

## Aplicação de métodos de agrupamento para definição de famílias de descontinuidades

*Milene Sabino Lana<sup>1</sup>, Leonardo de Freitas Leite<sup>2</sup> & Ivo Eyer Cabral<sup>3</sup>*

**Resumo** Este trabalho teve como objetivo a aplicação de métodos numéricos e clássicos de agrupamento para definição de famílias de descontinuidades, com vistas à sua utilização em estudos de estabilidade de taludes rochosos. Em geral se utilizam métodos clássicos, que implicam no emprego de diagramas de densidade de pólos para a definição desses conjuntos. Entretanto podem ocorrer dúvidas na interpretação das famílias de descontinuidades formadas, principalmente quando a frequência das diversas famílias de descontinuidades é muito distinta. Nesses casos a utilização de métodos numéricos para definição das famílias, associados aos métodos clássicos para interpretação, validação e representação das famílias é interessante, pois os dois se complementam. Os dados utilizados para demonstrar a aplicação do método proposto foram obtidos através de vários levantamentos geotécnicos realizados em um talude de mina, ao longo de encosta urbana e num talude de rodovia, onde foram medidas as atitudes das descontinuidades. Programas desenvolvidos em linguagem FORTRAN foram utilizados para agrupamento das famílias de descontinuidades. Os valores médios de atitude para cada família e seus parâmetros de dispersão também foram obtidos pelo ajuste dos dados a uma função de distribuição de probabilidades. Observações de campo demonstraram que o método apresenta bons resultados na definição das famílias de descontinuidades.

*Palavras-chave:* famílias de descontinuidades, métodos numéricos de agrupamento, diagramas de densidade.

**Abstract** *Application of clustering methods for family sets definition.* This work had the purpose of applying numerical and classical methods of clustering for the definition of discontinuity sets in order to use the results in rock slope stability studies. In general classical methods are employed, involving the use of pole density diagrams to define these sets. However there can be uncertainties in family sets interpretation, especially when discontinuity family frequency is very distinct. In these cases the use of numerical methods to define family sets, associated to classical methods in order to interpret, validate and represent the sets is interesting, as they complement each other. Data used in this work was obtained from geotechnical surveys along a mine, an urban slope and a road slope, where discontinuity orientations were measured. Softwares developed in FORTRAN language were used in the definition of discontinuity sets. Average values of orientation and dispersion parameters of discontinuity sets were calculated, as the distribution probability data function was obtained. Field observations demonstrated the reliability of the clustering method used.

*Keywords:* discontinuity sets, clustering methods, pole density diagrams.

**INTRODUÇÃO** Observa-se na prática que superfícies de descontinuidades ocorrentes em maciços rochosos podem exibir variações de atitudes, mas que em geral essas atitudes ocorrem formando conjuntos denominados de famílias de descontinuidades, que se caracterizam por possuírem valores de atitudes próximos.

Essas famílias de descontinuidades são geralmente definidas através de observações realizadas no campo em conjunto com os diagramas de densidade de pólos, elaborados com os dados obtidos em levantamentos geotécnicos. Em alguns casos, quando há dificuldade na identificação das famílias através desses diagramas é necessário recorrer à utilização de métodos numéricos, que são mais rigorosos. A utilização dos métodos numéricos de agrupamento não exclui o emprego dos diagramas de densidade de pólos. Ao con-

trário, pois o excessivo rigor dos métodos numéricos pode levar à definição de um número muito grande de famílias; devendo o diagrama de densidade de pólos ser utilizado como ferramenta auxiliar na interpretação e eventual correção dos resultados.

Os métodos numéricos se baseiam no estabelecimento de critérios estatísticos para determinação de agrupamentos de pontos sobre a superfície esférica. Alguns métodos utilizam o conceito da distância entre superfícies de descontinuidades. São estabelecidas nestes métodos distâncias angulares entre as diversas descontinuidades sendo que, aquelas cujo ângulo diedro apresenta valores menores que certo limite, são agrupadas dentro de uma mesma família de descontinuidades. Neste contexto o ângulo limite é normalmente estabelecido a partir da utilização de um critério estatístico

1 - UFOP, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto (MG), Brasil. E-mail: milene@demin.ufop.br

2 - UFOP, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Ouro Preto (MG), Brasil. E-mail: lleite@golder.com.br

3 - UFOP, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto (MG), Brasil. E-mail: cabral@demin.ufop.br

capaz de delimitar os agrupamentos de pólos.

Métodos numéricos são especialmente indicados quando se dispõe de pequena quantidade de dados, seja por falta de afloramentos disponíveis ou por dificuldades impostas para a realização do levantamento de campo. No caso particular do levantamento de atitudes de descontinuidades para aplicação em estudos geotécnicos é comum utilizar dados provenientes de pequenas regiões ao longo do maciço rochoso, porque as atitudes médias das descontinuidades devem ser válidas para locais restritos ao longo de taludes ou galerias, onde se verificam as rupturas. Se a variabilidade das atitudes é significativa, como acontece em regiões de grande complexidade geológico-estrutural, a definição das famílias é tarefa árdua, porém crucial nos estudos geotécnicos.

Além disso, a utilização de métodos numéricos normalmente permite o ajuste dos dados de atitudes a uma distribuição de probabilidades, facilitando o tratamento estatístico das atitudes para efeito de sua aplicação em problemas de engenharia. No caso dos métodos clássicos somente é possível a definição das famílias a partir da inspeção visual das concentrações de pólos formadas, quando as mesmas são representadas em projeções hemisféricas.

#### DEFINIÇÃO DAS FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES ATRAVÉS DE MÉTODO CLÁSSICO

Os diagramas de densidade de pólos são gerados com o auxílio de projeções hemisféricas. Denomina-se densidade de pólos à frequência absoluta ou relativa de pólos na superfície esférica, frequência essa computada em uma célula de contagem com área pré-estabelecida. O número de pólos em cada uma dessas células é a densidade da célula que, dividida pelo número total de pólos representados, fornece a frequência relativa de pólos. As curvas de isofrequência de pólos são então traçadas, através da utilização de método de interpolação adequado.

Para o cálculo da frequência de pólos convencionou-se utilizar células de contagem com unidade de área de 1% da área do hemisfério de referência. Essa área pré-estabelecida é arbitrária, podendo levar a uma definição errônea das famílias de descontinuidades.

