

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Aplicação de Métodos de Estatística Multivariada na Predição da Estabilidade de Realces Subterrâneos de uma Mina Brasileira de Ouro

Guilherme Alzamora Mendonça

Doutorando, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil,
guilherme.mendonca@aluno.ufop.edu.br

Caio Oliveira Rodrigues

Mestrando, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, caio.or@aluno.ufop.edu.br

Tatiana Barreto dos Santos

Professora, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, tatiana.santos@ufop.edu.br

RESUMO: Entre os desafios da mineração subterrânea está o dimensionamento adequado dos realces, visando a maximização do aproveitamento da reserva, preservando as condições de segurança. Atualmente, uma das ferramentas mais aplicadas nesta área é o Gráfico de Estabilidade, proposto por Potvin *et al.*, que por ser um método empírico criado com base em minas canadenses, nem sempre gera bons resultados quando aplicados às minas brasileiras. Assim, o presente trabalho consistiu na aplicação da técnica de análise discriminante para criação de um modelo estatístico para avaliação da estabilidade de realces de uma mina subterrânea brasileira. Foram analisados 71 realces, a partir dos parâmetros Raio Hidráulico, Q' e os índices A, B e C. Os resultados apontaram probabilidade global de acerto (POS) de 61,1%. A maior ocorrência dos erros correspondeu à classificação como estável de realces instáveis, indicando um caráter não conservador da proposta. O fato da taxa global de acerto não ter se mostrado tão elevada pode ser um indicativo de que, para este banco de dados, as variáveis utilizadas podem não ser suficientes para a predição da estabilidade de realces, sugerindo a necessidade de uma investigação mais detalhada, uma vez que as variáveis em questão vêm sendo amplamente utilizadas para esse tipo de tomada de decisão.

PALAVRAS-CHAVE: realces, estabilidade geotécnica, análise discriminante.

ABSTRACT: Considering mineral reserve exploitation maximization and geotechnical safety conditions, stope design is one of the challenges of underground mining. Currently, one of the most used tools for this purpose is the Stability Graph, proposed by Potvin *et al.*, which is an empirical method based on Canadian mines. It do not always provide good results when applied to Brazilian mines. This article consists in an application of discriminant analysis technique to propose a statistical model to evaluate stope stability of a Brazilian underground mine. 71 stopes were analyzed, using Hydraulic Radius, Q' , A, B and C parameters from Potvin method. The probability of success (POS) of the generated model is 61.1%. The model misclassified, in greater quantity, unstable as stable stopes, showing a non-conservative aspect of the propose. The obtained POS value could indicate that the used variables may not be enough to predict stope stability on this dataset. The authors suggests the need of a more detailed investigation, once those variables are largely used to assess the stope stability.

KEYWORDS: stope, geotechnical stability, discriminant analysis.

1 Introdução

Quando comparadas às operações de lavra a céu aberto, as operações subterrâneas apresentam menor recuperação, menor capacidade produtiva, menor controle de teores de minério, maior perda de minério e diluição e maiores preocupações com segurança operacional (BAKHTAVAR, SHAHRIAR, ORAEE, 2008),



evidenciando a necessidade de maior desembolso para o desenvolvimento atividades minerárias nesses ambientes. Desta forma, é imprescindível para as minas subterrâneas a existência de estudos com riqueza de detalhes, que possibilitem a minimização de erros e tornem as operações economicamente viáveis sem deixar de lado a garantia da segurança nas atividades de lavra.

Um dos métodos de lavra subterrânea largamente utilizados ao redor do mundo é o de lavra por realces, ou *sublevel stopping*. Nesse método, a lavra é realizada entre dois subníveis que se desenvolvem dentro da mineralização e que possuem uma certa distância entre si. Por meio da perfuração e do desmonte das rochas dos subníveis, os minérios são depositados na parte inferior do realce, de onde são transportados para as posteriores fases de tratamento. Para execução deste método de lavra o corpo mineralizado deve ter inclinação entre 50° e 90°, e o maciço rochoso deve ser de boa competência. (PAKALNIS, HUGHES, 2011; VILLAESCUSA, 2014). A Figura 1 apresenta o método de lavra por realces.

