

APLICABILIDADE DO MÉTODO Q-SLOPE NA VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE UMA LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Caio Oliveira Rodrigues, Universidade Federal de Ouro Preto - caio.or@aluno.ufop.edu.br;

Larissa Regina Costa Silveira, Universidade Federal da Bahia;

Tatiana Barreto dos Santos, Universidade Federal de Ouro Preto;

Augusto do Carmo Sousa Davin, Universidade Federal de Ouro Preto.

RESUMO

As classificações geomecânicas são ferramentas conhecidas e utilizadas em todo o mundo. Elas compreendem desde metodologias que avaliam a qualidade de um maciço rochoso até aquelas que propõem preliminarmente algum critério de projeto, como sistemas de suporte e largura de vão livre de escavações. O método Q-Slope é baseado no já difundido Sistema-Q, porém com enfoque em estabilidade de taludes, enquanto o outro é apropriado para túneis. No presente trabalho o Q-Slope foi aplicado em taludes de uma lavra de quartzito para determinação das condições geotécnicas de estabilidade. Os resultados obtidos foram validados por meio de análises de estabilidade por equilíbrio limite. O método Q-Slope atingiu um índice de assertividade de 89%, mostrando-se uma ferramenta que forneceu resultados coerentes com as observações em campo e as análises de estabilidade.

Palavras-chave: Classificação geomecânica; Q-Slope; estabilidade de taludes rochosos; análise determinística.

ABSTRACT

Geomechanical classifications are very useful and known tools, widespread worldwide. They include methodologies for quality evaluation of rock masses, and some of them also propose criteria for excavation span design and support systems. Q-Slope method is based on the well-known Q-System, and it is focused in condition assessment of slope stability, whereas the other one is more appropriate to tunnels. In this article, Q-Slope was applied to rock slopes of a quartzite mine for determining their stability conditions. The obtained results were validated through equilibrium-limit stability analysis. Q-Slope method reached an assertiveness index of 89%, presenting itself as a tool that provides coherent results with the field observations and the stability analysis.

Keywords: Geomechanical classification; Q-Slope; rock slope stability; deterministic analysis.

INTRODUÇÃO

Dentre as várias classificações geomecânicas historicamente relevantes destacam-se o Rock Quality Designation (RQD), proposto por Deere *et al.* em 1964 [1], o Rock Mass Rating (RMR), desenvolvido por Bieniawski em 1973, que passou por diferentes revisões até sua versão final em 1989 [2] (com sugestões de modificação em seu uso pelo próprio autor em 2011 [3]) e o Rock Tunnel Quality, mais conhecido como Sistema-Q, proposto por Barton *et al.* em 1974 [4]. Tanto o RMR quanto o Sistema-Q utilizam valores de pesos atribuídos aos parâmetros do maciço rochoso e de suas descontinuidades, obtidos por meio de levantamentos geológico-geotécnicos, e consideram o valor do RQD em seus cálculos.

Apesar da popularidade dos Métodos de Equilíbrio Limite e dos Métodos Numéricos para avaliar a estabilidade de taludes métodos empíricos podem ser utilizados para prever de forma rápida e com parâmetros facilmente levantados em campo o comportamento ou determinar o melhor sistema de suporte e reforço de taludes escavados em rocha, como o SMR, proposto por Romana em 1985, modificado em 1995 [5], e o Global Slope Performance, proposto por Sullivan em 2013 [6]. Contudo, nenhum desses métodos fornece informações sobre ângulos apropriados de inclinação de taludes rochosos que sejam estáveis a longo prazo, especialmente naqueles taludes onde o reforço seja inexistente ou inviável. Além disso, um problema recorrente de projetos de engenharia geotécnica é a dificuldade de conferir a estabilidade de taludes rochosos durante sua execução em tempo real usando abordagens analíticas e numéricas, pois as operações ocorrem de forma muito rápida para que tais métodos sejam utilizados para esse fim [7][8].

A partir desta percepção Bar & Barton [7] desenvolveram o método Q-slope, utilizando mais de 400 estudos de casos ao redor de mundo em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, além de alguns saprolitos desses tipos de rocha. De acordo com os autores, a proposta do Q-slope é permitir que os engenheiros geotécnicos tenham acesso, em campo, às condições de estabilidade de taludes escavados em rocha, e possam fazer ajustes aos ângulos de inclinação assim que as condições geotécnicas do maciço rochoso vão se tornando visíveis durante o processo construtivo. Inicialmente, o método é aplicável para tomadas de decisão quanto a ângulos de bancada em minas a céu aberto, mas também pode ser empregado em obras de engenharia civil [7].

O presente trabalho tem por objetivo aplicar o método Q-slope em taludes de 9 frentes de lavra em uma mineração de rochas ornamentais para determinar suas condições de estabilidade. Por fim, os resultados obtidos foram validados por meio de análises de estabilidade por equilíbrio limite, utilizando os softwares da empresa RocScience.

METODOLOGIA

O método Q-Slope

O método Q-slope foi desenvolvido por Bar & Barton [7] a partir do Sistema-Q. O índice do Sistema-Q é calculado por meio de seis parâmetros, a saber: RQD, J_n (número de famílias), J_r (rugosidade das descontinuidades), J_a (grau de alteração das descontinuidades), J_w (presença de água) e SRF (estado de tensões do maciço). O primeiro parâmetro utiliza o valor em porcentagem obtido pelo cálculo do RQD, e os outros cinco utilizam a descrição

obtida no levantamento geológico-geotécnico para associar as características da rocha e suas des-continuidades à pesos tabelados. O valor do Sistema-Q é definido em escala logarítmica [4].