Na figura 1 representa-se uma célula de contagem de pólos com superfície circular varrendo a superfície externa do hemisfério inferior. Flinn (1958) já chamava a atenção para o problema da área da célula de contagem, que afeta diretamente a interpretação dos diagramas de densidade. Este autor sugere a utilização de células de contagem com área percentual de  $100/n$ , onde  $n$  é o número de pólos representados no diagrama. Assim como Flinn, Grossmann (1978) propõe a utilização de células de contagem com área percentual de  $100/n$ , demonstrando que essa área corresponde à área do hemisfério de referência onde deveria haver um só pólo se as descontinuidades aí se distribuíssem de maneira errática. Portanto, a existência de mais de um pólo em uma célula indica uma negação do padrão aleatório, ou seja, a presença de orientação preferencial para as descontinuidades.

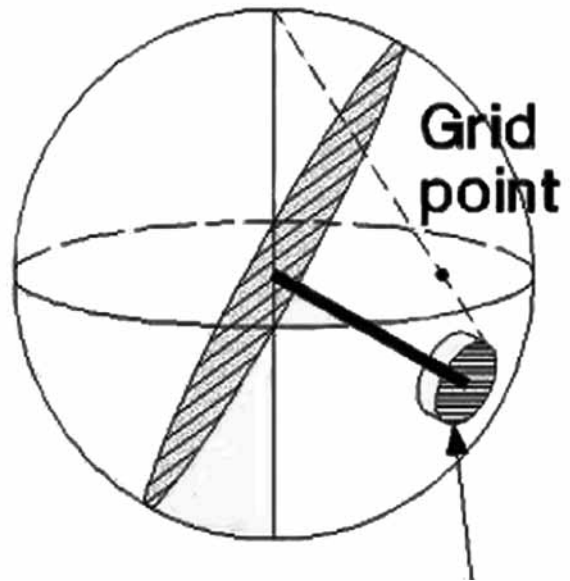


Figura 1 - Célula de contagem com superfície circular. Fonte: Rocscience 2008 (Dips, versão 5.1).

De acordo com as propostas de Flinn (1958) e Grossmann (1978), células de contagem de 1% da área do hemisfério de referência só são adequadas para cálculo da frequência de pólos quando se dispõe de uma amostra de 100 pólos, porque, neste caso, a área da célula é exatamente a área na superfície esférica onde ocorreria um só pólo, se a distribuição dos pólos na superfície esférica fosse aleatória. A área da célula de contagem é assim diretamente dependente do número de descontinuidades levantadas em campo, de modo que quanto maior o número de descontinuidades, maior a precisão requerida na definição das famílias de descontinuidades, pois a célula de contagem é menor.

Na figura 2 é possível visualizar o efeito da área da célula de contagem na definição de famílias de descontinuidades. Para uma amostra de 195 descontinuidades foram representados dois diagramas de densidade de pólos. Na figura 2(a) a área da célula de contagem é igual a 0,6% e na figura 2(b) é de 1%. Observa-se uma definição mais clara das famílias na figura 2(a), com melhor distinção entre as concentrações de pólos do que na figura 2(b).

#### DEFINIÇÃO DAS FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES ATRAVÉS DE MÉTODO NUMÉRICO

Foram utilizados os trabalhos desenvolvidos por Grossmann (1978 e 1988), que abordou a aplicação dos métodos numéricos para definição das famílias de descontinuidades.

O método proposto considera a distância  $d_{ij}^*$  entre os diversos pólos das superfícies de descontinuidades. A aplicação do método se dá em duas etapas: a formação de conjuntos de descontinuidades (famílias) e a associação dos mesmos.