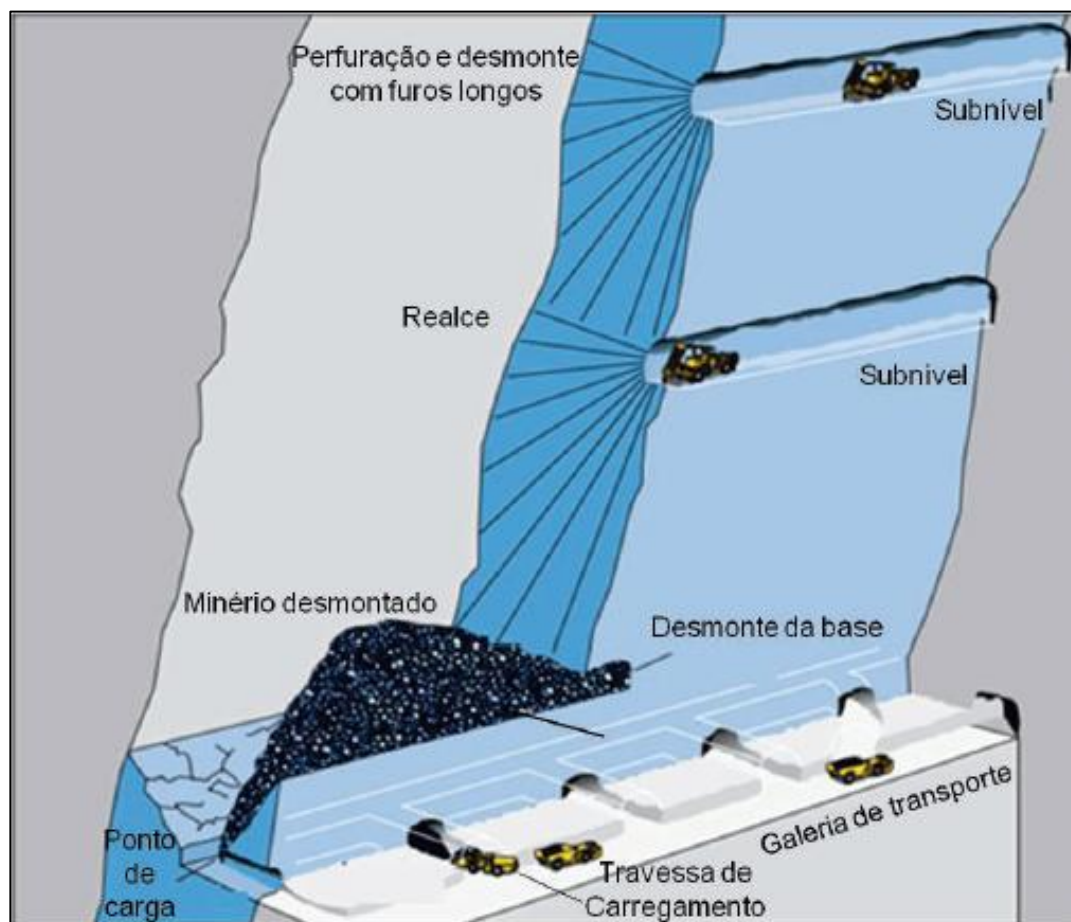


Figura 1: Esquema de funcionamento do método de lavra por realces (Adaptado de Atlas Copco, 2007).

Considerando a execução da lavra por realces ou de qualquer outro método de lavra subterrânea, assegurar a estabilidade de escavações é uma tarefa de extrema relevância para a continuidade da produção e operação na mina. Um dos principais métodos empíricos para verificação da estabilidade de realces é o Método do Gráfico de Estabilidade Modificado, proposto por Potvin *et al.* (1988), atualizando o método proposto por Mathews *et al.* (1981). O método consiste na utilização de um gráfico para determinar a estabilidade do realce ao relacionar o raio hidráulico da escavação, determinado pela divisão de uma das áreas das faces do realce pelo seu perímetro, e o fator N, que considera os valores do Sistema Q (Rock Tunneling Quality Index, Barton *et al.*, 1974) simplificado (Q'), fatores de tensão da rocha (A), orientação da descontinuidade (B) e ajuste da gravidade (C). Contudo, os métodos empíricos apresentam limitações, pois tendem apresentar melhores resultados nas regiões onde os dados foram coletados, e alguns deles não consideram outros fatores relevantes para a estabilidade do realce, como perfuração e desmonte. (SANTOS *et al.*, 2020; WANG, 2004)



