



## INFORMAÇÕES GERAIS DO TRABALHO

**Título do Trabalho:** CLASSIFICAÇÃO DO RISCO GEOTÉCNICO EM TALUDES ROCHOSOS DE MINAS A CÉU ABERTO ATRAVÉS DE ANÁLISE DISCRIMINANTE

**Autor (es):** Rodrigo Cesário Lourenço; Dr. André Monteiro Klen

**Palavras-chave:** risco geotécnico; análise discriminante multivariada; taludes rochosos de mina a céu aberto

**Campus:** Ouro Preto

**Área do Conhecimento (CNPq): (Engenharias)**

**Tipo de bolsa:** PIBIC

**Financiador:** CNPQ

### RESUMO

O risco de instabilidade associado a um talude pode ser entendido como a interação da probabilidade de ruptura com as consequências geradas por essa ruptura. Muitos estudos existentes na literatura relacionados às análises de risco são qualitativos e mesmo quando quantificam o risco o fazem com alto grau de subjetividade. Essas análises apresentam grandes desvantagens como diferentes precisões e confiabilidade reduzida, gerando necessidade crescente de gerenciamento quantitativo do risco de forma a minimizar a subjetividade. O projeto tem como objetivo a criação de um sistema de classificação de risco para taludes rochosos de minas a céu aberto baseado na técnica estatística de Análise Discriminante, a ideia é que esse sistema seja de fácil implementação e barato de se empregar em empreendimentos mineiros. Como resultado final, o projeto apresenta um *software* desenvolvido no *Scilab* para a realização da classificação de risco geotécnico.

### INTRODUÇÃO:

Um dos pontos mais importantes dentro da operação de uma mina a céu aberto é a gestão dos riscos geotécnicos dos taludes rochosos. Essa atividade tem um papel fundamental na operação da mina, pois, a ruptura de um talude pode causar a interrupção da operação de uma frente de lavra ou até mesmo de toda a mina, podendo causar grandes prejuízos, especialmente, os econômicos, sociais e ambientais.

O reflexo dessa preocupação é o aumento do interesse, por parte dessas empresas, na formação de grupos de discussão sobre o tema com o intuito de propor métodos e procedimentos para classificação, análise e gestão de riscos de seus taludes, sejam eles operacionais ou finais.

Apesar do grande destaque dado na literatura aos estudos e metodologias de análise e gestão de riscos de taludes, a subjetividade inerente a esses trabalhos é visível. As diversas variáveis de controle, parâmetros geotécnicos, bem como os pesos atribuídos a relação existente entre elas, são muitas vezes, estabelecidos de modo subjetivo sem um critério que justifique as escolhas feitas.

Isso porque, nesses estudos nem sempre a metodologia aplicada para definição desses critérios é muito clara ou suficientemente discutida e, em muitos casos, não é estabelecida a partir de um embasamento matemático ou estatístico.



Sabe-se que a probabilidade de ruptura em taludes rochosos de minas a céu aberto se relaciona, principalmente, às características da rocha intacta e das descontinuidades presentes nos maciços. Sendo que, as características das descontinuidades, como número de famílias, espaçamento, persistência, abertura, tipo de preenchimento, alteração da parede e condição de água têm implicação direta no comportamento geotécnico dos taludes (ISRM, 1981, 2007).

A influência do conjunto das características das descontinuidades tem sido levada em conta através de sistemas de classificação geomecânica, sendo os mais comumente utilizados para maciço rochoso o RMR (Rock Mass Rating) proposto por Bieniawski (1989) e o Sistema – Q proposto por Barton *et. al.* (1974).

Contudo, o grau de subjetividade envolvido na maioria desses sistemas ou a desconsideração de variáveis importantes, são obstáculos para sua utilização de forma efetiva na quantificação dos problemas.

A subjetividade advém, principalmente, segundo Naghadehi *et. al.* (2013) da construção e quantificação da matriz de interação entre os diversos parâmetros geotécnicos necessários em cada um dos sistemas de classificação. Isso porque, na maioria das vezes, a codificação desses relacionamentos ocorre de forma qualitativa e baseada na experiência dos profissionais.

Alguns trabalhos como o de Cai *et al.* (1998) e Naghadehi *et. al.* (2013), propõem a utilização de métodos estatísticos para amenizar ou até mesmo eliminar a subjetividade durante a definição da relação entre os parâmetros geotécnicos.

Com isso em mente, é proposta a aplicação da técnica da Análise Discriminante como ferramenta para a classificação de risco de taludes rochosos de mina. A ideia é que com a utilização dessa técnica os taludes rochosos de uma mina a céu aberto possam ser separados em estáveis ou instáveis a partir do conhecimento de seus parâmetros geotécnicos.

