

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 regressão linear múltipla para estimativa dos coeficientes de regressão dos parâmetros do método *Q-slope*

Augusto do Carmo Sousa Davin

Engenheiro, PPGEM, Ouro Preto, Brasil, augusto.davin@aluno.ufop.br

Diego Max Silva Lopes

Tecnologista Pleno, CNEN, Caetité, Brasil, diego.lopes@cnen.gov.br

Tatiana Barreto dos Santos

Professora Dra. Adjunta, PPGEM, Ouro Preto, Brasil, tatiana.santos@ufop.edu.br

RESUMO: Dentre as várias metodologias desenvolvidas para classificação geomecânica de maciços rochosos, Barton e Bar (2015) propuseram uma aplicação do Sistema Q para avaliação das condições de estabilidade de taludes de mina, denominado de *Q-slope*. O *Q-slope* é calculado a partir dos mesmos parâmetros do Sistema Q (*RQD*, J_n , J_r , J_a , J_w e *SRF*), porém com algumas modificações. Esta pesquisa objetivou analisar e compreender a relevância dos parâmetros do *Q-slope* através da aplicação de técnicas estatísticas de regressão linear múltipla. O estudo foi realizado a partir de um banco de dados com 699 pontos mapeados, totalizando 1751 observações e descrições de parâmetros geomecânicos, sendo analisados 21 cenários de instabilidades em 18 taludes de 10 a 90 metros de altura. As análises estatísticas foram divididas em dois cenários: (i) no primeiro cenário foram consideradas quatro variáveis independentes: $\frac{RQD}{J_n}$, $\frac{J_r}{J_a}$, $\frac{J_{wice}}{SRF_{a,b,c}}$, Fator-O; e (ii) no segundo cenário considerou-se seis parâmetros envolvidos no cálculo do *Q-slope* como sendo as variáveis independentes (*RQD*, J_n , J_r , J_a , *SRF*, Fator-O). A partir destas análises foi obtida duas equações para a estimativa do ângulo seguro de inclinação dos taludes, além de identificar os parâmetros estatisticamente mais significativos para o banco de dados estudado.

PALAVRAS-CHAVE: Maciço rochoso, Estabilidade de taludes de cava, *Q-slope*, regressão linear multivariada de dados.

ABSTRACT: Among the various methodologies developed for geomechanical classification of rock masses, Barton and Bar (2015) proposed an application of the Q System to assess the stability conditions of mine slopes, called *Q-slope*. The *Q-slope* is calculated from the same Q-System parameters (*RQD*, J_n , J_r , J_a , J_w e *SRF*), but with some modifications. This research aimed to analyze and understand the relevance of the *Q-slope* parameters through the application of multiple linear regression statistical techniques. The study was carried out from a database with 699 mapped points, totaling 1751 observations and descriptions of geomechanical parameters, with 21 instability scenarios being analyzed on 18 slopes from 10 to 90 meters high. The statistical analyzes were divided into two scenarios: (i) in the first scenario, four independent variables were considered: $\frac{RQD}{J_n}$, $\frac{J_r}{J_a}$, $\frac{J_{wice}}{SRF_{a,b,c}}$, Fator-O; e (ii) in the second scenario, six parameters involved in the *Q-slope* calculation were considered to be the independent variables (*RQD*, J_n , J_r , J_a , *SRF*, O-Factor). From these analyses, two equations were obtained to estimate the safe slope angle of slopes, in addition to identifying the most statistically significant parameters for the database studied.

KEYWORDS: Palavras chaves em inglês seguindo as mesmas regras da versão em português

1 Introdução

Desenvolver projetos de engenharia em maciços rochosos requer conhecimento profundo das propriedades e dos parâmetros do maciço rochoso. Dentre as ferramentas utilizadas para caracterizar os maciços rochosos, tanto qualitativa quanto quantitativamente, estão os métodos empíricos de classificação geomecânica de maciços rochosos. Estes métodos vêm sendo desenvolvidos há mais de 140 anos desde que



Ritter (1879) estudou uma abordagem empírica para projetos de túneis, em particular, para determinar os requisitos de suporte.