Os avanços tecnológicos têm permitido que haja maior aproveitamento das reservas e aplicação de técnicas que diminuam incertezas e riscos operacionais durante a fase de extração mineral. Um dos principais fatores capazes de influenciar a viabilidade técnica e econômica de uma mina subterrânea é a diluição dos realces. De acordo com Charbel (2015), entende-se diluição como a contaminação do minério com rocha estéril, que provoca uma redução do teor da substância útil no minério lavrado, podendo ser planejada ou não-planejada. A Figura 2 apresenta este conceito.

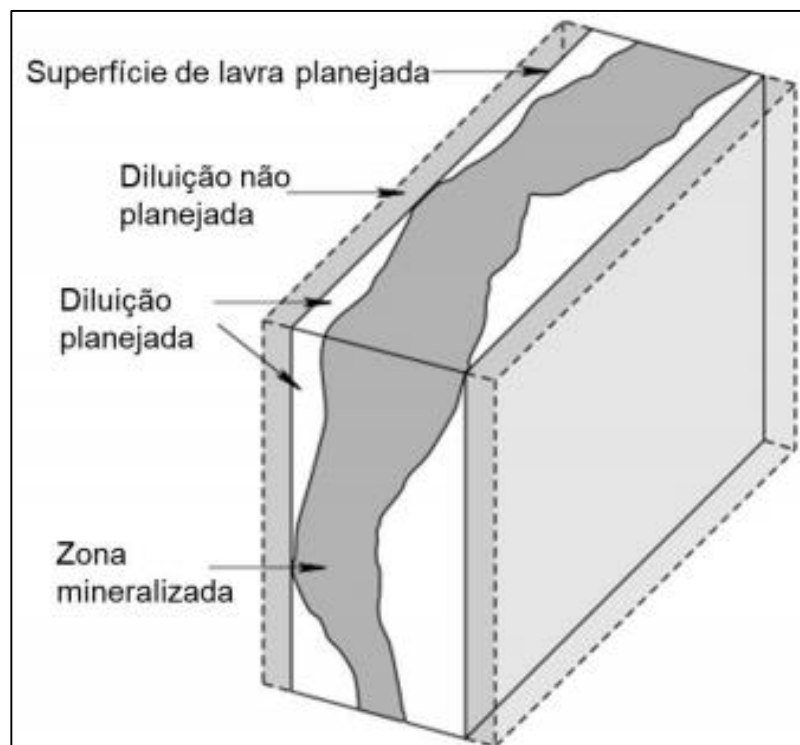


Figura 2: Tipos de diluição (Câmara, 2020).

Pelo fato de não poder ser totalmente evitada, é desejado que a diluição que ocorre nas operações de lavra seja a mais próxima possível daquela planejada, visto que este tipo de diluição que é considerado nos cálculos de estabilidade dos realces. A ocorrência de diluições não-planejadas acarreta uma série de gastos adicionais à atividade de lavra e beneficiamento mineral, como, por exemplo, no aumento do número de ciclos necessários para carregamento e transporte do material desmontado, paralização na produção para realização de intervenções visando garantir a estabilidade das estruturas presentes na mina que possam ter sido impactadas, danos a equipamentos, maiores custos relacionados à concentração do minério na usina de beneficiamento, entre outros. Além dos problemas de ordem econômica, é fundamental considerar possíveis danos relacionados à saúde e segurança dos trabalhadores responsáveis pelas atividades em subsolo. (COSTA, 2017).

Diante da necessidade de se avaliar a estabilidade das escavações subterrâneas com métodos que sejam confiáveis e tragam em si menor erro, o presente trabalho propôs a utilização de técnicas de estatística multivariada para analisar a estabilidade de realces de uma mina subterrânea em operação considerando as variáveis utilizadas pela metodologia clássica (Gráfico de Estabilidade) para esse fim. A técnica utilizada foi a análise discriminante, tendo como parâmetro de estabilidade a diluição dos realces. Dentro desse contexto, foram analisados 71 realces de uma mina de ouro. Os dados utilizados estão disponíveis em Costa (2017).