Grossmann (1978) define como conjunto de

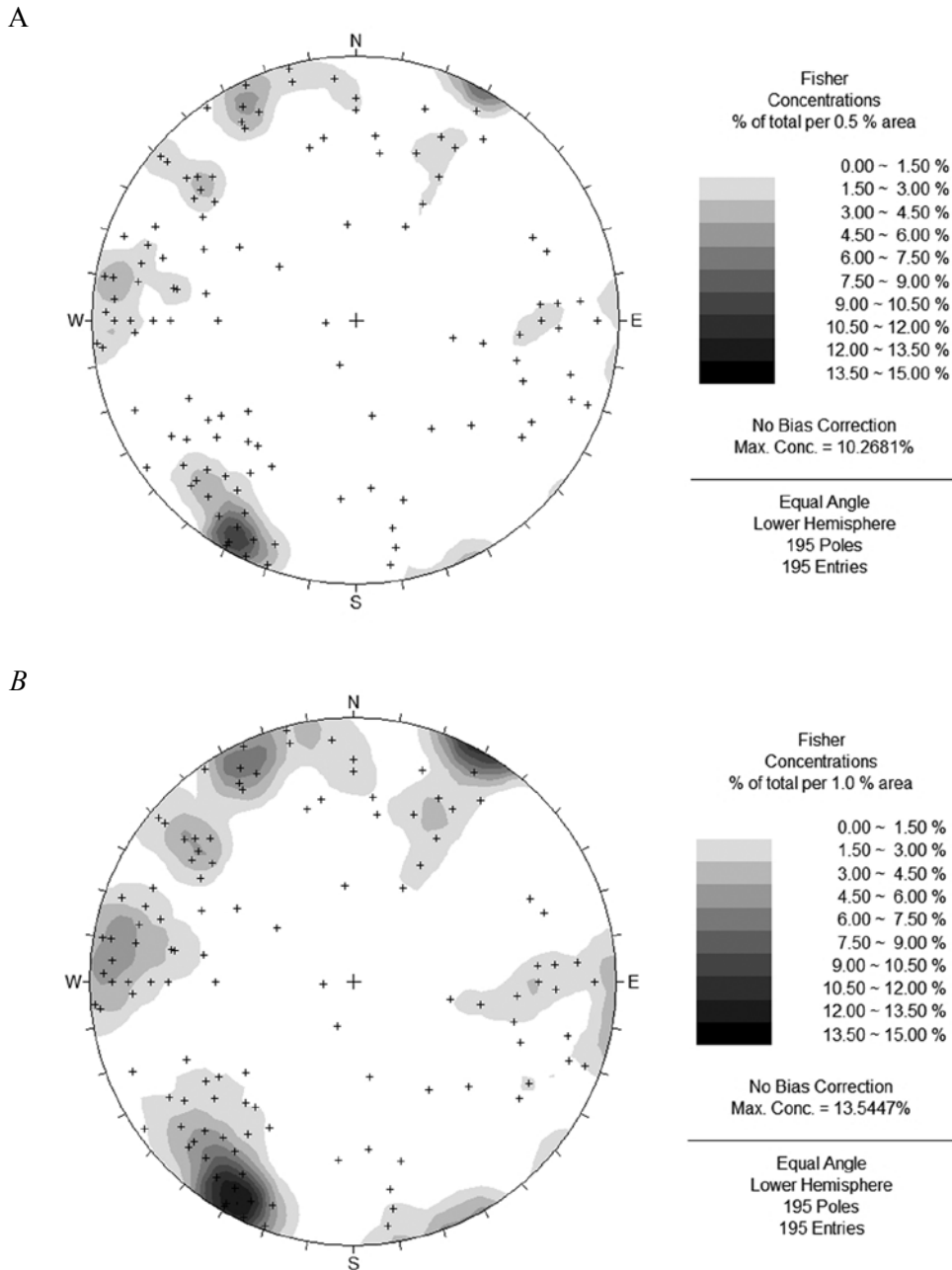


Figura 2 - Efeito da célula de contagem (Fonte Rocscience 2008).

descontinuidades todas as superfícies que formarem com qualquer outra superfície do conjunto um ângulo diedro inferior ou igual a um dado valor limite. O ângulo diedro entre duas superfícies  $i$  e  $j$  pode ser medido através da distância  $d^*_{ij}$  sobre a superfície esférica entre os pólos respectivos, equação (1).

$$d^*_{ij} = \arccos(|x_i x_j + y_i y_j + z_i z_j|) \leq \alpha_L \quad (1)$$

Onde:

$x_i, y_i$  e  $z_i$ ;  $x_j, y_j$  e  $z_j$  são as coordenadas cartesianas ou cosenos diretores dos pontos  $i$  e  $j$ ;  
 $\alpha_L$  é o ângulo diedro limite que define as famílias de descontinuidades.

Para a definição do ângulo limite Grossmann (1978) propõe três hipóteses, que são funções decrescentes do número  $n$  de descontinuidades.

A primeira hipótese adotada foi a utilização da abertura da calota esférica  $\alpha_p$  que corresponde à ocorrência de um só pólo sobre a superfície esférica, considerando que os pólos se distribuem de forma aleatória sobre esta superfície, equação (2).

$$\alpha_p = \arccos \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \quad (2)$$

A segunda hipótese ainda esteve ligada à idéia da utilização de áreas da superfície esférica em que há ocorrência de um só pólo. Adotou-se a distância  $\alpha_l$  me-

didada sobre a superfície esférica, entre os centros de dois triângulos esféricos equiláteros contíguos, equação (3).

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{1}{3}\left\{1 + 4\cos\left[\frac{\pi}{3}\left(1 + \frac{2}{n}\right)\right]\right\}\right) \quad (3)$$

Grossmann (1978) propõe ainda uma terceira hipótese para escolha do valor do ângulo  $\alpha_L$  com base na distribuição de Poisson. Assim  $\alpha_L$  deverá ter um valor tal que a probabilidade de encontrar zero ou um só pólo numa calota esférica de abertura  $\alpha_L$ , seja superior à probabilidade de encontrar dois ou mais pólos, equação (4).

$$\alpha_L = \arccos\left(1 - \frac{1,67834699}{n}\right) \quad (4)$$

A segunda etapa do método consiste na associação de conjuntos, tendo em vista que o método proposto não exclui a possibilidade da existência de um ou mais pólos no interior ou na fronteira do domínio de um conjunto (delimitado pela envolvente convexa exterior aos pólos desse conjunto), que não tenham sido englobados nesse conjunto. O domínio de ocorrência de um conjunto de descontinuidades é definido por Grossmann (1978) como sendo a área da superfície esférica delimitada por uma linha de igual densidade de probabilidade de pólos, que goza da propriedade de que a probabilidade de ocorrência, no seu exterior de pólos de descontinuidades do conjunto considerado seja igual a  $1/n_c$ , onde  $n_c$  é o número de pólos do conjunto considerado. Admite-se que dois conjuntos quaisquer pertencem a uma mesma família de descontinuidades, sempre que o ponto médio de um deles cair dentro do domínio do outro (Grossmann, 1978, 1988), equação (5). O cálculo da orientação média, desvios-padrão e orientação da dispersão máxima na equação (5) se baseiam no modelo de distribuição de atitudes de descontinuidades proposto por Grossmann (1978, 1988).

$$\left[\cos\bar{\varphi}_i \cos\bar{\varphi}_j + \text{sen}\bar{\varphi}_i \text{sen}\bar{\varphi}_j \cos(\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_j)\right]^2 \geq \frac{1}{1 + \frac{2\sigma_M^2 \ln(n_c)}{\left(\frac{\sigma_M^2}{\sigma_m^2} - 1\right) \text{sen}^2(\omega - \omega_M)}} \quad (5)$$

Onde:

$\bar{\theta}_i$  e  $\bar{\varphi}_i$  são, respectivamente, a direção e mergulho da atitude média do primeiro conjunto de descontinuidades.

$\bar{\theta}_j$  e  $\bar{\varphi}_j$  são, respectivamente, a direção e mergulho da atitude média do segundo conjunto de descontinuidades.

$\sigma_M$  e  $\sigma_m$  são, respectivamente, os desvios padrão máximo e mínimo do segundo conjunto.

$\omega_M$  é o ângulo que define a orientação segundo a qual ocorre a dispersão máxima (Grossmann, 1978).

O processo de associação termina quando mais nenhum par de conjuntos satisfaz a desigualdade acima. Os novos conjuntos obtidos no processo de associação são, em primeira análise, as famílias de descontinuidades.

### MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ATITUDES DE DESCONTINUIDADES

Os primeiros modelos de distribuições para as atitudes das descontinuidades consideravam essas distribuições isotrópicas em relação à atitude média, ou seja, variáveis apenas com o ângulo entre uma dada atitude e a atitude média da distribuição. Assim, as linhas de igual densidade de probabilidade em projeção são círculos concêntricos, centrados na média da distribuição. Nesses casos a função densidade de probabilidade é do tipo:

$$f(\omega, \varepsilon) = Ae^{Bg(\varepsilon)} \quad (6)$$

Onde:

$\omega$  e  $\varepsilon$  são, respectivamente, a longitude e latitude da atitude num sistema de coordenadas esféricas, cujo eixo de revolução passa pela atitude média da distribuição

$g(\varepsilon)$  é uma função do ângulo  $\varepsilon$

$A$  e  $B$  são constantes

Exemplos de distribuições isotrópicas podem ser encontrados em Mahtab et al (1972), Grossmann (1978) e Cheeney (1983).