Atualmente existem diversas classificações geomecânicas de maciços rochosos que consideram diferentes conjuntos de parâmetros. Em suma, as classificações buscam levar em consideração as características mecânicas das descontinuidades, da matriz rochosa, das dimensões da obra de engenharia, do esquema construtivo, do estado de tensões in situ, hidrogeologia, dentre outros. Dentre as várias classificações existentes, as duas classificações mais utilizadas em projetos de mineração são: Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski (1989) e o Rock Tunnelling Quality Index (Sistema Q) de Barton et al. (1974, 2014). Em geral, estas duas classificações têm sido utilizadas ao longo do tempo como ponto de partida para o desenvolvimento de outras classificações de maciços rochosos para diversas aplicações especializadas na engenharia, tais como: o Mining Rock Mass Rating (Laubscher e Taylor, 1976; Laubscher, 1977, 1984; Laubscher e Page, 1990); o Rock Structure Rating (Wickham et al., 1972); o Slope Mass Rating (Romana et al., 2003); o Rock Mass index (Palmstrom, 1982, 1996); e o *Q-slope* (Barton e Bar, 2015).

Neste contexto, Barton e Bar (2015) propuseram uma aplicação do Sistema Q para avaliação das análises de estabilidade de taludes rochosos, denominado de *Q-slope*. O método *Q-slope* foi desenvolvido a partir de estudos de casos em seis países, abrangendo 17 tipos de litologias (rochas ígneas, sedimentares e metamórficas) com taludes variando entre 5 e 30 metros de altura (Bar et al, 2016).

O método *Q-slope* é calculado a partir dos mesmos parâmetros do Sistema Q (RQD, J_n, J_r, J_a, J_w e SRF), porém com algumas modificações. Desta forma, compreender a relevância destes parâmetros, bem como estudar a influência dos mesmos na condição de estabilidade do talude pode ser uma informação relevante no momento de tomadas de decisões. Neste sentido, a aplicação de métodos que envolvem estatísticas multivariadas pode ser uma opção para ajudar na compreensão da influência de cada um desses parâmetros na avaliação das condições de estabilidade de taludes.

Existem diversas técnicas estatísticas que auxiliam no estudo da dependência e independência das variáveis envolvidas no modelo. A regressão linear múltipla é uma destas técnicas que investiga e modela a relação entre variáveis. Esta técnica se baseia num modelo matemático capaz de descrever o comportamento de uma variável resposta (dependente) com base nos valores de outras variáveis explicativas (independentes).

No presente trabalho, objetivou-se estudar a partir da técnica de regressão linear múltipla o relacionamento entre os parâmetros do método *Q-slope* através da análise de dois cenários: i) no primeiro cenário foram consideradas quatro variáveis independentes: $\frac{RQD}{J_n}$, $\frac{J_r}{J_a}$, $\frac{J_{wice}}{SRF_{a,b,c}}$, Fator-O; e (ii) no segundo cenário considerou-se seis parâmetros envolvidos no cálculo do *Q-slope* como sendo as variáveis independentes (RQD, J_n, J_r, J_a, SRF, Fator-O). A partir destas análises foi obtida duas equações para a estimativa do ângulo seguro de inclinação dos taludes, além de identificar os parâmetros estatisticamente mais significativos para o banco de dados estudado.

2 Metodologia

2.1 Método *Q-slope*

Segundo Barton e Bar (2015), o método *Q-slope* foi desenvolvido de modo a permitir que engenheiros e geólogos avaliem as condições de estabilidade de taludes rochosos em menor espaço de tempo, possibilitando a realização de ajustes dos ângulos de inclinação dos taludes em campo, uma vez que as operações de escavações tendem a ser mais dinâmicas do que o tempo despendido em análises cinemáticas, equilíbrio-limite e/ou modelagem numérica.