Para o método Q-Slope os autores mantiveram os seis parâmetros analisados no Sistema-Q. Contudo, os dois últimos foram adaptados para condições de escavações em rocha a céu aberto. O parâmetro J_w passou a ser denominado J_{wice} , e considera as condições geológicas e ambientais dos taludes de rocha. Essa adaptação se faz necessária visto que taludes ficam ao ar livre, e estão expostos a uma maior variedade de elementos e condições climáticas, quando comparados com escavações subterrâneas. Os autores ainda sugerem usar as condições mais hostis e dinâmicas as quais os taludes estão submetidos para determinação do valor de J_{wice} a ser utilizado. A Tabela 1 apresenta os critérios de avaliação das condições geológicas e ambientais para determinação do parâmetro J_{wice} [7].

Tabela 1: Condições geológicas e ambientais para determinação de J_{wice} .

J_{wice}	Ambiente desértico	Ambiente úmido	Ambiente de tempestades tropicais	Ambientes com presença de gelo
Estrutura estável, rocha competente	1,0	0,7	0,5	0,9
Estrutura estável, rocha incompetente	0,7	0,6	0,3	0,5
Estrutura instável, rocha competente	0,8	0,5	0,1	0,3
Estrutura instável, rocha incompetente	0,5	0,3	0,05	0,2

Outra mudança que o Q-Slope traz é ampliação da análise do parâmetro SRF, que passa a ser chamado SRF_{slope} . Para determinar o valor do SRF_{slope} a ser utilizado deve-se comparar as características obtidas no levantamento de campo às tabelas que descrevem as condições SRF_a , SRF_b e SRF_c . O SRF_a descreve as condições físicas da superfície do talude devido aos efeitos de desmonte e à suscetibilidade ao intemperismo e erosão; o SRF_b descreve faixas de tensão e resistência no talude; o SRF_c está relacionado à presença de outras descontinuidades importantes, como falhas e zonas de fraqueza e suas características. Cada uma das três condições terá um valor atribuído e o maior dentre eles será utilizado para o SRF_{slope} . A Tabela 2 apresenta os critérios utilizados para avaliação dos estados de tensões do maciço e determinação dos parâmetros SRF_a , SRF_b e SRF_c [7].

Tabela 2: Condições de estados de tensão para diferentes análises

SRF_a – CONDIÇÕES FÍSICAS	
Descrição	SRF _a
A Leve desprendimento devido à posição em superfície, perturbação decorrente de desmontes ou escavações	2,5
B Blocos soltos, sinais de fendas de tração e juntas de cisalhamento, suscetibilidade ao intemperismo, graves perturbações de desmonte	5
C Como B, mas com maior suscetibilidade ao intemperismo	10
D Talude em avançado estado de erosão e desprendimento decorrente de constante erosão resultante da ação de água ou gelo/neve,	15
E Talude residual com significativo transporte de material em queda	20
SRF_b – FAIXAS DE TENSÃO E RESISTÊNCIA	

Descrição	σ_c/σ_1^a	SRF _b
F Intervalo tensão-resistência moderado	50-200	2,5-1
G Intervalo tensão-resistência alto	10-50	5-2,5
H Falha localizada em rocha intacta	5-10	10-5
J Limite de tensão escoamento plástico ou de esmagamento	2,5-5	15-10
K Fluxo plástico de material deformado	1-2,5	20-15

^a σ_c = resistência a compressão simples / σ_1 = tensão máxima principal

SFR_c – Descontinuidade principal

SRF _c	Favorável	Desfavorável	Muito desfavorável	Causa falha se não suportado
L Descontinuidade principal com pouca ou nenhum argila	1	2	4	8
M Descontinuidade principal com RQD ₁₀₀ =0 ^b devido a argila e rocha muito fragmentada	2	4	8	16
N Descontinuidade principal com RQD ₃₀₀ =0 ^c devido a argila e rocha muito fragmentada	4	8	12	24

^b RQD₁₀₀ = 1 metro de amostra perpendicular da descontinuidade.

^c RQD₃₀₀ = 3 metros de amostra perpendicular da descontinuidade.

Após determinação dos parâmetros apresentados acima o valor do Q-Slope é obtido a partir da Equação (1).

$$Q\text{-Slope} = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_O \times \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (1)$$

Foi adicionado à relação $\frac{J_r}{J_a}$ o fator de orientação de descontinuidade, denominado fator O.

Esse fator é utilizado para promover ajustes na ponderação relativa à presença de descontinuidades nos taludes rochosos. A Tabela 3 apresenta os valores do fator O, que deve ser aplicado considerando a descontinuidade menos favorável (Família A), e para as duas menos favoráveis no caso de ruptura em cunha (Família B) [8].