A análise discriminante é uma técnica que pode ser utilizada quando a variável dependente (condição de estabilidade dos realces: estável ou instável) é categórica e as variáveis independentes são métricas. O método é utilizado quando o objetivo principal é identificar o grupo ao qual o objeto do estudo pertence. Como característica, a análise discriminante exige que as variáveis independentes sejam todas métricas, e que os grupos sejam definidos no início do estudo (a priori). (HAIR *et al.*, 2009).



2 Metodologia

2.1 Banco de dados e preparação das amostras

Para a realização do presente trabalho, tomou-se parte do banco de dados disponível em COSTA (2017). Foram adotados os dados referentes aos parâmetros Raio Hidráulico, Q' , A , B e C , dos 71 realces citados pelo autor. Definiu-se que aqueles realces cuja diluição apresentava valores de até 25% seriam considerados estáveis, enquanto os demais seriam definidos como instáveis.

Inicialmente foi verificada a variabilidade dos dados por meio da análise do boxplot das variáveis. Em seguida foram calculadas a variância entre os dados e suas correlações, a fim de atestar a presença de correlações satisfatórias entre as variáveis.

A seguir foram conduzidas as análises com aplicação da técnica de Análise Discriminante, visando determinar a classificação dos realces. O banco de dados foi dividido em dois grupos, sendo uma amostra para treino e outra para validação externa do modelo proposto. A amostra treino foi tomada aleatoriamente, contendo 75% dos dados. Já a amostra de teste consistiu nos 25% dos elementos amostrais restantes.

2.2 Análise Discriminante

Para a aplicação da técnica de Análise Discriminante foram executadas análises considerando a função discriminante quadrática, conforme apresentado por Hair *et al.* (2009). Para validação dos modelos gerados foi utilizado o método de resubstituição com divisão amostral, sendo tomadas as mesmas amostras, treino e teste, obtidas anteriormente.

2.3 Interpretação dos resultados

Os resultados foram apresentados segundo uma matriz de confusão, conforme demonstrado pela Tabela 1. A partir da análise dessa matriz foi possível observar diferentes situações: realces estáveis classificados como estáveis (n_{11}), realces estáveis classificados como instáveis (n_{10}), realces instáveis classificados como estáveis (n_{01}) e realces instáveis classificados como instáveis (n_{00}). Assim, observou-se dois possíveis tipos de erros, classificar como estável um realce instável (Tipo 1), ou ainda classificar como instável um realce que se apresente estável (Tipo 2). As equações 1, 2, 3 e 4 apresentam, respectivamente, os cálculos da taxa de erro aparente global (TEA), a taxa de erro aparente do Tipo 1 (TEA1), a taxa de erro aparente do Tipo 2 (TEA2) e o cálculo da probabilidade global de acerto (POS) dos modelos.

Tabela 1: Matriz de confusão.

		Predição		
		Estável	Instável	Total
Real	Estável	n_{11}	n_{10}	$n_{11} + n_{10}$
	Instável	n_{01}	n_{00}	$n_{01} + n_{00}$
	Total	$n_{11} + n_{01}$	$n_{10} + n_{00}$	

$$TEA = \frac{n_{01} + n_{10}}{n_{11} + n_{10} + n_{01} + n_{00}} \quad (1)$$

$$TEA1 = \frac{n_{01}}{n_{11} + n_{10} + n_{01} + n_{00}} \quad (2)$$

$$TEA2 = \frac{n_{10}}{n_{11} + n_{10} + n_{01} + n_{00}} \quad (3)$$

$$POS = \frac{n_{11} + n_{00}}{n_{11} + n_{10} + n_{01} + n_{00}} \quad (4)$$



3 Resultados e Análises

3.1 Banco de dados e Amostras de Treino e Teste

O banco de dados utilizado possui para cada elemento amostral cinco variáveis independentes métricas (Raio hidráulico, Q' , A, B e C) e uma variável dependente não métrica (Condição de estabilidade do realce). A Tabela 2 apresenta os valores mínimos, médios e máximos para cada uma das variáveis avaliadas no problema. A Figura 3 apresenta o *boxplot* referente às variáveis.