O valor do *Q-slope* é calculado considerando os mesmos seis parâmetros do Sistema Q: RQD (Rock Quality Designation); J_n (número de descontinuidades); J_r (índice de rugosidade); J_a (índice de alteração); J_{wice} (índice das condições ambientais e geológicas); e o SRF_{a,b,c} (fator de redução de tensões para taludes).



Apesar destes parâmetros terem sido importados do Sistema Q, os parâmetros J_{wice} e $SRF_{a,b,c}$ sofreram modificações. A equação do Q -slope é dada por:

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right)_n \times \frac{J_{wice}}{SRF_{a,b,c}} \quad (1)$$

O valor do Q -slope por si só não classifica o talude rochoso quanto a sua condição de estabilidade. Desta forma, Bar e Barton (2017) utilizaram a correlação entre os resultados do Q -slope e o comportamento observado em mais de 450 casos de taludes estáveis, quase-estáveis e instáveis para deduzirem a equação 2:

$$\beta = 20 \log_{10} Q_{slope} + 65^\circ \quad (2)$$

Na equação acima, β significa o ângulo que determinado talude apresenta 1% de probabilidade de ruptura. Para os autores, isso seria suficiente para classificar o talude como sendo estável, ou seja, estes não apresentariam sinais observáveis de instabilidade por razoável período de tempo. Se um talude apresenta um ângulo maior que β indica que este talude pode ser quase-estável ou instável. Para Barton e Bar (2015), dizer que um talude está em condição quase-estável é dizer que este talude pode apresentar sinais visíveis de instabilidade, tais como fraturas, feições de deslocamento, dentre outros. Assim, para se obter o as condições de estabilidade de determinado talude a partir do Q -slope é necessário plotar o resultado da equação 1 no gráfico de estabilidade proposto pelos autores (Figura 1).

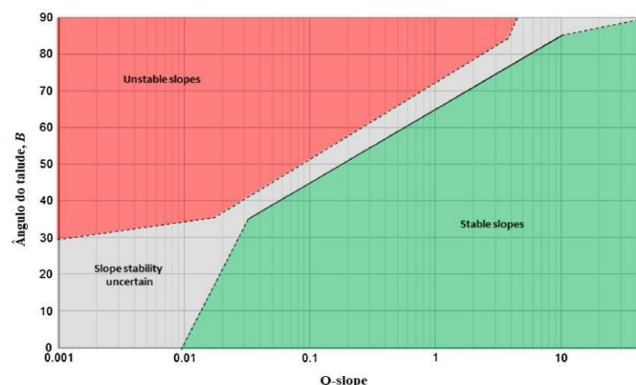


Figura 1 - Gráfico de estabilidade de taludes rochosos usando o método Q -slope (Barton e Bar, 2015).

2.2 Regressão linear múltipla

Segundo Cruz et al (2013), a técnica de regressão linear múltipla é um modelo estatístico referente ao tratamento de séries de dados, advindo da regressão linear. Na análise desta técnica tem-se o interesse em avaliar a relação de uma variável dependente (ou resposta) y em relação a k variáveis independentes x_i . Assim, a regressão linear múltipla pode ser representada pela seguinte equação:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

Onde, n é o número de indivíduos, y_i é a observação da variável dependente para o i -ésimo indivíduo, $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{ik})$ é um vetor das variáveis independentes para o i -ésimo indivíduo, $\beta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k)$ é um vetor de coeficientes de regressão (parâmetros) e, por fim, ε_i é um componente de erro aleatório, ou resíduo. Assume-se que esses erros são independentes e seguem distribuição normal com média zero e variância desconhecida σ^2 .

3 Análises e resultados

O estudo foi realizado em uma mina localizada no município de Conselheiro Lafaiete/MG – Brasil. A mina apresenta rochas cristalinas e sequências vulcano-sedimentares do tipo *greenstone belt* de idade arqueana.