Tabela 3: Fator de orientação de descontinuidade – Fator O

Descrição do fator O	Família A	Família B
Orientação muito favorável	2,0	1,5
Orientação favorável	1,0	1,0
Orientação desfavorável	0,75	0,9
Orientação muito desfavorável	0,50	0,8
Provoca falha na ausência de suporte	0,25	0,5

Para avaliar as condições de estabilidade de um talude rochoso a partir do método Q-Slope deve-se dispor de dois valores: o valor do Q-Slope (Equação 1) e o valor de β , sendo este o ângulo de inclinação do respectivo talude. Caso o talude já tenha sido escavado e o objetivo seja avaliar a sua estabilidade pelo método, o valor de β a ser utilizado será o ângulo de

inclinação do talude no momento da avaliação. Para os casos onde se deseja realizar uma retroanálise ou conhecer a maior inclinação possível para que o talude seja classificado como estável os autores propõem a Equação (2).

$$\beta = 20\log_{10}(Q\text{-slope}) + 65. \quad (2)$$

A equação deve ser utilizada considerando taludes sem reforços ou suportes, de qualquer altura. A Equação (2) foi construída a partir da análise de taludes estáveis sob essas condições entre o período de 6 meses a 50 anos. O valor de β na Equação (2) tem probabilidade de falha de 1% [7]. Uma vez obtidos os valores de Q-Slope e β , as condições de estabilidade de um talude são determinadas por meio do gráfico apresentado na Figura 1.

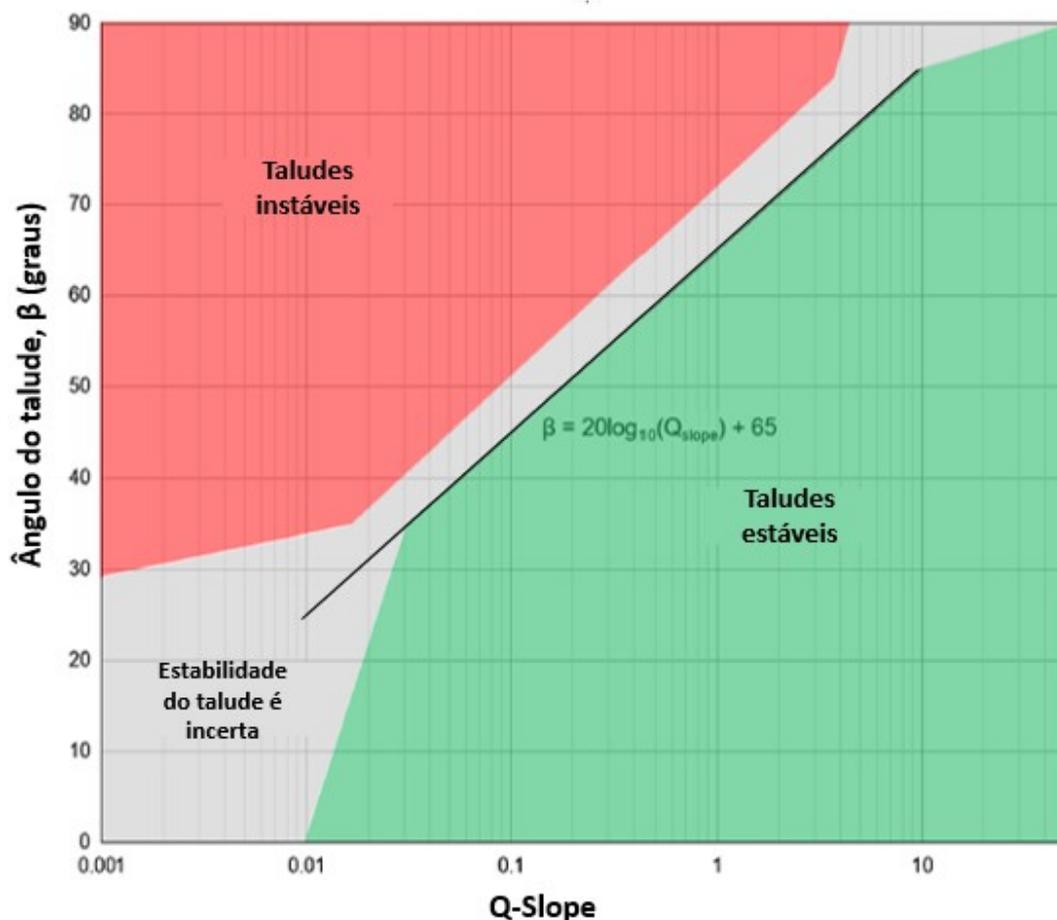


Figura 1: Gráfico de estabilidade do Q-slope.

Análises de estabilidade por Equilíbrio Limite

Foram utilizados 4 softwares da RocScience para execução de análises de estabilidade dos taludes em estudo. As análises realizadas possuem caráter determinístico, e todos os métodos de análise de estabilidade utilizados baseiam-se na teoria do equilíbrio limite, fundamentada na relação entre as forças resistentes, que atuam de forma a impedir a movimentação de massa de rocha, e as forças instabilizantes, que atuam promovendo a

movimentação da mesma massa de rocha [9][10]. O resultado final obtido é o Fator de Segurança (FS), apresentado na Equação (3).

$$FS = \frac{\text{forças resistivas}}{\text{forças instabilizantes}}. \quad (3)$$

A análise determinística é uma análise quantitativa que permite determinar se o talude em questão é ou não estável a partir da avaliação do conjunto de dados obtidos na observação de suas condições físicas, geométricas e resistivas, tomando como base para a condição de estabilidade um FS mínimo aceitável e maior que 1.