Tabela 2: Sumário Estatístico do Banco de Dados

	RH (m)	Q'	A	B	C
Mínimo	3,4	8,1	0,60	0,20	3,5
Médio	6,2	33,9	0,88	0,21	6,0
Máximo	12,6	95,9	1,00	0,30	7,4

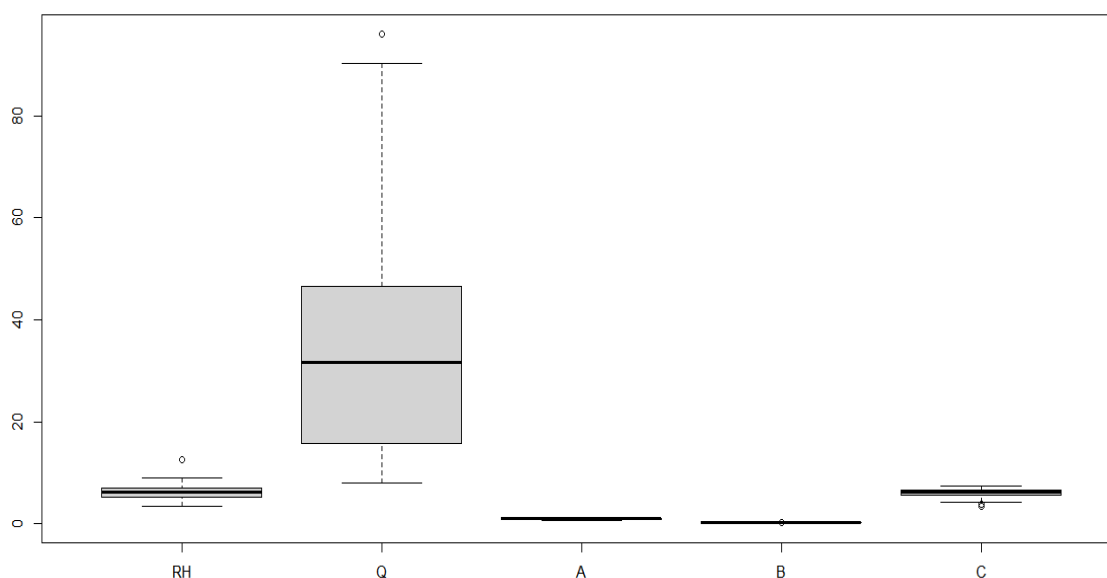


Figura 3: Boxplot das variáveis

A análise do *boxplot* indica a presença de alguns outliers univariados nas variáveis Q' e RH. Esses outliers foram mantidos, pois após verificação dos valores e das ocorrências notou-se que os valores são coerentes com suas respectivas variáveis, mesmo que estejam fora dos intervalos estabelecidos pelo *boxplot*. Ainda é possível observar uma baixa variabilidade para os parâmetros A e B.

Os cálculos de covariância e correlação entre as variáveis foram executados. As correlações são apresentadas por meio do gráfico de dispersão na Figura 4, enquanto que a matriz de variâncias e covariâncias é apresentada na Tabela 3. Observa-se que não foram observadas correlações significativas entre as variáveis, demonstrando que as variáveis utilizadas na construção do modelo são de fato independentes.