Embora as distribuições isotrópicas ainda sejam muito utilizadas, a grande maioria das famílias de descontinuidades são anisótropas, não justificando a utilização desses modelos.

O modelo de distribuição anisótropa proposto por Grossmann (1978, 1988) é uma distribuição binormal onde as linhas de igual densidade de probabilidade de ocorrência de pólos são elipses de semi-eixos proporcionais aos dois desvios-padrão principais. É uma distribuição plana onde os pólos são representados sobre o plano tangente à superfície esférica no ponto correspondente à atitude média.

A função densidade de probabilidade da distribuição é dada por (Grossmann, 1988):

$$f_p(\omega, \varepsilon) = \frac{1}{2\pi\sigma_M\sigma_m} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\cos^2(\omega - \omega_M)}{\sigma_M^2} + \frac{\text{sen}^2(\omega - \omega_M)}{\sigma_m^2}\right]} \text{Ig}^2 \varepsilon \quad (7)$$

Para caracterizar completamente a distribuição das atitudes das superfícies de descontinuidades de uma dada família com o auxílio do modelo bivariado normal no plano tangente com a atitude média é preciso conhecer cinco parâmetros: a direção  $\bar{\theta}$  e a inclinação  $\bar{\varphi}$

da atitude média, os desvios padrão máximo e mínimo,  $\sigma_M$  e  $\sigma_m$ , e o ângulo que identifica a orientação da dispersão máxima,  $\omega_M$ , dados pelas equações:

$$\bar{\theta} = \text{arctg} \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\text{sen}\varphi_i \text{sen}\theta_i}{\text{cos}\varepsilon_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\text{sen}\varphi_i \text{cos}\theta_i}{\text{cos}\varepsilon_i}}$$

$$\bar{\varphi} = \text{arctg} \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{\text{sen}\varphi_i \text{cos}\theta_i}{\text{cos}\varepsilon_i}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \frac{\text{sen}\varphi_i \text{sen}\theta_i}{\text{cos}\varepsilon_i}\right)^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{\text{cos}\varphi_i}{\text{cos}\varepsilon_i}}$$

(8)

Onde:

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

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \text{tg}^2\varepsilon_i + \sqrt{\left\{\sum_{i=1}^n [\text{tg}^2\varepsilon_i \text{cos}(2\omega_i)]\right\}^2 + \left\{\sum_{i=1}^n [\text{tg}^2\varepsilon_i \text{sen}(2\omega_i)]\right\}^2}}{2(n-1)}}$$

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \text{tg}^2\varepsilon_i - \sqrt{\left\{\sum_{i=1}^n [\text{tg}^2\varepsilon_i \text{cos}(2\omega_i)]\right\}^2 + \left\{\sum_{i=1}^n [\text{tg}^2\varepsilon_i \text{sen}(2\omega_i)]\right\}^2}}{2(n-1)}}$$

(9)

Onde:

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

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

$$\text{sen}\varepsilon_i \text{sen}\omega_i = \text{sen}\varphi_i \text{sen}(\bar{\theta} - \theta_i)$$

$$\omega_M = \frac{1}{2} \text{arctg} \frac{\sum_{i=1}^n [\text{tg}^2\varepsilon_i \text{sen}(2\omega_i)]}{\sum_{i=1}^n [\text{tg}^2\varepsilon_i \text{cos}(2\omega_i)]}$$

(10)

**APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS** Serão apresentados três estudos de casos, envolvendo um talude de mina, uma encosta urbana e um talude de rodovia. O método numérico de agrupamento das descontinuidades em famílias proposto por Grossmann (1978, 1988) será aplicado a cada um dos casos, associado à utilização de métodos clássicos. Tais métodos permitem a visualização e a correção do rigor excessivo na definição das famílias. Portanto, os dois



Figura 3 - Bloco rochoso instável na face do Talude Sul.

métodos se complementam levando a resultados aceitáveis e de ampla comprovação em campo.

**Talude Sul, Mina de Timbopeba (Vale S.A.)** Lana (2000) utilizou o modelo de Grossmann (1978, 1988) para um talude escavado em quartzito na Mina de Timbopeba, Vale S. A., Ouro Preto. O talude estudado se localiza nas rochas do Grupo Caraça, base do Supergrupo Minas, no Quadrilátero Ferrífero. Elas ocorrem na parte SW da área de concessão e são representadas pelos quartzitos bem estratificados de coloração creme da Formação Moeda e pelos filitos crenulados de coloração cinza prateada pertencentes à Formação Batatal.

O talude, à época do estudo, tinha altura média de 150m e extensão média de 200m. Como é um talude contínuo, sem bermas, foram necessárias técnicas de montanhismo (rappel) para mapeamento geotécnico. Os locais de medição foram definidos em seções aproximadamente paralelas à reta de maior declive do talude médio. A distância entre locais de medição foi de aproximadamente 10m. A atitude da face do talude nos locais de medição foi obtida a partir de levantamento topográfico, durante o mapeamento.

Durante o mapeamento geotécnico observou-se que as descontinuidades presentes determinam os mecanismos de ruptura. Blocos rochosos instáveis de dimensões pequenas a médias, delimitados por três ou duas descontinuidades, foram observados no campo. Na figura 3 um bloco delimitado por três descontinuidades na face do Talude Sul é mostrado.

Dois tipos de descontinuidades são observados nesse talude; as descontinuidades de foliação, penetrativas e muito frequentes, cujo pequeno espaçamento dá origem a placas rochosas de pequena espessura (ver Fig. 3) e as fraturas. O modelo de Grossmann (1978, 1988) foi aplicado apenas para definição das famílias de fraturas já que a foliação é uma família de descontinuidades facilmente reconhecida em campo.

É notável a variabilidade das atitudes das descontinuidades no Talude Sul, conseqüência da complexidade geológico-estrutural do Quadrilátero Ferrífero, o que dificulta consideravelmente a identificação das famílias de descontinuidades.