O critério de resistência adotado para obtenção das forças resistivas foi o critério de Barton & Bandis [11], proposto para determinação em campo da resistência ao cisalhamento de descontinuidades que apresentam rugosidade. O critério é definido pela Equação (4).

$$\tau = \sigma_n \tan [\Phi_r + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)]. \quad (4)$$

Nessa equação, JRC é o coeficiente de rugosidade das descontinuidades, JCS é a resistência à compressão uniaxial da parede da descontinuidade, σ_n é a tensão normal atuante na superfície da descontinuidade e Φ_r é o ângulo de atrito residual da superfície de deslizamento. Φ_r é calculado por meio da Equação (5).

$$\Phi_r = (\Phi_b + 20) + 20 \left(\frac{r}{R} \right). \quad (5)$$

Na Equação (5) Φ_b representa o ângulo de atrito básico na superfície da descontinuidade, r o valor de rebote do martelo de Schmidt sobre a superfície da descontinuidade com a rocha alterada e R o valor do rebote do martelo de Schmidt sobre uma superfície de rocha não alterada e seca [11]. Este critério foi escolhido por ser mais adequado para análise das descontinuidades do objeto de estudo e por seus parâmetros serem de obtenção mais acessível em levantamento de campo.

Os softwares utilizados para realização das análises determinísticas de estabilidade estão apresentados abaixo:

- Dips [12]: para análise cinemática de rupturas;
- RocPlane [13]: para análise de estabilidade para rupturas planares;
- Swedge [14]: para análise de estabilidade para rupturas em cunha;
- RocTopple [15]: para análise de estabilidade para rupturas por tombamento de blocos.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O objeto de estudo deste trabalho são os taludes de uma lavra de quartzitos para revestimento e ornamentação, localizada na cidade de São Thomé das Letras, no estado de Minas Gerais. Nove taludes foram analisados, correspondentes às relativas frentes de lavra

desse empreendimento. O maciço rochoso analisado possui foliação com espaçamento médio de 5 cm. Grande parte das frentes de lavra apresenta indícios de deslocamento e quedas de blocos geradas após as operações de desmonte. A descrição das características geológico-geotécnicas dos taludes está apresentada na Tabela 4. As características de rugosidade e de alteração referem-se à descontinuidade principal do maciço rochoso de cada frente de lavra analisada.

Tabela 4: Informações sobre os taludes da mina.

TALUDE (FRENTE DE LAVRA)	ALTURA (m)	ORIENTAÇÃO (MERGULHO/ DIREÇÃO DE MERGULHO)	RUGOSIDADE	ALTERAÇÃO
JP1 face 1	11,03	90/040	Rugosa e plana	Levemente alterado
JP1 face 2	16,78	75/138	Rugosa e plana	Levemente alterado
JP1 face 3	4,6	90/290	Rugosa e plana	Levemente alterado
JP1 face 4	8,83	90/007	Rugosa e plana	Levemente alterado
JP2 face 1	7,54	73/180	Lisa e plana	São
JP2 face 2	10	86/226	Lisa e plana	São
CJ	13,78	90/127	Rugosa e plana	Levemente alterado
PG face 1	7,25	90/118	Rugosa e plana	São
PG face 2	10,24	90/197	Lisa e plana	São

A Tabela 5 descreve as famílias de descontinuidades identificadas no levantamento geológico-geotécnico. As famílias de descontinuidades destacadas em negrito referem-se a descontinuidade principal. Todas as frentes de lavra apresentam trincas decorrentes dos desmontes.

Tabela 5: Descrição das descontinuidades das frentes de lavra

TALUDE	Nº DE FAMÍLIAS	FAMÍLIA 1		FAMÍLIA 2		FAMÍLIA 3	
		Orien- tação	Espaça- mento médio	Orien- tação	Espaça- mento médio	Orien- tação	Espaça- mento médio
JP1 face 1	3	08/265	0,05	64/120	0,5	76/065	0,9
JP1 face 2	3	08/265	0,05	64/120	0,5	76/065	0,9
JP1 face 3	3	08/265	0,05	64/120	0,5	76/065	0,9
JP1 face 4	3	08/265	0,05	64/120	0,5	76/065	0,9
JP2 face 1	1	11/240	0,05				
JP2 face 2	1	11/240	0,05				
CJ	3	14/228	0,05	80/190	0,25	85/304	0,515
PG face 1	2	10/268	0,05	72/141	0,5		
PG face 2	2	10/268	0,05	72/141	0,5		

Três frentes de lavra das nove estudadas nessa pesquisa são apresentadas na Figura 2.