Essa técnica é aplicada a elementos multivariados e tem como objetivo, construir uma função matemática chamada de regra de classificação, que permita identificar o grupo ao qual um objeto pertence. Sendo que, para isso, ela se utiliza, *a priori*, de um banco de dados formado por elementos previamente categorizados em grupos. (HAIR *et al.*, 2009).

Ao final do projeto será construído um software, executável, em Scilab 5.41 que contemple o banco de dados e permita, de forma rápida, obter o resultado da classificação de risco. A escolha dessa plataforma de trabalho se deu devido ao Scilab ser uma ferramenta de desenvolvimento livre, intuitiva e de computação numérica (com foco na manipulação de matrizes).

## **METODOLOGIA:**

A base para o desenvolvimento do trabalho e condução dos experimentos é o banco de dados disponibilizado por Naghadehi *et. al.* (2013). Esse banco é composto por 84 taludes rochosos de minas a



céu aberto de todo o mundo. Cada talude é descrito por 18 parâmetros geotécnicos que são utilizados para classificar os taludes como estáveis ou instáveis. O banco de dados é dividido em 42 taludes estáveis e 42 instáveis

Os parâmetros geotécnicos são os seguintes: tipo de rocha (litologia), resistência à compressão simples da rocha intacta, RQD, alteração, tectonismo, condições de água subterrânea, número de famílias de descontinuidades, persistência das descontinuidades, espaçamento das descontinuidades, orientação relativa do talude e das descontinuidades, abertura das descontinuidades, rugosidade das descontinuidades, preenchimento das descontinuidades, ângulo do talude, altura do talude, método de desmonte, precipitação anual (incluindo chuva e neve) e histórico de rupturas.

Cada parâmetro geotécnico assume um valor dentro do intervalo de 0 a 1, de acordo com os critérios de classificação apresentados por Naghadehi *et. al.* (2013). Para maior entendimento desses parâmetros e de como atribuir valor aos mesmos o trabalho de Santos (2016) é uma referência complementar ao trabalho de Naghadehi *et. al.* (2013).

De posse desse banco de dados, o desenvolvimento do trabalho segue as etapas para construção da função discriminante e avaliação do ajuste geral. A metodologia dessas duas etapas é descrita a seguir e fundamentada nos trabalhos de Hair *et al.* (2009), Landim (2011) e Santos (2016)

A primeira tarefa é categorizar o banco de dados, ou seja, classificar os taludes em estáveis e instáveis. Em seguida, deve se dividir o banco de dados aleatoriamente em duas sub-amostras: amostra de análise e amostra de teste, na seguinte proporção 75% e 25% respectivamente. (HAIR *et al.*, 2009).

A amostra de análise é usada para desenvolver a função discriminante, enquanto que a amostra de teste é usada para testar a função discriminante e avaliação do ajuste geral do modelo. Para selecionar as amostras de análise e de teste utiliza-se o procedimento de amostragem proporcionalmente estratificada.

A função discriminante, Equação 1, é uma combinação linear das  $p$  variáveis (parâmetros geotécnicos) e tem como objetivo substituir o conjunto original das diversas mensurações por um único valor  $D_i$ .

$$D_i = \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 + \dots + \lambda_p x_p$$

Onde  $p$  é o número de variáveis;  $x_j$  são as variáveis,  $i=1,2,\dots,p$ ; e  $\lambda_i$  são os coeficientes,  $i=1,2,\dots,p$ .

Para fornecer um único valor os termos são adicionados na Equação 1 e a transformação é realizada de modo a fornecer a razão mínima entre a diferença entre pares de médias multivariadas e a variância multivariada nos dois grupos.



A técnica utilizada para o cálculo das funções discriminantes é a regressão linear, a construção das funções discriminantes aplicadas nesse trabalho é baseada na solução do sistema de equações lineares por cálculo matricial apresentado por Landim (2011, p.133-136).

De forma geral, o que se objetiva ao resolver esse sistema de equações é determinar os valores dos coeficientes  $\lambda_i$  que constituem a equação da função discriminante. De posse dos coeficientes pode-se determinar, a partir da Equação 1, os valores de  $D$  que representam os centros dos grupos de taludes estáveis e instáveis e o valor  $D_o$  que é o valor situado na linha expressa pela função discriminante a meio caminho do centro entre os dois grupos.

Portanto, definidos a função discriminante, os centros dos grupos e  $D_o$ , para se classificar um talude em estável ou instável basta levantar em campo os 18 parâmetros ( $x_j$  variáveis) e calcular o valor de  $D$  para este talude usando a Equação 1. Depois é só comparar esse valor com  $D_o$  com finalidade de verificar a qual grupo o talude pertence.

A Figura 1 apresenta um fluxograma que resume a metodologia aplicada para a construção e validação da função discriminante. Essa metodologia foi implementada no software *Scilab* dando origem a um programa que permite avaliar de forma rápida se um talude é estável ou instável.

