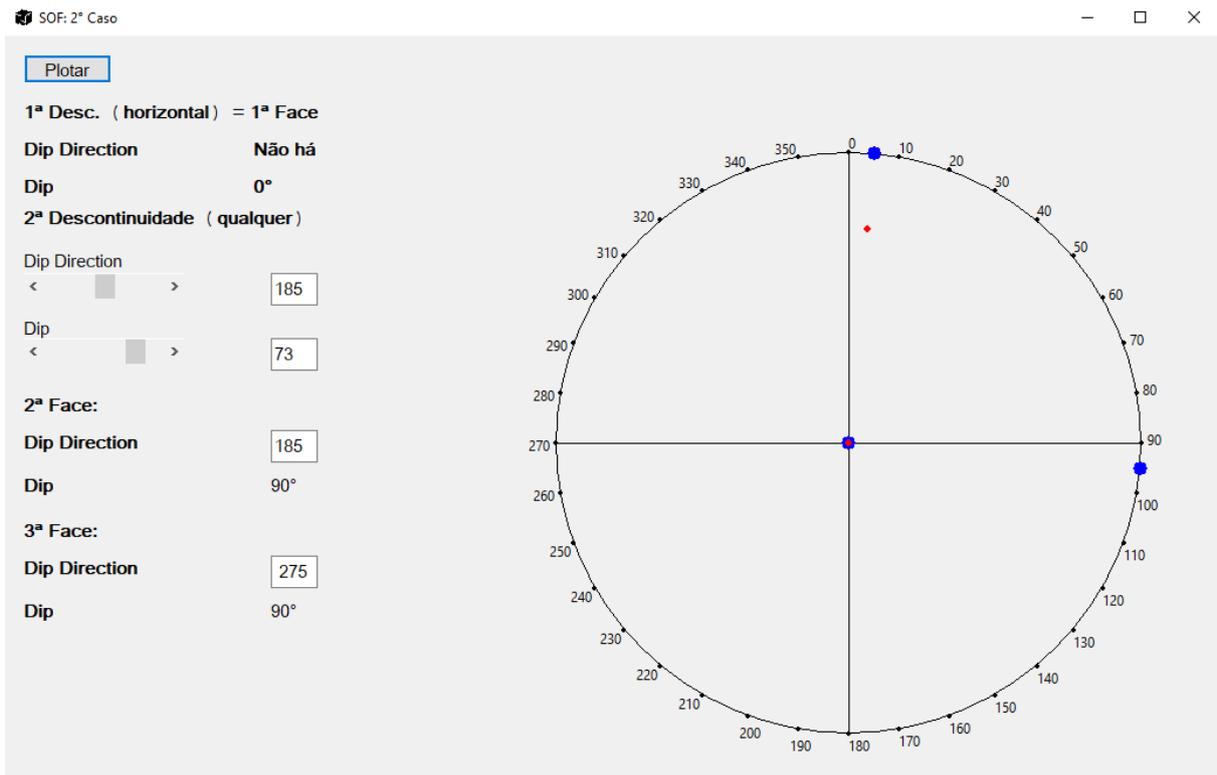


Figura 5.4: Orientação das faces do bloco (em azul) e polos das descontinuidades (em vermelho) para o 2º Caso.

No 3º Caso (figura 5.4), a família de descontinuidades não predominante não é considerada para definir a orientação das faces do bloco. Sendo assim, a primeira família foi considerada a predominante, com as orientações das 2ª e 3ª faces do bloco definidas em função da atitude desta família de descontinuidades.