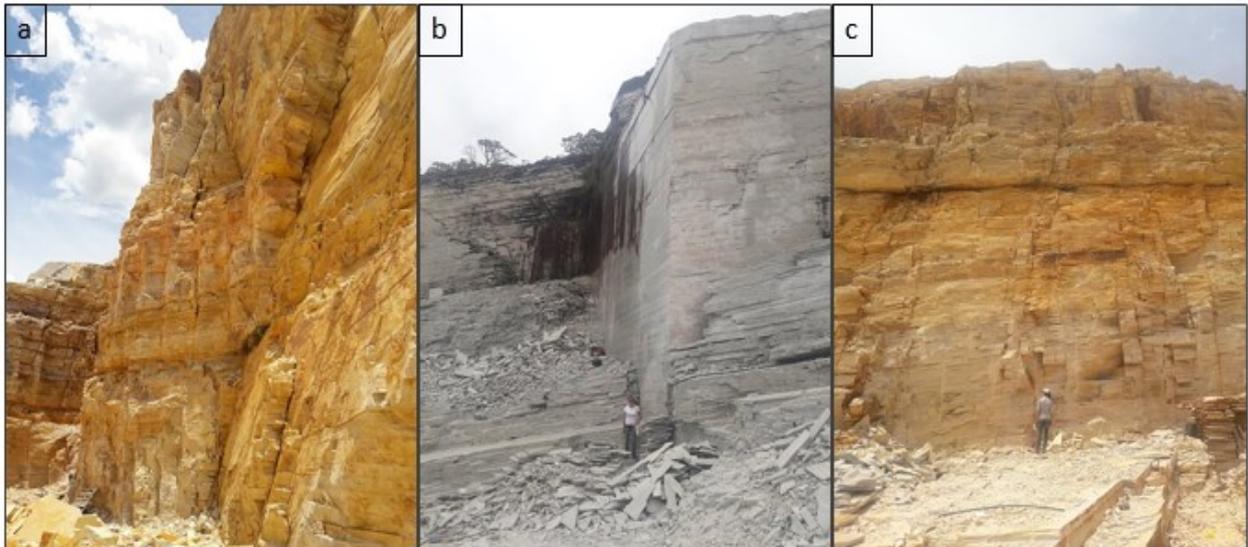


Figura 2: Taludes das frentes de lavra (a) JP1 face 2, (b) JP2 face 2 e (c) PG face 2.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicação do método Q-Slope

A partir das informações coletadas no levantamento geológico-geotécnico foram calculados os valores de Q-Slope para os nove taludes do estudo. Na ausência dos testemunhos de sondagem para o cálculo do RQD o método proposto por Palmström [16] foi utilizado. Para todos os taludes o fator SRF_a se mostrou mais relevante, sendo este utilizado nos cálculos. Os valores de Q-Slope dos taludes são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Valores de Q-Slope dos taludes analisados.

TALUDE	RQD	J _n	J _r	J _a	O	J _{wice}	SRF _a	SRF _b	SRF _c	Q-SLOPE
JP1 face 1	39	12	1,5	1	1	0,5	5	2,5	1	0,484
JP1 face 2	39	12	1,5	1	0,75	0,5	5	2,5	1	0,363
JP1 face 3	39	12	1,5	1	1	0,5	5	2,5	1	0,484
JP1 face 4	39	12	1,5	1	1	0,5	5	2,5	1	0,484
JP2 face 1	49	3	1	1	1	0,7	2,5	2,5	1	4,573
JP2 face 2	49	3	1	1	2	0,7	2,5	2,5	1	9,147
CJ	29	12	1,5	1	1	0,5	5	2,5	1	0,367
PG face 1	42	6	1,5	1	1	0,5	5	2,5	1	1,060
PG face 2	42	6	1	1	1	0,5	5	2,5	1	0,707

A partir do valor de Q-Slope calculado para cada frente de lavra, e sendo conhecido o ângulo de inclinação de cada talude, foi possível determinar as condições de estabilidade destes por meio do gráfico de estabilidade do método. A Figura 3 apresenta os pontos plotados neste gráfico.