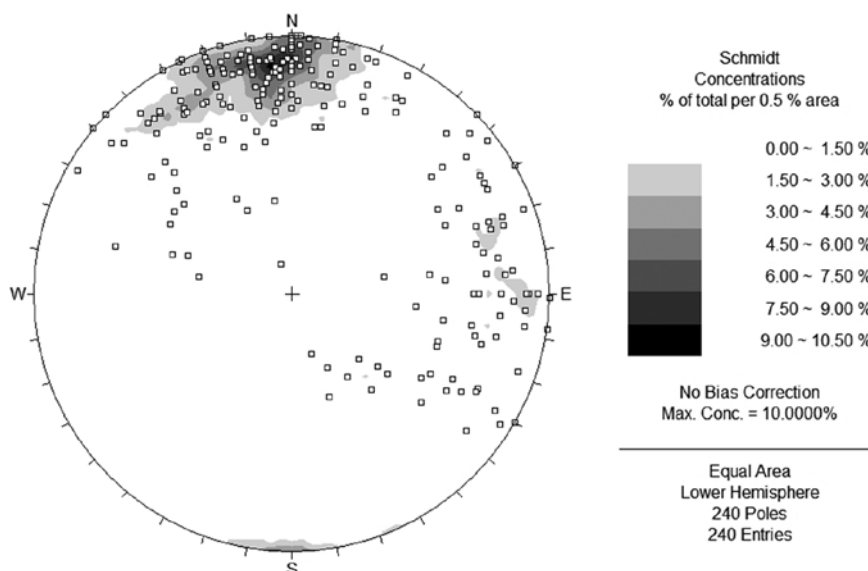


Figura 4 - Diagrama de densidade de pólos para o Talude Sul. (Fonte Rocscience 2008).

**APLICAÇÃO DO MODELO DE GROSSMANN** Na figura 4 é mostrado o diagrama de densidade de pólos para as fraturas obtidas no levantamento geotécnico realizado no Talude Sul. Apenas uma família de fraturas é nítida no diagrama; os demais pólos apresentando distribuição muito irregular (Fig. 4).

Neste caso, a aplicação do modelo de Grossmann (1978, 1988) pode levar a um resultado mais coerente, visto que é nítida a presença de mais famílias em campo, porém o padrão das diversas fraturas é semelhante quanto às demais características geotécnicas, como rugosidade, eventual presença de preenchimento de veios de quartzo etc, não sendo possível sua distinção baseada nessas características. Além disso, a aparente distribuição irregular dos pólos no diagrama da figura 4 pode ser decorrente da diferença de frequência entre as diversas famílias de descontinuidades, levando à definição apenas daquela família mais freqüente, que acaba por encobrir as outras menos freqüentes.

Os melhores resultados obtidos com a aplicação do modelo de Grossmann (1978, 1988) foram verificados com o emprego da terceira hipótese para cálculo do ângulo diedro limite, dada pela equação (4). Vários conjuntos de descontinuidades foram formados. A família mais freqüente, denominada  $f_2$ , que é visível no diagrama da figura 4, foi incluída num conjunto com 144 descontinuidades. Outra família menos freqüente, denominada  $f_3$ , pode ser identificada, mas por causa do rigor excessivo do método e da grande variabilidade das atitudes aparece dividida em dois conjuntos distintos, que puderam ser agrupados tendo em vista a semelhança nos parâmetros da distribuição de Grossmann, descrita anteriormente. Assim são comparados os valores de atitudes médias, os ângulos  $\omega_M$  que definem a máxima dispersão e os desvios padrão máximo e mínimo,  $\sigma_M$  e  $\sigma_m$ . Se estes parâmetros possuem valores próximos os conjuntos são reagrupados, o que representa um refinamento do mode-

lo proposto por Grossmann (1978, 1988) adotado neste trabalho. Esta comparação de parâmetros da distribuição de Grossmann (1978) levou no caso do Talude Sul à definição de duas famílias principais de descontinuidades; a família  $f_2$  formada por 150 descontinuidades e a família  $f_3$  formada por 24 descontinuidades.

Depois de gerado o diagrama de pólos das diversas famílias obtidas, observou-se que mais três descontinuidades classificadas como aleatórias poderiam ser incluídas na família  $f_3$  pela proximidade desses pólos com o conjunto de pólos que define esta família. O resultado final é apresentado na figura 5, onde as descontinuidades consideradas aleatórias somam 63. Essas descontinuidades são provenientes de conjuntos com menos de sete pólos.

Os resultados obtidos com a aplicação do modelo, embora melhores que aqueles provenientes da aplicação do método clássico (Fig. 4), ainda apresentam alguns problemas. O número de descontinuidades aleatórias, por exemplo, é muito alto, o que pode indicar a existência de outros conjuntos de descontinuidades com baixa frequência. A família  $f_3$  é classificada com base no modelo de distribuição de Grossmann (1978), critério adotado neste trabalho. Entretanto, pela observação da figura 4 é possível confirmar a dificuldade de identificação desta família, porque muitos pólos de descontinuidades aleatórias têm atitudes próximas dos pólos englobados nesta família. Mesmo assim, se comparado aos resultados obtidos pela aplicação exclusiva do método clássico, a identificação da família  $f_3$  representa um ganho significativo, mostrando que a aplicação do método numérico associado ao método clássico permitiu a identificação de famílias de frequências muito distintas.

Reaplicando o modelo de Grossmann (1978, 1988) apenas ao conjunto de descontinuidades aleatórias não modifica os resultados obtidos. Numerosos

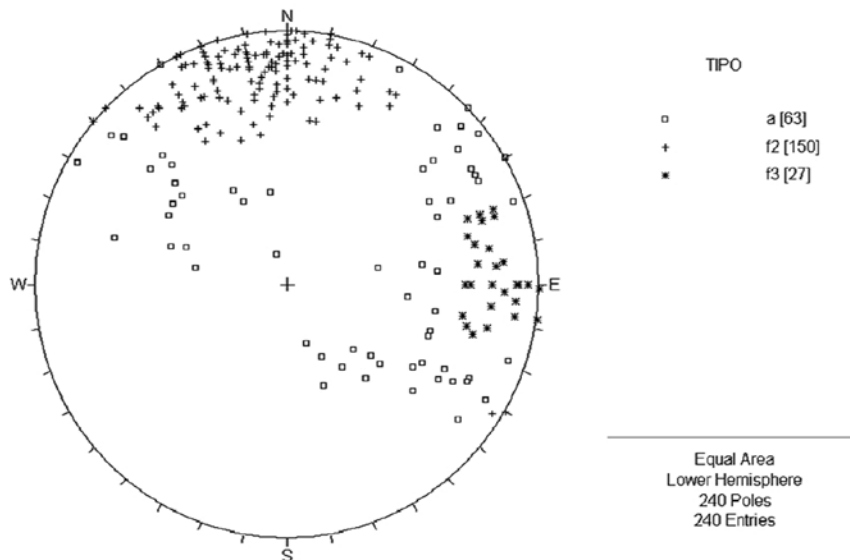


Figura 5 - Diagrama de pólos para o Talude Sul obtido pela aplicação do modelo (Fonte Rocscience 2008).