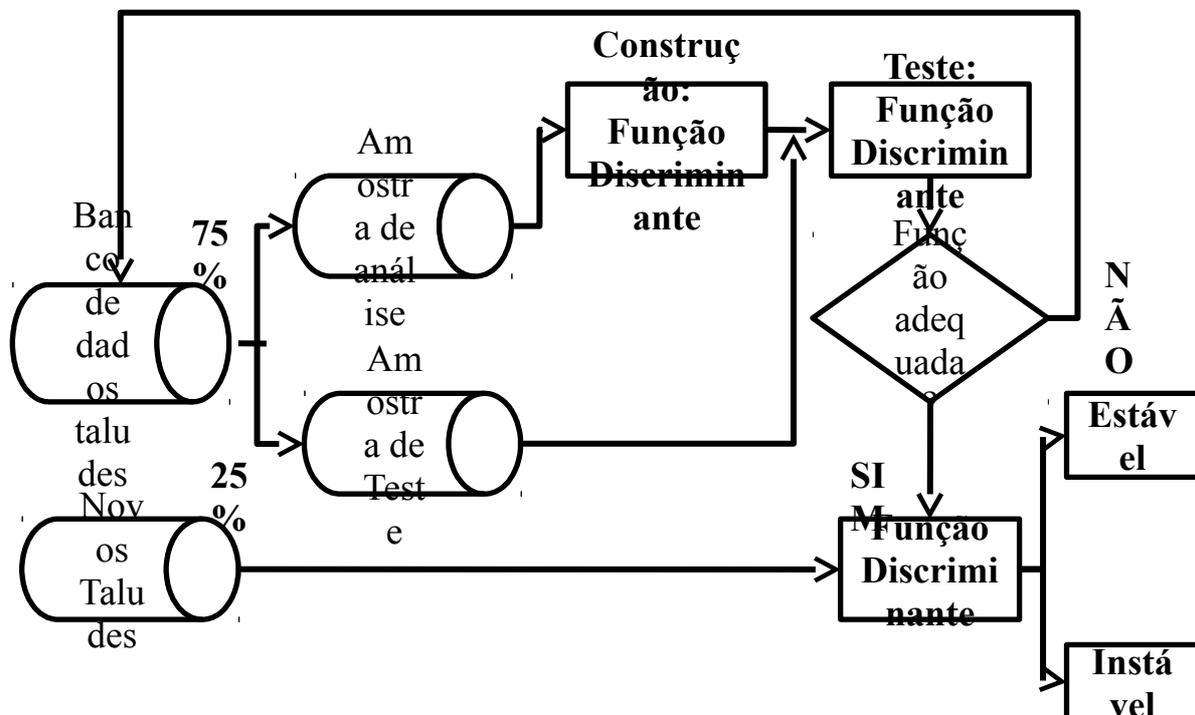


Figura 1: Fluxograma da metodologia de construção e validação da função discriminante

## RESULTADOS E DISCUSSÕES:



A amostra de teste é obtida a partir da amostragem proporcional estratificada, sendo, portanto constituída de 22 taludes, 11 estáveis e 11 instáveis. A Tabela 1 apresenta os elementos sorteados. Definida a amostra de teste, a amostra de análise com 62 taludes é utilizada para construir a função discriminante, para em seguida a função ser validada pela amostra de teste. Para isso é utilizado o programa desenvolvido no *Scilab* de acordo com a metodologia apresentada anteriormente.

Tabela 1: Amostra de Teste

Taludes Instáveis	Taludes Estáveis
Talude 25	Talude 8
Talude 35	Talude 9
Talude 41	Talude 15
Talude 43	Talude 19
Talude 46	Talude 39
Talude 49	Talude 40
Talude 66	Talude 52
Talude 67	Talude 59
Talude 75	Talude 60
Talude 83	Talude 65
Talude 84	Talude 69

A Equação 2 demonstra a Função discriminante encontrada a partir da amostra de análise:

$$D_i = 13,32 x_1 + 0,71 x_2 + 6,5 x_3 + -10,3 x_4 - 12,7 x_5 - 2,94 x_6 - 23,581 x_7 - 6,1 x_8 + 8,84 x_9 - 4,3 x_{10} - 5,86 x_{11} - 2,4 x_{12}$$

A Tabela 2 demonstra os resultados da aplicação da amostra de teste na função discriminante, Equação 2.

Tabela 2: Resultados da classificação da amostra de teste aplicada à função discriminante.