Os parâmetros geomecânicos analisados neste estudo fazem parte de um banco de dados com 699 pontos mapeados. Estes parâmetros geomecânicos foram previamente tratados com o objetivo de eliminar os dados incompletos e/ou inconsistentes.

Para a aplicação do método *Q-slope* e da técnica de regressão linear múltipla, foram analisados 21 cenários de potenciais instabilidades em 18 taludes de 10 a 90 metros de altura. Os cenários de potenciais instabilidades foram baseados nos resultados de análises cinemáticas realizadas no programa *Dips* (Rocscience).

A Tabela 1 mostra os valores utilizados para dos parâmetros do *Q-slope*, o valor calculado do *Q-slope* e do β (ângulo de inclinação do talude). Informações sobre litologia, altura, inclinação do talude e modo de ruptura (baseado nas análises cinemáticas) também são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados dos parâmetros e informações dos 21 cenários estudados.

Nº caso	Litologia*	Altura (m)	Ângulo do talude (°)	Parâmetros do <i>Q-slope</i>								Condição de estabilidade (gráfico <i>Q-slope</i>)	Análise cinemática – <i>DIPS</i> (modo ruptura)
				RQD	J_n	J_r	J_a	Fator -O	J_{wice}	SRF_c	Valor <i>Q-slope</i> **	β (°)***	
1	XQB	90	39	89	9	2,00	2,00	0,75	0,5	2	1,9	70,4	Estável
2	XQB	90	39	89	9	2,00	4,00	0,68	0,5	2	0,8	63,4	Estável
3	XQB	30	68	95	15	4,00	6,00	0,68	0,5	2	0,7	62,1	Instável
4	XQB	20	68	75	9	4,00	8,00	1,00	0,5	2	1,0	65,4	Instável
5	XQB	70	38	91	9	2,00	2,00	1,00	0,5	2	2,5	73,1	Estável
6	IGD	10	61	92	12	2,00	4,00	0,56	0,5	2	0,5	59,6	Instável
7	XQB	16	61	85	9	2,00	2,00	0,25	0,5	8	0,1	48,4	Instável
8	XQB	16	61	88	9	6,00	4,00	0,06	0,5	8	0,1	40,2	Instável
9	XQB	16	61	88	9	2,00	4,00	0,06	0,5	8	0,0	30,6	Instável
10	XQB	24	61	94	9	4,00	4,00	0,56	0,5	2	1,5	68,3	Estável
11	XQB	40	39	94	9	3,00	4,00	1,00	0,5	2	2,0	70,8	Estável
12	XQB	11	59	95	9	4,00	6,00	1,00	0,5	2	1,8	69,9	Estável
13	IGT	10	59	95	6	3,00	8,00	3,00	0,5	2	4,5	78,0	Estável
14	XQB	50	33	90	4	4,00	4,00	3,00	0,5	2	16,9	89,5	Estável
15	XQB/MS	10	61	90	6	2,25	2,00	0,56	0,5	4	1,2	66,5	Estável
16	XQB	30	61	90	4	4,00	6,00	3,00	0,5	2	11,3	86,0	Estável
17	XQB/MS	50	38	93	9	3,00	1,00	1,00	0,5	2	7,8	82,8	Estável
18	IGT/QXB	10	61	93	6	2,25	1,00	3,00	0,5	2	26,2	93,4	Estável
19	XQB/MS	30	61	94	9	4,00	0,75	0,68	0,5	2	9,4	84,5	Estável
20	XQB/MS	10	62	94	6	6,00	1,00	1,00	0,5	2	23,5	92,4	Estável
21	XQB/MS	20	62	92	4	4,00	1,50	1,00	0,5	2	15,3	88,7	Estável

* Litologias: XQB (Quartzo-Biotita-Xisto-Compacto); IGD (Granodiorito Compacto); IGT (Granitóide Compacto) e MS (Minério sílico-carbonático). ** Valor *Q-slope* calculado através da eq.1. *** Ângulo β calculado através da eq. 2.