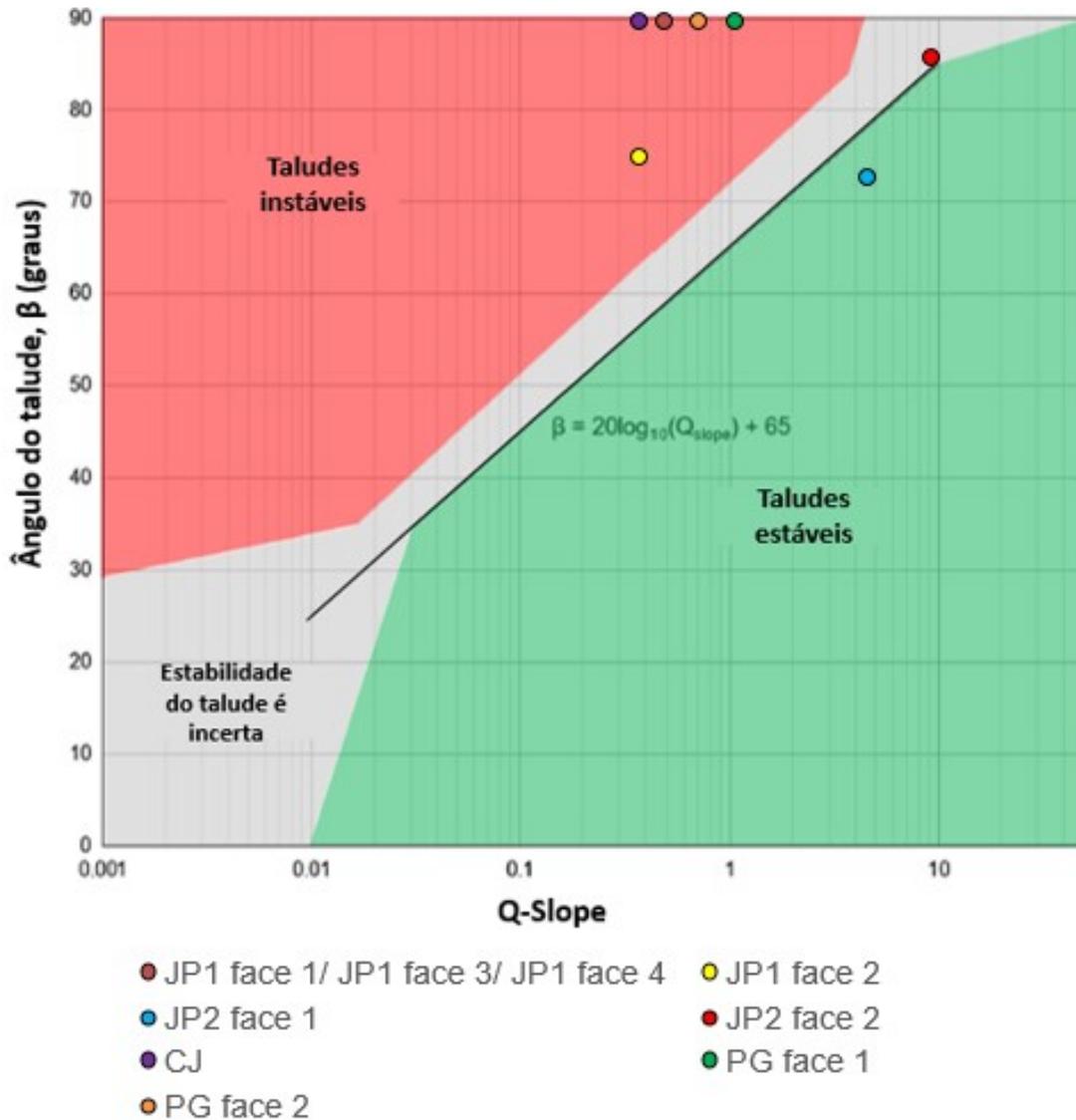


Figura 3: Representação dos taludes do estudo no gráfico de estabilidade.

A Tabela 7 compara os ângulos de inclinação praticados em cada frente de lavra com aqueles sugeridos na Equação (2), e informa a condição de estabilidade de acordo com a Figura 3.

Tabela 7: Comparação de ângulos de inclinação praticado e sugerido

TALUDE	ÂNGULO DE INCLINAÇÃO (°)	ÂNGULO β CALCULADO (°)	CONDIÇÃO DE ESTABILIDADE
JP1 face 1	90,0	58,70	Instável
JP1 face 2	75,0	56,20	Instável
JP1 face 3	90,0	58,70	Instável
JP1 face 4	90,0	58,70	Instável
JP2 face 1	73,0	78,20	Estável
JP2 face 2	86,0	84,23	Incerta
CJ	90,0	56,30	Instável
PG face 1	90,0	65,51	Instável
PG face 2	90,0	61,98	Instável

De acordo com o método Q-Slope, sete dos nove taludes podem ser considerados instáveis; um talude pode ser considerado estável (JP2 Face 1) e um talude possui condição de estabilidade incerta (JP2 Face 2). Esse resultado se mostra coerente com as condições observadas em campo, pois com exceção dos dois taludes da frente JP2, os demais de fato apresentavam indícios de deslocamentos e formação de blocos instáveis.

Apesar da Face 2 da frente JP2 estar em uma condição de incerteza pelo método gráfico, é, aparentemente, o talude mais estável dentre todos os analisados, pois não possui nenhum tipo de indício de rupturas e formação de blocos (Figura 2b). É importante salientar que ele se encontra exatamente no limite entre a zona incerta e a zona de estabilidade. Isso pode ter acontecido devido às subjetividades inerentes a levantamentos de campo, pois um desvio de pouco menos de 2° no ângulo de inclinação já o colocaria na zona de estabilidade.

Análises de estabilidade por equilíbrio limite

Por meio do software Dips foi feita a análise cinemática de cada um dos taludes, que verificou a possibilidade de ocorrência de rupturas planares, em cunha e por tombamento de blocos. A partir da análise cinemática foram selecionados os taludes que teriam sua estabilidade avaliada por meio dos demais softwares. Os possíveis modos de ruptura de cada talude são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados da análise cinemática

TALUDE	RUPTURA PLANAR	RUPTURA EM CUNHA	RUPTURA POR TOMBAMENTO DE BLOCOS
JP1 face 1	Improvável	Provável	Provável
JP1 face 2	Provável	Provável	Improvável
JP1 face 3	Improvável	Improvável	Provável
JP1 face 4	Improvável	Provável	Provável
JP2 face 1	Improvável	Improvável	Improvável
JP2 face 2	Improvável	Improvável	Improvável
CJ	Provável	Provável	Provável
PG face 1	Provável	Provável	Provável
PG face 2	Improvável	Improvável	Improvável

As rupturas classificadas como improváveis na Tabela 4 são assim classificadas por não apresentarem condições cinemáticas para ocorrência do determinado tipo de ruptura ou pela probabilidade de ocorrência ser menor que 10%, enquanto nas rupturas prováveis há condições cinemáticas para sua ocorrência, e possuem probabilidade maior que 10%. As orientações médias das famílias de descontinuidades e a orientação dos taludes estudados são apresentadas por meio de projeções hemisféricas na Figura 4.