Taludes Instáveis	Função Discriminante
Talude 25	OK
Talude 35	OK
Talude 41	X
Talude 43	OK
Talude 46	OK
Talude 49	OK
Talude 66	OK
Talude 67	X
Talude 75	OK
Talude 83	OK
Talude 84	OK
Total de acertos	9
Total de erros	2

que

Taludes Estáveis	Função Discriminante
Talude 8	OK
Talude 9	OK
Talude 15	OK
Talude 19	OK
Talude 39	OK
Talude 40	OK
Talude 52	OK
Talude 59	OK
Talude 60	OK
Talude 65	OK
Talude 69	OK
Total de acertos	11
Total de erros	0

Avaliando os resultados apresentados pela Tabela 2 percebe-se todos os taludes estáveis da amostra



de teste foram classificados corretamente, enquanto que dois taludes instáveis foram alocados como estáveis. Este erro de classificação, possivelmente ocorre porque os taludes 41 e 67 estão na região de interseção entre os dois grupos.

Com esses dados pode-se calcular a probabilidade de acerto global da função discriminante que é definida pela Equação 3:

$$p(\text{acerto}) = \frac{n_{11} + i n_{22}}{n_1 + n_2}$$

Onde:  $n_{11}$  é o número de taludes instáveis classificados corretamente pela função discriminante;  $n_{22}$  é número de taludes estáveis classificados corretamente pela função discriminante;  $n_1, n_2$  são respectivamente o número de instáveis e estáveis da amostra de teste.

Aplicando a Equação 3, chega-se aos valor de 91% de acerto, ou seja, ao se utilizar a função discriminante, Equação 2, para classificar um novo talude, este tem 91% de chances de ser categorizado corretamente.

Conforme Landim (2011), outra forma de se testar a significância da função encontrada, ou seja, verificar se os dois grupos considerados pertencem a uma ou duas distintas populações é através do teste da distribuição  $F$  para as seguintes hipóteses:

$$H_0 = \mu_E = \mu_I$$

$$H_1 = \mu_E > \mu_I$$

Onde  $\mu_E$  é a média do grupo de taludes estáveis e  $\mu_I$  é a média do grupo de taludes instáveis. A hipótese nula está testando se as duas médias multivariadas são iguais com critério de rejeição de  $f_{0,05,31,31}$ , ou se a distância entre os grupos de taludes é zero.

Dessa forma, considerando que a estatística do teste é igual a  $f_0 = 11,15$  e o critério de rejeição igual a  $f_{0,05,31,31} = 1,84$ , rejeita-se  $H_0$ , pois,  $f_0 > i f_{0,05,31,31}$ . Para mais informações sobre a distribuição  $F$  e cálculo de sua estatística consultar Landim (2011).

Assim, diante dos resultados da probabilidade global de acertos e do teste de hipótese pode-se concluir que a função discriminante encontrada é adequada e pode ser aplicada para a previsão do risco geotécnico de novos taludes.

## CONCLUSÕES:

A função discriminante encontrada através da metodologia empregada mostra-se adequada para a determinação do risco geológico de taludes e o *software* desenvolvido em *Scilab* para esse fim apresenta-se como uma ferramenta para agilizar o processo de construção da função. Contudo, é importante ressaltar que o acompanhamento dos taludes em campo não pode ser substituído pela utilização do *software*.



Além disso, a aplicação do software deve vir acompanhada do banco de dados da própria mina, isso faz com que os resultados sejam mais próximos da realidade.

O projeto ainda está em processo de conclusão, sendo que as próximas etapas incluem análise da contribuição de cada variável para a definição dos dois grupos de taludes e aprimoramento do *software* em relação à interface gráfica com o usuário.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

BARTON, N., L., R.; LUNDE, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of rock support. **Rock Mechanics** v. 6, pp. 189-236.

BIENIAWSKI Z. T. (1989). **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering**. John Wiley & Sons, New York, 251 p.

CAI J. G.; ZHAO J, HUDSON J. A. (1998). Computerization of rock engineering systems using neural networks with an expert system. **Rock Mech Rock Eng.** v.31(3) pp. 135–152.

HAIR, J., F.; BLACK, W., C.; BABIN, B., J.; ANDERSON, R.. E.; TATHAM, R., L. (2009). **Análise Multivariada de dados**. 6ª Ed. Porto Alegre. Bookman. 688p.

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

ISRM (2007). **The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006**. R. Ulusay& J.A. Hudson (Eds), 628p.

LANDIM, P. M. B. (2011). **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. São Paulo: Oficina de Textos. 208 p.

MINGOTI, S. A. (2013). **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: UFMG. 297 p.

NAGHADEHI M. Z.; JIMENEZ R., KHALOKAKAIE R., JALALI S. M. E. (2013). A new open-pit mine slope instability index defined using the improved rock engineering systems approach. **Int. J. Rock Mech Min Sci**, 61, pp. 1-14.

SANTOS, A., E., M. (2016). Predição da condição de estabilidade de taludes de mina por meio de estatística multivariada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.