3.1 Análise estatística por regressão linear múltipla

Primeiro cenário: 4 variáveis dependentes

Neste primeiro cenário, foram selecionadas como variáveis dependentes as três razões da equação 2 e o Fator-O. Esta seleção de variáveis se deve ao fato do significado físico que estas razões desempenham no método *Q-slope*. A Tabela 2 fornece as medidas descritivas das quatro variáveis dependentes.

Tabela 2 - Medidas descritivas das variáveis analisadas no 1º cenário.

Medidas descritivas	Variáveis			
	RQD/ J_n	J_r / J_a	Fator-O	J_{wice} / SRF_c
Média	12,54	1,53	1,14	0,22
Mediana	10,44	1,00	1,00	0,25
Mínimo	6,33	0,38	0,06	0,06
Máximo	23,00	6,00	3,00	0,25

A Figura 2 apresenta o gráfico *boxplot* para as variáveis em estudo e na Figura 3 constata-se a presença de um *outlier* pela distância de Mahalanobis. Este *outlier* foi removido da análise.

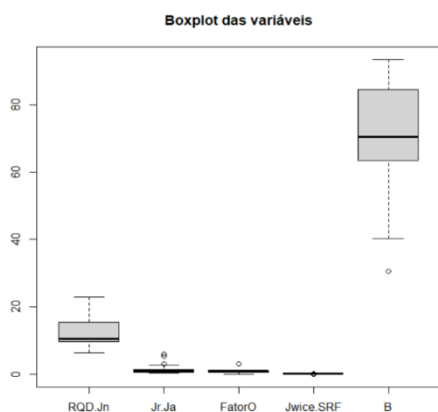


Figura 2 - Gráfico boxplot das variáveis.

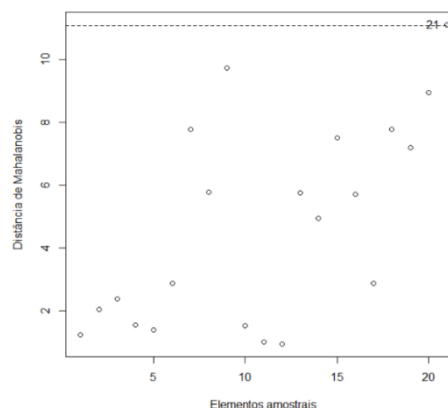


Figura 3 - Representação do valor outlier pela distância de Mahalanobis.

A Tabela 3 apresenta as estimativas dos coeficientes de correlação do modelo, bem como os valores do erro padrão e do valor-p.

Tabela 3 - Estimativas dos coeficientes de correlação.

Parâmetros	Estimativa	Erro Padrão	Valor p
β_0	20,45	6,11	<0,05
$\beta_1 = \text{RQD} / J_n$	0,92	0,48	>0,05
$\beta_2 = J_r / J_a$	4,13	0,75	<0,05
$\beta_3 = \text{Fator-O}$	4,55	2,41	>0,05
$\beta_4 = J_{\text{wice}} / \text{SRF}_c$	124,07	19,72	<0,05

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, verifica-se que as estimativas dos parâmetros β_0 , β_2 , β_4 foram estaticamente significativas ($p < 0,05$). O coeficiente de determinação ajustado (R^2) calculado foi de 0,9224, ou seja, 92,24% da variação no ângulo de inclinação do talude (β) pode ser explicada pela variação dos parâmetros β_0 , β_2 , β_4 .

A Figura 4 mostra os gráficos de diagnóstico para o primeiro cenário analisado, sendo que por análise gráfica não é possível observar padrões de tendência na distribuição, que por sua vez comprova a homocedasticidade dos resíduos. Além disso, pelo histograma, apresentado na Figura 5, é possível observar a aparência de uma curva normal, comprovando a normalidade dos resíduos.