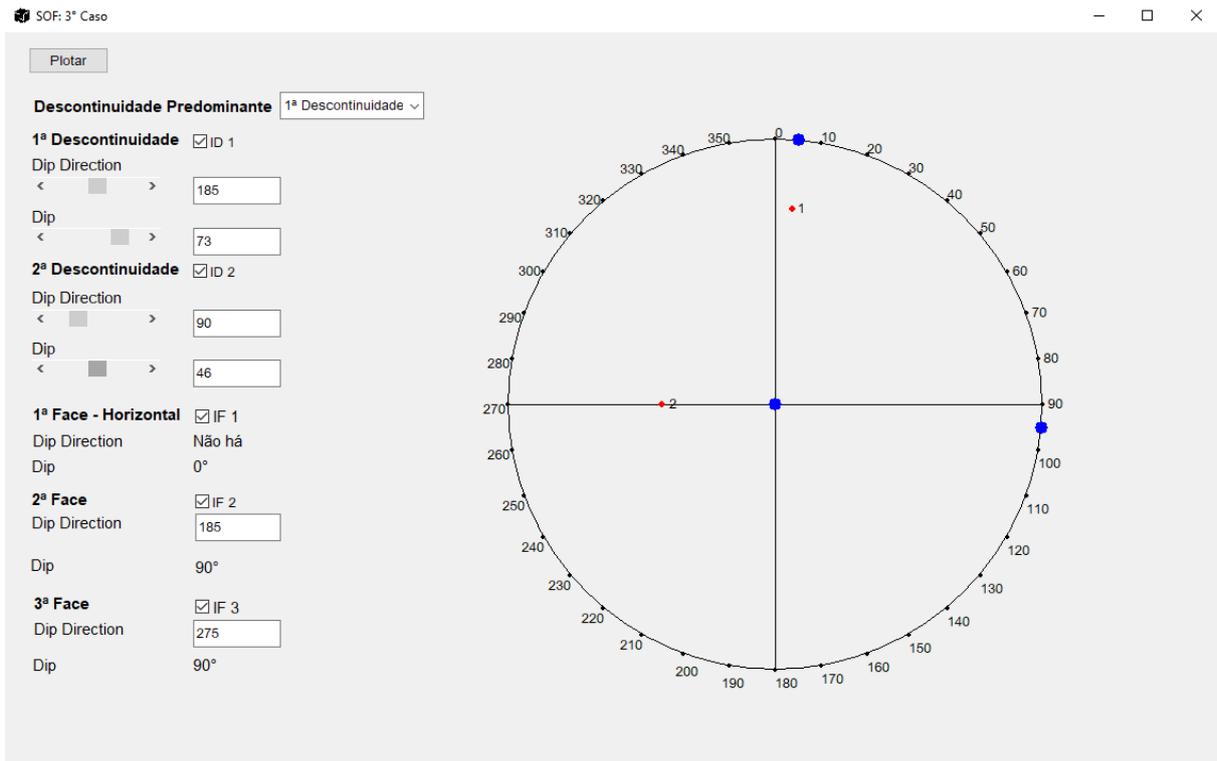


Figura 5.5: Orientação das faces do bloco (em azul) e polos das descontinuidades (em vermelho) para o 3º Caso.

6. CONCLUSÕES

O *software* mostrou-se adequado para calcular e representar graficamente as atitudes médias de famílias de descontinuidades, bem como as nuvens de polos dessas famílias em uma mesma projeção.

O *software* também permitiu representar graficamente os polos dos planos das faces de um bloco de rocha ornamental, juntamente com os polos dos planos das descontinuidades.

Com a (re)orientação das faces dos blocos com base na direção e mergulho médios das famílias de descontinuidades existentes no maciço, espera-se que as perdas devido a presença dessas estruturas sejam reduzidas.

O aplicativo desenvolvido nesse projeto demonstrou sua capacidade de auxiliar no planejamento da lavra de rochas ornamentais através da (re)orientação das faces dos blocos nos três casos analisados (uma descontinuidade horizontal e outra vertical; uma horizontal e outra com orientação qualquer; e duas descontinuidades com orientações quaisquer).

O aplicativo computacional poderá ser utilizado como uma ferramenta didático-pedagógica no estudo da lavra de blocos de rochas ornamentais pelos alunos e futuros engenheiros que venham a trabalhar nesse setor da mineração.

O software foi brevemente apresentado a turmas de Engenharia de Minas das disciplinas Lavra e Beneficiamento de Rochas Ornamentais e Estabilidades de Taludes, em sala de aula e monitorias, e obteve uma recepção positiva, tanto como ferramenta didática quanto como auxiliar do planejamento de lavra.

Referências Bibliográficas

ABIROCHAS – Associação Brasileira Da Indústria De Rochas Ornamentais. **Designação Comercial das Rochas Ornamentais e Classificação Fiscal de Seus Produtos**. Informe 04/2018, Brasília, 25p, 2018.

DESTRO, E. **A influência da esfoliação granítica no planejamento da lavra de blocos de rochas ornamentais**. Dissertação (Mestrado), PPGEM: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2000.

FRASCÁ, M. H. B. O. **Tipos de Rochas Ornamentais e Características Tecnológicas**. In: VIDAL, F. W. H. *et al.* (Org). Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Rio de Janeiro, pp. 43-98, 2014.

FURTADO, J.; URIAS, E. **Recursos Naturais e Desenvolvimento - estudos sobre o potencial dinamizador da mineração na economia brasileira**. 1ª ed., Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM, São Paulo, 2013.

GROSSMANN, N. F. **Descontinuidade**. In: RODRIGUES, F. P. *et al.* Desenvolvimentos Recentes no Domínio da Mecânica das Rochas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, cap. VIII, pp. 162-197, 1983.

HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. **Engineering Rock Mechanics: an introduction to the principles**. Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, London, 2005.

JAGGER, J. C.; COOK, N. G. W.; ZIMMERMAN, R. W. **Fundamentals of Rock Mechanics**. Blackwell Publishing, Oxford, 2007.

KULATILAKE, P. H. S. W.; WU, T. H. **Estimation of Mean Trace Length of Discontinuities**. Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 17, nº 4, 1984.

LAJTAI, E. Z. **Microscopic Fracture Processes in Granite**. Rock Mechanics and Rock Engineering. Vol. 34, nº 4, 1998.

LANA, M. S. **Estudo dos Mecanismos de Ruptura em Taludes de Grande Altura num Maciço Rochoso de Geologia Estrutural Complexa**. Tese (Doutorado). Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

OLIVEIRA, H. M. E. **Caracterização de maciço rochoso para exploração e transformação como rocha ornamental. Caso de estudo: Arronches**. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2017.

PRIEST, S. D. **Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics**. Imperial College of Science and Technology, University of London, London, 1985.

SILVA, H. V., CASTRO, N. F. **Aproveitamento de resíduos de pedreiras de rochas ornamentais como agregados para base e sub-base de pavimentos**. In: JORNADA DO PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO INTERNA DO CETEM, 5. Rio de Janeiro. Anais. CETEM/MCTIC, 2016.

VIDAL, F. W. H. *et al.* **Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Rio de Janeiro, pp. 15-44, 2014.

ZHANG, L.; EINSTEIN, H. H. **Estimating the Mean Trace Length of Rock Discontinuities**. Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 34, n° 4, 1998.