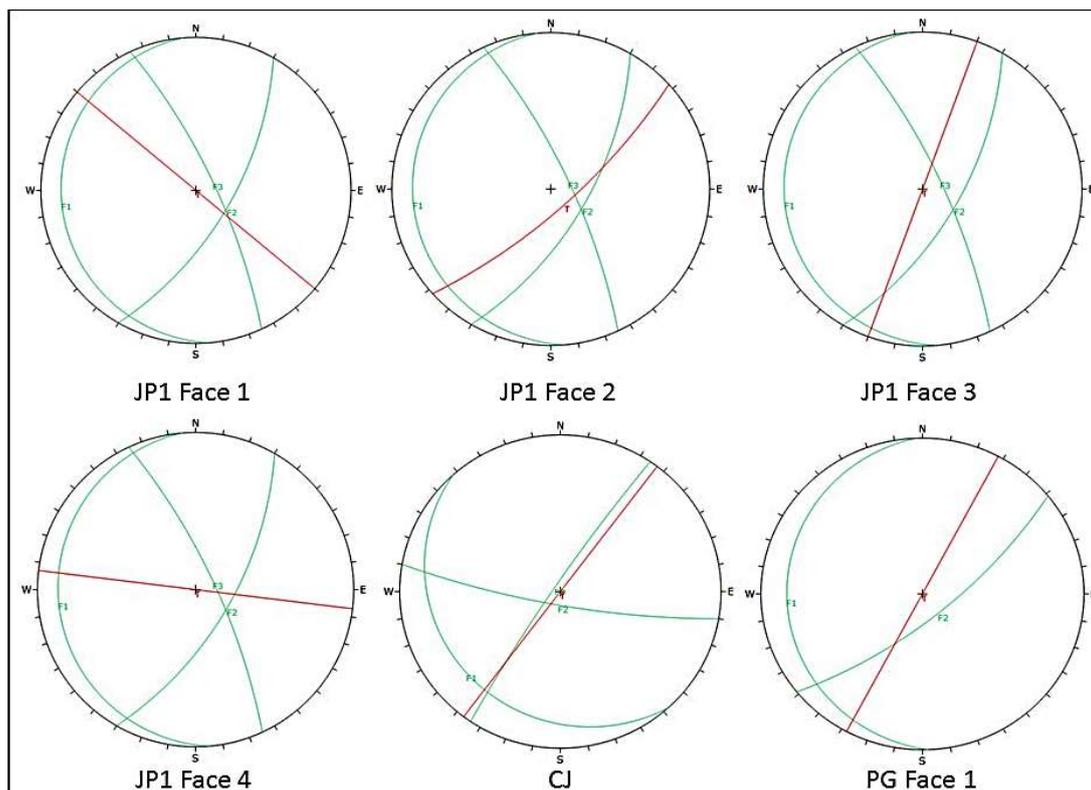


Figura 4: Orientações médias das famílias de descontinuidades e orientação dos taludes estudados.

A partir dos resultados das análises cinemáticas foram feitas as análises de estabilidade dos taludes, considerando os modos de ruptura prováveis, para obtenção do fator de segurança e verificação da condição de estabilidade. Análises de estabilidade para os taludes JP2 Face 1 e 2 e PG Face 2 não foram realizadas, uma vez que não apresentam condições cinemáticas para que nenhum tipo de ruptura ocorra. Os fatores de segurança obtidos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Fatores de segurança obtidos em análises de estabilidade por software.

TALUDE	FS PARA RUPTURA PLANAR	FS PARA RUPTURA EM CUNHA	FS PARA RUPTURA POR TOMBAMENTO DE BLOCOS
JP1 face 1	-	0,512	0,165
JP1 face 2	0,395	0,460	-
JP1 face 3	-	-	0,236
JP1 face 4	-	Análise inconclusiva	0,204
CJ	0,077	0,400	Análise inconclusiva
PG face 1	0,269	Análise inconclusiva	Análise inconclusiva

Por meio das análises de estabilidade por equilíbrio limite nos taludes selecionados foi possível perceber que nenhum deles é estável, já que apresentam valores de $FS < 1$. As análises classificadas como inconclusivas são assim descritas pois os softwares não puderam estimar deterministicamente um fator de segurança a partir das condições geométricas apresentadas.

Validação dos resultados – comparação entre os resultados encontrados por meio de Q-Slope e pelas análises de estabilidade

Diante dos resultados encontrados pelo método Q-slope e pelas análises de estabilidade por equilíbrio limite, pode-se observar que o método Q-slope atingiu um índice de assertividade de 89% na determinação da condição de estabilidade dos taludes em estudo quando comparado às análises de estabilidade.

O método Q-Slope e a análise cinemática determinaram que o talude JP2 Face 1 é estável. Esse fato também foi observado durante o levantamento geológico-geotécnico, que relatou uma região estável e com poucos deslocamentos gerados pelo desmonte. A variável desmonte não foi considerada nas análises de estabilidade. O talude JP2 Face 2 foi classificado na análise cinemática como estável, e em campo foi observado que a região desse talude se apresentava muito estável, sem indícios de deslocamentos e formação de blocos. O ângulo $\beta=84,2^\circ$ sugerido pelo Q-slope é muito próximo do praticado (86°), desta forma, o ponto no gráfico de estabilidade do Q-Slope está localizado na área de incerteza, mas também muito próximo à área de estabilidade. Assim, é razoável considerar esse talude como estável.

Ambos os métodos classificaram seis dos taludes como instáveis: JP1 Face 1, JP1 Face 2, JP1 Face 3, JP1 Face 4, CJ e PG Face 1. A análise cinemática apresentou que, de fato, diferentes tipos de ruptura podem ocorrer nesses taludes, e as análises determinísticas atestaram que todos os taludes apresentam fatores de segurança menores que 1, confirmado sua instabilidade. No levantamento de campo foram observados diferentes eventos que reafirmam a instabilidade desses taludes, como tombamento de blocos na região do talude CJ e evidências de deslizamento planar no talude JP1 Face 2 (Figura 5). Todos esses taludes também sofrem descalçamento das foliações, predominantemente horizontalizadas, em decorrência das atividades de desmonte, muito perceptível em deslocamentos e quedas de blocos presentes neles.