conjuntos são formados, todos com menos de oito descontinuidades. Decidiu-se, portanto, pela aceitação dos resultados do modelo, tal como indicado na figura 5.

Os blocos potencialmente instáveis no talude sul são formados pelas descontinuidades de foliação e pelas duas famílias  $f_2$  e  $f_3$ . Também é possível a formação de blocos pelas descontinuidades de foliação, por  $f_2$  e por uma das descontinuidades aleatórias.

**A encosta Morro do Curral** A encosta Morro do Curral está localizada na porção pertencente ao centro histórico de Ouro Preto – MG e estende-se desde o bairro Jardim Alvorada até a Praça Cesário Alvim, onde

está localizado o prédio da antiga estação ferroviária. As principais rupturas presentes podem ser facilmente visualizadas a longas distâncias, assim como a ocupação urbana nestas proximidades (Fig. 6).

As litologias na encosta Morro do Curral correspondem aos xistos da formação Sabará, Quadrilátero Ferrífero, de geologia complexa devido, principalmente à variação do grau de metamorfismo (Carvalho, 1982).

Os principais problemas associados à encosta Morro do Curral ocorrem em áreas pouco extensas ao longo da encosta, onde as rupturas são geradas envolvendo blocos delimitados por descontinuidades e/ou percolação de água por meio dos taludes, com carre-



Figura 6 - Localização do Morro do Curral no espaço urbano de Ouro Preto – MG.

amento de material de granulometria fina proveniente dessas rupturas até a base da encosta e depósito deste material nos vales. A movimentação de grandes blocos também é presenciada com a formação de depósitos de tálus na base da encosta o que ocasiona riscos à população instalada na sua base.

A área na encosta onde foi feito o levantamento geotécnico para este estudo é mostrada na figura 7. Essa região foi objeto de estudos anteriores por Fernandes (2000) e Pinheiro (2002), onde o maciço foi compartimentado sob o ponto de vista geotécnico e os principais mecanismos de ruptura descritos. A área estudada corresponde ao local onde ocorrem duas cicatrizes de ruptura no topo da encosta, denominadas cicatriz 1 e cicatriz 2 (Fig. 7).

As principais discontinuidades presentes no maciço são as discontinuidades de foliação e as fraturas. Essas estruturas condicionam mecanismos de ruptura diversos. Blocos delimitados por duas ou três discontinui-

dades, uma delas a foliação, são observados em campo.

O levantamento geotécnico foi feito em alto nível de detalhe, apenas na região de ocorrência das cicatrizes de ruptura. O número de dados obtido, em função da pequena extensão do local mapeado e das dificuldades de acesso não é muito grande, mas a metodologia empregada garante que as médias das famílias de discontinuidades sejam significativas para estudo das rupturas verificadas no local.

**APLICAÇÃO DO MODELO DE GROSSMANN** Novamente o problema da definição das famílias de discontinuidades aplica-se apenas às fraturas, sendo a família de discontinuidades de foliação facilmente identificada em campo.

A figura 8 mostra a densidade de pólos para a encosta Morro do Curral. Duas famílias de discontinuidades são identificadas, uma com 62 pólos e atitude mé-



Figura 7 - Área estudada mostrando as cicatrizes de rupturas.

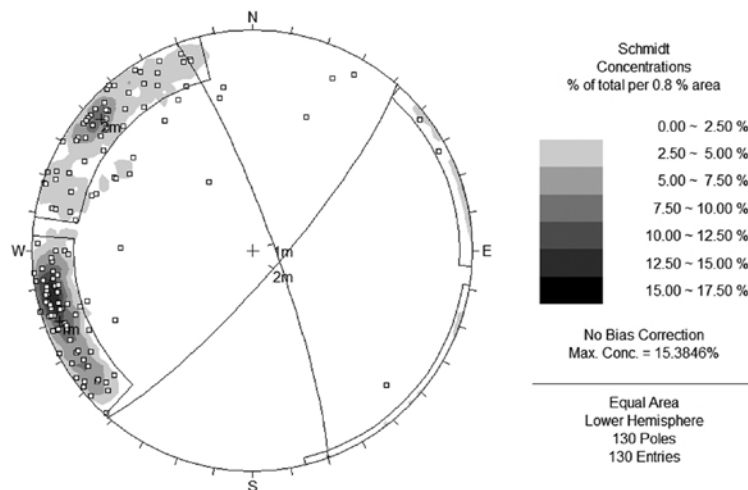


Figura 8 - Diagrama de densidade de pólos para o Morro do Curral (Fonte Rocscience 2008).



dia 070/82; a outra com 50 pólos e atitude média 132/80. Dezoito descontinuidades foram consideradas aleatórias.

Na figura 9 é mostrado o diagrama de densidade de pólos com os resultados da aplicação do modelo de Grossmann (1978, 1988). Novamente a terceira hipótese, equação 4, mostrou-se a melhor opção para cálculo do ângulo diedro limite. As outras hipóteses levaram a um número excessivo de conjuntos de descontinuidades, o que não condiz com a situação de campo. Trinta e uma descontinuidades aleatórias foram encontradas, mostrando que o método numérico é mais rigoroso que a separação visual das famílias através do diagrama de densidade de pólos. No diagrama da figura 9 as descontinuidades aleatórias foram retiradas para melhor visualização das famílias. Essas descontinuidades formam conjuntos pequenos em relação àqueles definidos como famílias.

Foram identificadas três famílias de descontinuidades;  $f_1$  com 60 pólos e atitude média 070/82,  $f_2$  com 24 pólos e atitude média 131/81 e  $f_3$  com 15 pólos e atitude média 188/80. As curvas de isofrequência de pólos são representadas na figura 9 para melhor visualização das famílias.