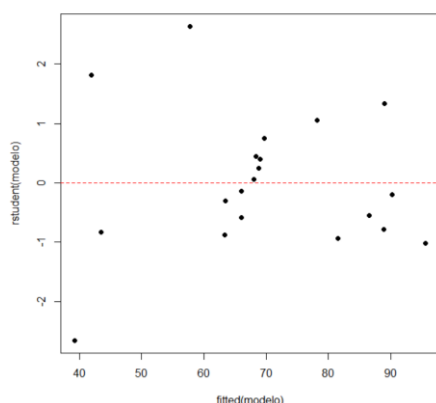


Figura 4 – Gráfico diagnóstico de possíveis padrões de tendência.

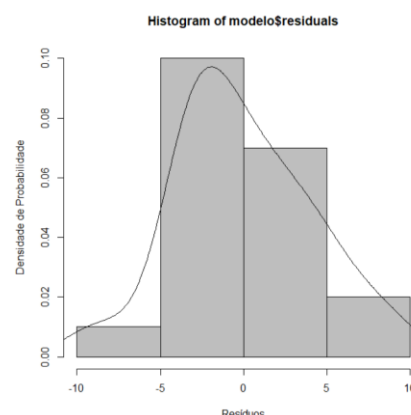


Figura 5 – Histograma para observação de normalidade.

Segundo cenário: 6 variáveis dependentes



No segundo cenário, foram selecionadas como variáveis dependentes os parâmetros que envolvem o cálculo do *Q-slope* separadamente. Optou-se por não utilizar J_{wice} , tendo em vista que o valor deste parâmetro foi considerado o mesmo para todos os taludes. Analogamente ao realizado no primeiro cenário, a Tabela 4 fornece as medidas descritivas das variáveis.

Tabela 4 - Medidas descritivas das variáveis.

Medidas descritivas	Variáveis					
	RQD	J_n	J_r	J_a	Fator-O	SRF _c
Média	90,76	8,143	3,31	3,583	1,135	2,952
Mediana	92	9	3	4	1	2
Mínimo	75	4	2	0,75	0,06	2
Máximo	95	15	6	8	3	8

A Figura 6 apresentada o gráfico *boxplot* e verifica-se na Figura 7 a presença de um *outlier*. Este *outlier* foi removido da análise proposta.

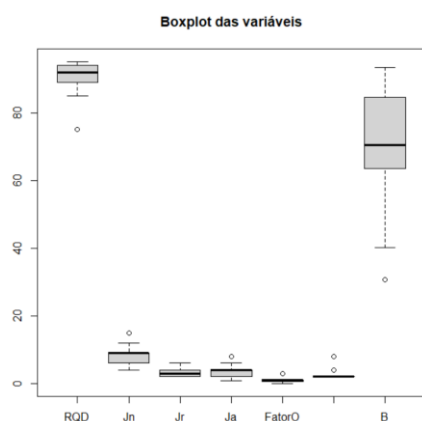


Figura 6 - Gráfico *boxplot* das variáveis.

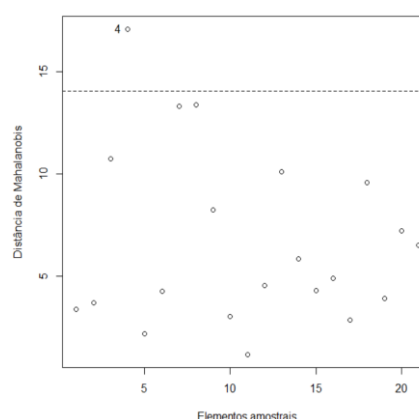


Figura 7 - Representação do valor *outlier* pela distância de Mahalanobis.

A Tabela 5 apresenta as estimativas dos parâmetros estudados no segundo cenário. Nota-se que os parâmetros β_2 , β_3 , β_4 , β_5 e β_6 foram estatisticamente significativas ($p < 0,05$) e que os parâmetros β_0 , β_1 e β_2 não foram estatisticamente significativas. O coeficiente de determinação ajustado (R^2) calculado foi de 0,9623, ou seja, 96,23% da variação no ângulo de inclinação do talude (β) pode ser explicada pela variação dos parâmetros β_2 , β_3 , β_4 , β_5 e β_6 .