Figura 5: Material rochoso no pé do talude JP1 Face 2 proveniente de deslizamento no talude.

O único talude em que houve divergência entre a análise em software e a análise do Q-Slope foi o talude PG Face 2, classificado como estável na análise cinemática e instável pelo Q-Slope. A observação de campo não relata deslizamentos, mas relata que o desmonte gera descalçamento da foliação, o que pode levar a quedas de blocos na região. Efeitos de desmontes são levados em consideração no Q-Slope (parâmetro SRFa), enquanto que análises cinemáticas levam em consideração basicamente a orientação das famílias de descontinuidades em relação à orientação do talude, bem como o ângulo de atrito. Isso, aliado a inclinação desse talude (90°), pode ter contribuído para que ele fosse considerado instável pelo Q-Slope mesmo não tendo condições cinemáticas para ruptura, o que é coerente com o que foi observado no local. .

CONCLUSÃO

Ao finalizar a comparação dos resultados obtidos pelas já conhecidas análises por softwares com a abordagem proposta pelo Q-Slope, foi possível observar que houve alto índice de assertividade do novo método neste estudo de caso, realizado em taludes rochosos de uma lavra ornamental de quartzitos. Dentre os nove casos analisados, apenas um talude não apresentou resultado compatível com o observado em campo, onde o Q-Slope apontou que um talude na verdade estável teria uma condição de instabilidade. Diante de todas as subjetividades inerentes a levantamentos de campo pode-se concluir que o método conseguiu mostrar com eficiência e simplicidade a condição de estabilidade dos taludes da lavra, e propõe de modo igualmente simples, ângulos de inclinação que tornarão os taludes estáveis sem necessidade de aplicação de suportes ou reforços.

Por se tratar de um método empírico prático, que permite engenheiros e geólogos da área geotécnica obterem com rapidez informações de estabilidade de taludes rochosos em campo, tanto durante ou após a escavação, o Q-Slope se mostra uma ferramenta útil tanto em etapas preliminares de estudos de estabilidade quanto como etapa complementar ao uso de softwares para determinação dos fatores de segurança. Além do mais, pode ser utilizado também para verificar a condição de estabilidade de taludes cujos problemas podem ter causas não relacionadas às condições cinemáticas, como foi o caso de alguns taludes analisados, onde as instabilidades eram geradas principalmente devido ao desmonte com uso de explosivos. Seu uso pode resultar na redução de problemas de rupturas em taludes rochosos e na frequência de manutenções nesses taludes, evitando gastos adicionais, com consequente diminuição de prejuízos operacionais, e garantindo a segurança de trabalhadores e máquinas envolvidas nos processos de escavação de rocha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] DEERE, D.U. et al. (1967) apud HOEK, E. (2006). Practical Rock Engineering. Notas de Aula. Livro. Evert Hoek Consulting Engineer Inc. 341 p.

[2] BIENIAWSKI, Z.T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering. Livro. John Wiley & Sons. 272 p.

- [3] BIENIAWSKI, Z.T. (2011) Misconceptions in the applications of rock mass classifications and their corrections, ADIF seminar on advanced geotechnical characterization for tunnel design. Artigo. Madrid, Spain; 2011. 32 p.
- [4] BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of rock support. Artigo. 47 p.
- [5] ROMANA, M, (1995), The geomechanical classification SMR for slope correction. In: Proceedings of the 8th ISRM congress on rock mechanics, vol 3. 8 p.
- [6] SULLIVAN, T.D. (2013). Global slope performance index. In: Dight PM (ed) Proceedings of slope stability. 26 p.
- [7] BAR, N.; BARTON, N. (2017). The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering. 16p.
- [8] BAR, N.; BARTON, N. (2015). Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects. In: Schubert W, Kluckner A (eds) Future development of rock mechanics; Proceedings of the ISRM regional symposium, Eurock 2015 and 64th geomechanics colloquium, Salzburg, 7–10 October 2015. 6 p.
- [9] TORRES FILHO, R.J.A.; ANDRADE, V.C. (2015). Comparação entre análises determinísticas e probabilísticas na estabilidade de taludes em barragens: estudo de caso. Trabalho de Conclusão de Curso. 83 p.
- [10] DA SILVA, J.P.M. (2011). Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes. Dissertação de Mestrado. 149 p.
- [11] BARTON, N.; BANDIS, S. (1982). Effects of Block Size on the Shear Behaviour of Jointed Rock. Issues in Rock Mechanics. In Proceedings of 23 rd US Symposium of Rock Mechanics (eds RE Goodman & F.E. Heuze), Berkeley, California, p. 739-760.
- [12]. ROCSIENCE INC. (2019). Dips Version 7.0 - Analyze orientation-based geological data. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.
- [13] ROCSIENCE INC. (2019). RocPlane Version 3.0 - Planar rock slope stability analysis. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.
- [14] ROCSIENCE INC. (2019). Swedge Version 6.0 - 3D Surface Wedge Analysis for Slopes. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada. ROCSIENCE INC. 2010. Slide Version 6.0 - 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.
- [15] ROCSIENCE INC. (2019). RocTopple Version 1.0 - Toppling Analysis of Rock Slopes. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.
- [16] PALMSTRÖM, A. (1982). The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of jointing. Artigo. IAEG Congress, New Delhi, 1982. pp. V.221 – V.228.