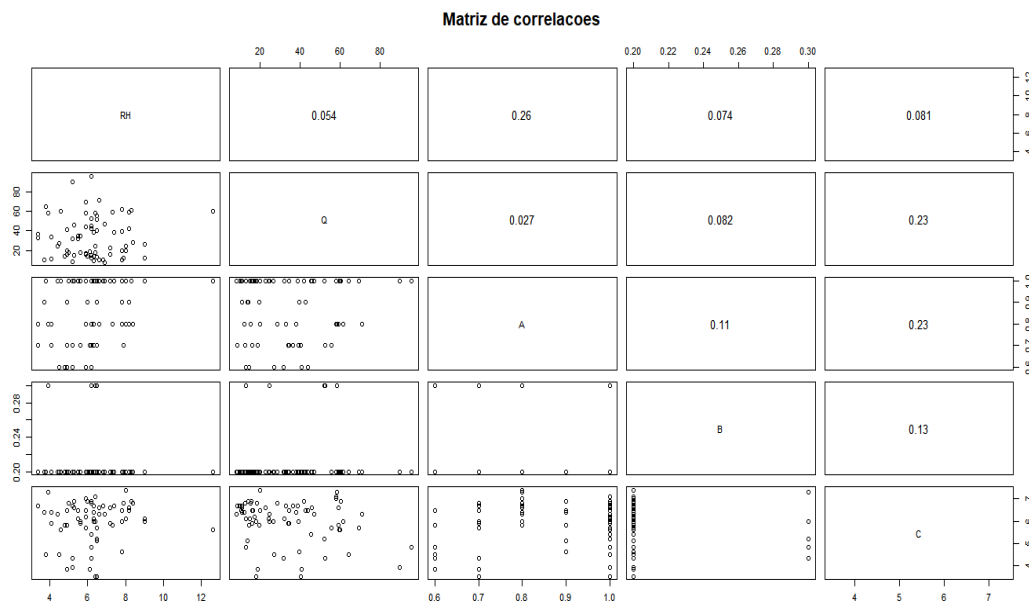


Figura 4: Resultados obtidos pela matriz de correlações.

Tabela 3: Matriz de Variâncias e Covariâncias.

	RH	Q	A	B	C
RH	2,3705	1,7283	0,0576	-0,0029	0,1177
Q	1,7283	430,2447	0,0789	0,0436	-4,4954
A	0,0576	0,0789	-0,0203	-0,0004	0,0308
B	-0,0029	0,0436	-0,0004	0,0007	-0,0033
C	0,1177	-4,4954	0,0308	-0,0033	0,8978

Após a partição do banco de dados em uma amostra para elaboração dos modelos (treino) e outra para validação externa do modelo proposto (teste), 53 realces foram alocados na primeira amostra citada, com os 18 realces restantes compondo a amostra de teste. Para a amostra de teste sorteada, 12 realces são classificados como estáveis e 6 realces são tidos como instáveis segundo os critérios estabelecidos.

3.2 Análise Discriminante

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para a validação externa do modelo criado a partir da aplicação da técnica de Análise Discriminante. A probabilidade global de acerto (POS) foi de 61,1%, enquanto a taxa de erro aparente global foi de 38,9%. Com relação aos tipos de erros encontrados, uma taxa de 27,8% correspondeu à classificação como estável de realces instáveis, sendo os demais 11,1% correspondentes à classificação como instável de realces estáveis.

Ainda que ambos os tipos de erros possam apresentar adversidades envolvendo a economia do empreendimento mineiro, além das questões financeiras, os erros Tipo 1 podem levar a sérios problemas de segurança para os trabalhadores e para a estrutura da mina, sendo considerados casos mais graves. Dessa forma, como grande parte dos erros detectados nesse modelo se concentram nessa categoria, pode-se entender que se trata de um modelo pouco conservador.

Tabela 4: Matriz de Confusão para o modelo gerado a partir de Análise Discriminante

		Predição		
		Estável	Instável	Total
Real	Estável	10	2	12
	Instável	5	1	6
	Total	15	3	



3.3 Interpretação dos Resultados

A aplicação da técnica de Análise Discriminante para predição da condição de estabilidade de realces da mina em questão, utilizando os parâmetros raio hidráulico, Q' , A, B e C, apresentou resultados que inspiram cuidados, uma vez que a probabilidade global de acerto não se mostrou muito elevada. Esse resultado pode ser decorrente da elevada proporção de realces do grupo Estável na amostra avaliada, levando a um enviesamento do modelo de predição. Outra possibilidade é que os parâmetros avaliados não sejam suficientes para uma adequada predição da condição de estabilidade dos realces, levando à discussão da necessidade de se estudar e propor sistemas de avaliação de realces aplicáveis ao ambiente geomecânico subterrâneo brasileiro.

Dessa forma, é necessário que seja feita uma investigação mais detalhada dessas condições, visando obter modelos mais precisos e confiáveis. Avaliar essas possibilidades seria interessante, uma vez que as variáveis em questão vêm sendo utilizadas para esse tipo de tomada de decisão, através dos métodos do gráfico de estabilidade.