Tabela 5 - Estimativas dos parâmetros.

Parâmetros	Estimativa	Erro Padrão	Valor p
β_0	37,10	42,59	>0,05
$\beta_1 = RQD$	0,55	0,48	>0,05
$\beta_2 = J_n$	-1,05	0,46	<0,05
$\beta_3 = J_r$	2,36	0,73	<0,05
$\beta_4 = J_a$	-3,32	0,46	<0,05
$\beta_5 = \text{Fator-O}$	6,99	1,36	<0,05
$\beta_6 = SRF_c$	-4,17	0,60	<0,05

Conforme visto na Figura 8, não é possível observar padrões de tendência na distribuição, que por sua vez comprova a homocedasticidade dos resíduos. Contudo, analisando o histograma (Figura 9) é perceptível uma certa assimetria dos dados. Sendo assim não fica clara a aparência de uma curva normal, o que por sua vez pode ser um obstáculo para comprovar a normalidade dos resíduos.

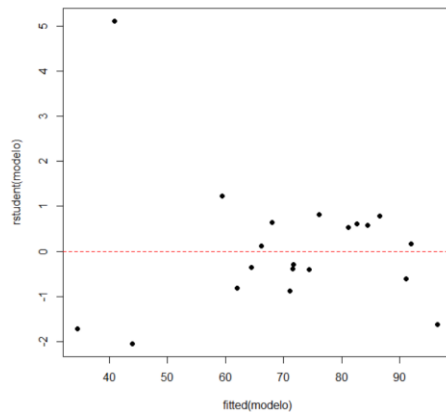


Figura 8 – Gráfico diagnóstico de possíveis padrões de tendência.

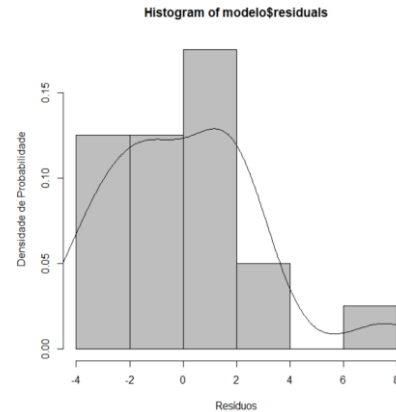


Figura 9 – Histograma para observação de normalidade.

Modelos estatísticos encontrados para os dois cenários propostos

Após aplicação da técnica da regressão linear múltipla nos dois cenários propostos, obteve-se as equações dos modelos para cada um dos cenários. A equação 4 apresenta o resultado das análises estatísticas realizadas para o cenário com 4 variáveis dependentes (primeiro cenário):

$$y = 20,45 + 4,13\left(\frac{J_r}{J_a}\right) + 124,07\left(\frac{J_{wice}}{SRF_c}\right) \quad (4)$$

A equação 5 apresenta o resultado obtido a partir das análises estatísticas realizadas para o cenário considerando 6 variáveis dependentes (segundo cenário).

$$y = -1,05(J_n) + 2,36(J_r) - 3,32(J_a) + 6,99(FatorO) - 4,17(SRF_c) \quad (5)$$

4 Conclusões

O método *Q-slope*, proposto por Barton e Bar (2015), tem mostrado resultados interessantes quando utilizado como uma ferramenta adicional nos estudos de estabilidade de taludes rochosos. De acordo com os autores, o método *Q-slope* não tem o objetivo de substituir as análises mais rigorosas que são essenciais num projeto de estabilidade de taludes, mas serve como apoio para geólogos e engenheiros avaliarem de maneira mais rápida as condições de estabilidade dos taludes em campo. Neste estudo, os resultados obtidos com a aplicação do método *Q-slope* demonstraram coerência com as condições reais dos taludes na mina.