A família  $f_1$  é bem definida quando se utilizam os dois métodos, o clássico e o numérico. O maior problema é na definição das demais famílias. No método clássico apenas mais uma família é definida, além da família  $f_1$ . Já no método numérico três famílias são identificadas. As famílias  $f_2$  e  $f_3$  poderiam ser interpretadas como uma única família pela proximidade dos seus pólos no diagrama de densidade. Entretanto seus parâmetros estatísticos, ou seja, os valores de atitudes médias, os ângulos  $\omega_M$  que definem a máxima dispersão e os desvios-padrão máximo e mínimo,  $\sigma_M$  e  $\sigma_m$ , são muito diferentes, mas o pequeno número de descontinuidades presentes em cada uma dessas famílias dificulta uma análise conclusiva. Na figura 9 os pólos dessas duas famílias, embora próximos, são separados em dois conjuntos distintos que não se interceptam.

Observa-se também que a família  $f_2$  definida com base exclusivamente no método clássico apresenta grande dispersão ou permite também mais de uma interpretação. Seria possível, por exemplo, na figura 8 retirar algumas descontinuidades dessa família, interpretando-as como aleatórias.

A aplicação do modelo de Grossmann (1978, 1988) neste caso permite que o usuário escolha aquela interpretação que explica melhor o seu modelo de maciço rochoso. No caso de um estudo de modos de ruptura no talude, por exemplo, optar pela presença das três famílias significa adotar mais opções de modos de ruptura, porque a combinação das médias de cada família produzirá número maior de possibilidades cinemáticas de ruptura.

**Rodovia de acesso a Ouro Preto** Outra área selecionada para estudo está situada na rodovia que liga Ouro Preto-MG a Belo Horizonte - MG, nas proximidades do Hotel Estalagem das Minas (SESC) na saída da cidade. O talude apresenta aproximadamente 100m de extensão, é composto basicamente por xistos alterados. Observa-se em campo a presença de diversas rupturas e de dobramentos, o que dificulta a definição das famílias de descontinuidades. Devido às rupturas ocorridas formou-se no acostamento da rodovia um grande depósito de tálus. Esse é um fator que dificulta o levantamento dos dados em campo (Fig. 10) motivo pelo qual foram levantados apenas alguns pontos ao longo do talude, por se tratar de um material que já sofreu deslocamento. Dificuldades também foram encontradas no local devido à forte inclinação do talude, gerando uma condição de risco considerável para a execução dos levantamentos de campo.

Também neste caso dominam as descontinuidades de foliação e as fraturas que delimitam blocos potencialmente instáveis na face do talude.

Assim como nos casos anteriores foi aplicado o modelo de Grossmann (1978, 1988) apenas para as fra-

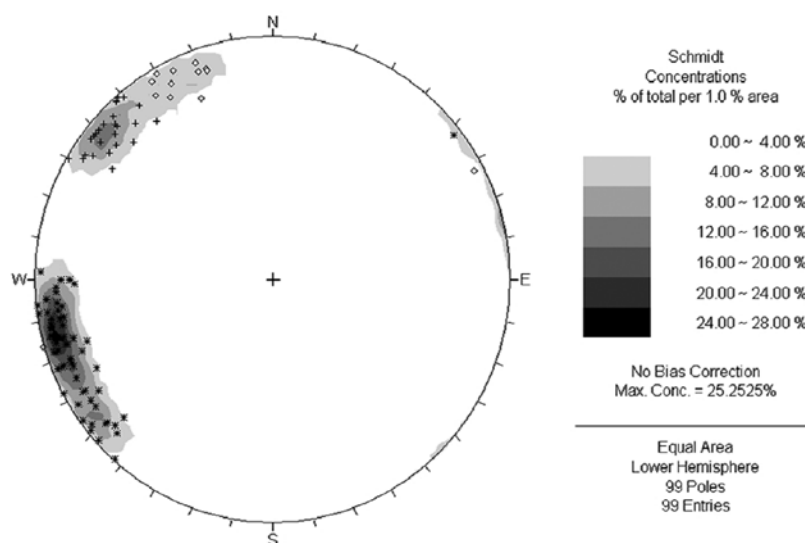


Figura 9 - Diagrama de densidade de pólos com aplicação do modelo para o Morro do Curral (Fonte Rocscience 2008).

turas, sendo as descontinuidades de foliação facilmente identificadas em campo.

**APLICAÇÃO DO MODELO DE GROSSMANN** Na figura 11 é mostrado o diagrama de pólos com as curvas de densidade para o talude da rodovia de acesso. A identificação das famílias é difícil, já que as curvas de densidade de pólos se interceptam. Numa primeira tentativa definiram-se três famílias de fraturas utilizando-se exclusivamente o método clássico;  $f_1$  com 89 pólos e atitude média 267/77,  $f_2$  com 27 pólos e atitude média 203/82 e  $f_3$  com 25 pólos e atitude média 230/82.

Na figura 12 é mostrado o diagrama de densidade de pólos com os resultados da aplicação do modelo de Grossmann (1978, 1988). Nesse caso a segunda hipótese, equação 3, mostrou-se a melhor opção para



Figura 10 - Área estudada mostrando a o depósito de tálus oriundo de rupturas no talude.

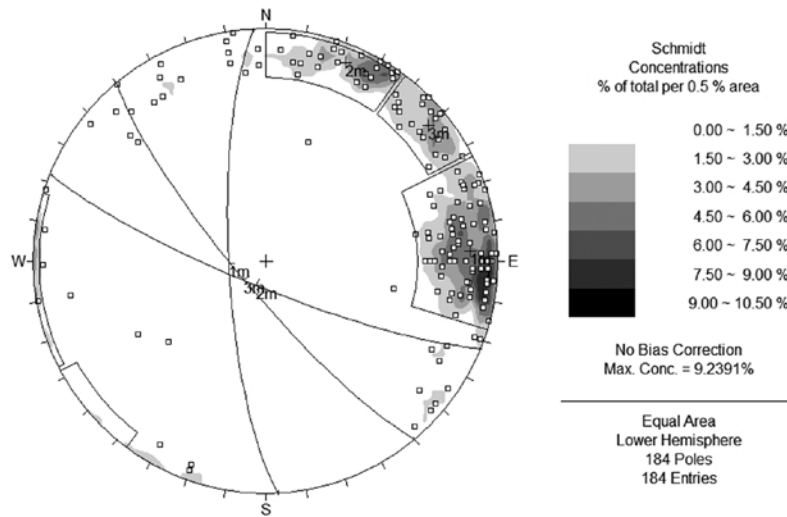


Figura 11 - Diagrama de densidade de pólos para o talude da rodovia de acesso (Fonte Rocscience 2008).