4 Conclusão

Com relação aos dados utilizados, observou-se significativas diferenças na ordem de grandeza entre a variável Q' e as demais, além de pequena variabilidade nos valores dos parâmetros A e B. Embora haja a presença de alguns outliers entre os parâmetros avaliados neste trabalho, as suas existências podem ser consideradas aceitáveis dentro da variabilidade geológica muitas vezes observada em campo. Ainda em relação às análises preliminares do banco de dados, as correlações observadas entre as variáveis não se mostraram significativas.

A partir da aplicação da técnica de Análise Discriminante foi possível observar resultados consideráveis. Para o modelo gerado a taxa global de acerto na amostra de teste foi equivalente a 61,1%, com a taxa de erro aparente global assumindo o valor de 38,9%. O fato de a taxa global de acerto não ter se mostrado tão elevada pode ser um indicativo de enviesamento do modelo, devido ao desbalanceamento do banco de dados em relação à quantidade de realces estáveis e instáveis. Outra possibilidade é a de que, para o banco de dados avaliado, as variáveis utilizadas podem não ser suficientes para fornecer respostas que se espera para a predição da estabilidade de realces. De todo modo, investigações futuras se mostram necessárias visando obter modelos mais precisos e confiáveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e ao Departamento de Engenharia de Minas da UFOP (DEMIN-UFOP) pelo apoio e incentivo ao desenvolvimento deste trabalho, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Centro Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo fomento à pesquisa brasileira, e ao CIDENG/CNPq – Grupo de Pesquisa em Ciência de Dados Aplicada à Engenharia, do qual os autores fazem parte, pelo apoio e constante diálogo no desenvolvimento de novas pesquisas na área de ciência de dados aplicada à engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atlas Copco. (2007) *Mining methods in underground mine*. 2.ed. Atlas Copco Rock Drills AB. Örebro, Suécia.
- Bakhtavar, E.; Shahriar, K.; Oraee, K. (2008) *An Approach Towards Ascertaining Open-Pit to Underground Transition Depth*. Journal of Applied Sciences, 8: 4445-4449.
- Braga, A.P.; Carvalho, A.P.L.F.; Ludermir, T.B. (2000) *Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações*. 1 ed. LTC, Rio de Janeiro, RJ.
- Câmara, T. R. (2020) *Diluição operacional em lavra a céu aberto: quantificação, controle e minimização utilizando ferramentas computacionais e incertezas geológicas*. Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 52p.
- Charbel, P.A. (2015) *Gerenciamento de risco aplicado à diluição de minério*. Tese de doutorado. Doutorado em Geotecnia, Universidade de Brasília.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
 23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

- Costa, L. C. B. (2017) *Metodologia para prever e reduzir o risco de diluição não planejada em lavras estreitas pelo método sublevel stoping. Estudo de caso: mina Córrego do Sítio, Santa Bárbara/MG*. Dissertação de mestrado. Mestrado Profissional em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Hair, J.F.; Black, B.; Babin, B.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L. (2009) *Análise multivariada de dados*. 6 ed. Bookman Companhia Editora Ltda. Porto Alegre, RS.
- Pakalnis, R. T.; Hughes, P. B. (2011) *Sublevel Stoping*. In: *SME Mining Engineering Handbook*. Capítulo. 3 ed, SME.
- Santos, A.E.M.; Amaral, T.K.M.; Mendonça, G.A.; Silva, D.F.S. (2020) *Open stope stability assessment through artificial intelligence*. Artigo. REM, Int. Eng. J., Ouro Preto, 73(3), 395-401, jul. sep. 2020.
- Santos, T.B. (2019) *Análise de risco geotécnico em taludes rochosos de mina com uso de técnicas estatísticas multivariadas e de aprendizado de máquina*. Tese de doutorado. Doutorado em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Villaescusa, E. (2014) *Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping*. CRC Press. Boca Raton, Flórida, EUA.
- Wang, J. (2004) *Influence of stress, undercutting, blasting and time on open stope stability and dilution*. Tese de doutorado. University of Saskatchewan.