A aplicação da técnica de regressão múltipla nos dois cenários propostos apresentou resultados interessantes que podem auxiliar na avaliação das condições de estabilidade dos taludes na mina. Segundo os testes estatísticos realizados com base no banco de dados estudado, a aplicação da técnica de regressão múltipla no primeiro cenário demonstrou que as estimativas dos coeficientes de regressão das razões $\left(\frac{J_r}{J_a}\right)$ e $\left(\frac{J_{wice}}{SRF_c}\right)$ foram estatisticamente mais significativas no modelo. Já para o segundo cenário, as estimativas dos coeficientes de regressão dos parâmetros J_n , J_r , J_a , Fator-O e SRF_c foram estatisticamente mais significativas no modelo. Salientado que, para o segundo cenário, o histograma apresentou possível assimetria, não ficando clara a aparência de uma curva normal. Esta observação deve ser melhor estudada pois pode ser um obstáculo para comprovar a normalidade dos resíduos.

Por fim, ressalta-se que alcançar níveis satisfatórios de segurança em análises de estabilidade de taludes rochosos requer a aplicação de estudos de investigação de campo e avaliações técnicas adequadas. Nenhum método de avaliação de estabilidade de taludes é único e completamente satisfatório, principalmente para



minas de profundidades significativas. Sendo assim, a utilização dos diversos métodos e análises existentes devem ser realizados de maneira minuciosa e cuidadosa, e de forma complementar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bar, N. e Barton, N. (2017). The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering. *Rock Mechanics & Rock Engineering* 50(12): 3307–3322.
- Barton, N. & Bar, N. (2015). Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects. *Proc. Eurock 2015 & 64th Geomechanics Colloquium, Salzburg, 7–10 October 2015, Austrian Society for Geomechanics*, 157–162.
- Barton, N.R., Lien, R. & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*. Volume 6, pp. 189-236. Springer-Verlag.
- Barton, N.R., & Grimstad, E. (2014). An illustrated guide to the Q-system following 40 years use in tunnelling. In-house publisher: Oslo. Retrieved March 12, 2015 from www.nickbarton.com.
- Bieniawski ZT (1989). *Engineering rock mass classifications*. Wiley, New York, p 251.
- Cruz, M. A. S., Souza, L. A., Aragão, R., Silva, R. R. S., Mota, P. V. M. (2013). Aplicação De Regressão Linear Múltipla Para Estimativa Da Precipitação Média Anual Considerando A Variabilidade Espacial No Estado De Sergipe. Bento Gonçalves, RS. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.
- Laubscher, D.H. (1977). Geomechanics classification of jointed rock masses - mining applications *Trans. Instn Min. Metall.* 86, A 1-8.
- Laubscher, D.H. (1984). Design aspects and effectiveness of support systems in different mining conditions, *Trans Instn Min. Metall.* 93, A 70 – A 82.
- Laubscher, D.H.; Taylor, H. W. (1976). The importance of geomechanics classification of jointed rock masses in mining operations, In *Exploration for rock engineering*, (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 119-128. Cape Town: Balkema.
- Laubscher, D.M.; Page, C. H. (1990). The design of rock support in high stress or weak rock environments. *Proc. 92nd Can. Inst. Min. Metall. AGM, Ottawa, Paper # 91*.
- Palmstrom, A. (1982). RMI – system for characterizing rock mass strength for use in rock engineering. Norwegian Geotechnical Institute, Norway, 40 p.
- Palmstrom, A. (1996). Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD). *Tunnels and Underground Space Technology*.
- Ritter W (1879). *Die statik der tunnelgewölbe*. Springer, Berlin.
- Romana M., Serón J.B., Montalar, E., 2003. SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation, in: Merwe, J.N. (Ed.), *Proceedings of the 10th Congress of the International Society for rock mechanics, ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 1-4.
- Wickham, G.E.; Tiedemann, H.R.; Skinner, E.H. (1972). Support determination based on geologic predictions, In *Proc. North American rapid excav. tunneling conf.*, Chicago, (eds K.S. Lane and L.A. Garfield), 43-64. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.