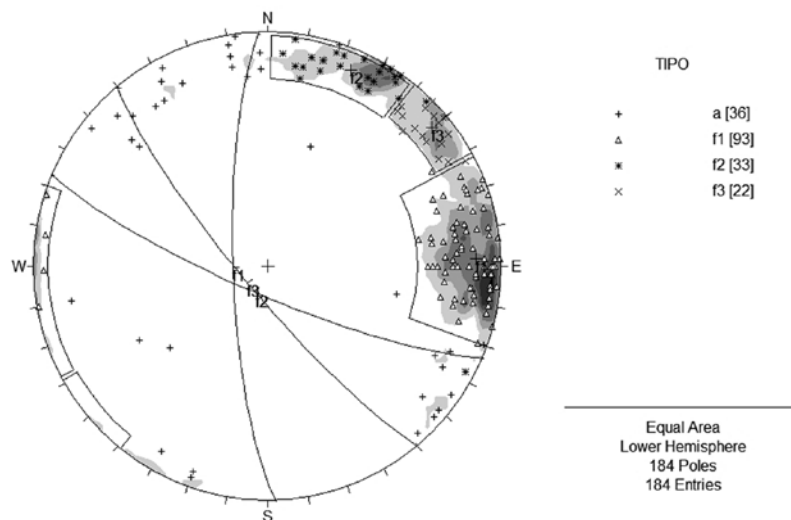


Figura 12 - Diagrama de densidade de pólos para o talude da rodovia de acesso (Fonte Rocscience 2008).

cálculo do ângulo diedro limite. As outras hipóteses levaram a um número excessivo de conjuntos de descontinuidades, o que não condiz com a situação de campo. Após reinterpretação do modelo procedeu-se à união de dois conjuntos para definição da família  $f_1$ , já que os parâmetros da distribuição de Grossmann (1978, 1988) apresentam grande semelhança para os dois conjuntos. O primeiro conjunto foi formado com 20 pólos, o segundo com 13 pólos.

Os resultados do modelo de Grossmann (1978, 1988) e do método clássico foram superpostos na figura 12 para efeito de comparação. Observa-se que a separação das famílias é muito parecida. Isso também ocorre com as atitudes médias encontradas pelos dois métodos. As descontinuidades aleatórias são praticamente semelhantes para os dois modelos. A aplicação do modelo de Grossmann (1978, 1988), nesse caso, vem corroborar os resultados do modelo clássico, produzindo um resultado confiável sob o ponto de vista prático.

**CONCLUSÕES** Devido às dificuldades e incertezas na definição das famílias de descontinuidades a partir somente da interpretação de diagramas de densidade, é de grande importância a utilização de métodos numéricos mais rigorosos, especialmente naqueles casos onde o maciço rochoso é muito complexo sob o ponto de vista estrutural.

A variabilidade das amostras ao longo das áreas, devido a presença de dobramentos, gera algumas

vezes um número excessivo de conjuntos. A reinterpretação dos resultados com o auxílio da representação das descontinuidades em diagramas de pólos e da comparação dos parâmetros estatísticos dos conjuntos formados permite o refinamento do modelo e a produção de resultados aceitáveis sob o ponto de vista prático, como demonstram os estudos de casos apresentados.

As diversas hipóteses de separação com base no ângulo diedro limite proposto por Grossmann (1978, 1988) devem ser testadas caso a caso, escolhendo-se aquela que melhor explica os resultados obtidos, com base na situação de campo e nos diagramas de pólos.

É essencial verificar se os resultados do modelo explicam bem as estruturas observadas em campo, para que as famílias sejam definidas corretamente sob o ponto de vista geológico. Nesse sentido os resultados do modelo proposto mostram-se bastante adequados para trabalhos de rotina em geotecnia, onde os mecanismos de ruptura em taludes devem ser definidos a partir de levantamentos geotécnicos pormenorizados de áreas de pequena extensão. Nesses casos é normalmente comum a presença de um número reduzido de dados, o que torna ainda mais difícil a definição das famílias de descontinuidades a partir da utilização exclusiva do método clássico.

**Agradecimentos** Os autores agradecem a FAPEMIG (Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais) pelo apoio recebido na realização deste trabalho.

## Referências

- Cheaney R.F. 1983. *Statistical methods in geology*. London, George Allen & Unwin, 169 p.
- ROCSCIENCE. 2008. DIPS, version 5.1, User manual. Canadá.
- Fernandes G. 2000. *Caracterização Geológico-Geotécnica e Proposta de Estabilização da Encosta do Morro do Curral – Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto*. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto, MG, 136p.
- Flinn D. 1958. On tests of significance of preferred orientation in three-dimensional fabric diagrams. *Journal of Geology*, **66**:526-539.
- Grossmann N.F. 1978. *Contribuição para o estudo da compartimentação dos maciços rochosos*. 10 relatório. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 197p.
- Grossmann N.F. 1988. As descontinuidades nos maciços rochosos. 10 relatório. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 118 p.
- Lana M.S. 2000. *Estudo dos Mecanismos de Ruptura em Taludes de Grande Altura num Maciço Rochoso de Geologia Estrutural Complexa*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 211p.
- Leite L.F. 2008. *Aplicação de métodos estatísticos e geoestatísticos no estudo de famílias de descontinuidades*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Mineral, UFOP, Ouro Preto, MG, 167p.
- Mahtab M.A., Bolstad D.D., Alldredge J.R. & Shanley R.J. 1972. *Analysis of fracture orientations for input to structural models of discontinuous rock*. United States Department of the Interior, Bureau of Mines, Report of investigations 7669, 76p.
- Pinheiro A.L. 2002. *Análise de rupturas em talude no Morro do Curral, Ouro Preto, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Mineral, UFOP, Ouro Preto-MG, 111 p.

**Manuscrito ID 13842**

**Submetido em 7 de abril de 2009**

**Aceito em 11 de novembro de 2009**