APLICABILIDADE DO QUANTITATIVE HAZARD ASSESSMENT SYSTEM PARA AVALIAÇÃO DE PERIGO GEOTÉCNICO EM TALUDES DE UMA LAVRA DE QUARTZITO

Augusto do Carmo Sousa Davin, Universidade Federal de Ouro Preto augusto.davin@aluno.ufop.edu.br;

Tatiana Barreto dos Santos, Universidade Federal de Ouro Preto;

Larissa Regina Costa Silveira, Universidade Federal da Bahia;

Caio Oliveira Rodrigues, Universidade Federal de Ouro Preto.

RESUMO

As avaliações das condições de estabilidade de taludes constituem uma preocupação nas minerações devido às consequências associadas às suas rupturas. Tais avaliações são primordiais para evitar acidentes. Com objetivo de se propor uma ferramenta para checagem rápida do perigo e das condições de estabilidade de taludes de mina, o *Quantitative Hazard Assessment System* foi proposto, em 2018, por Santos *et al.* utilizando um banco de dados com 88 taludes de mina espalhados pelo mundo. Nesta pesquisa, o sistema foi aplicado a nove faces de taludes de um empreendimento de lavra ornamental de quartzito, na cidade de São Thomé das Letras - MG com objetivo de testar sua aplicabilidade e determinar as condições geotécnicas dos taludes estudados. Os resultados obtidos foram validados por meio de análises de estabilidade por equilíbrio limite.

Palavras-chave: hazard assessment; estabilidade geotécnica; taludes rochosos.

ABSTRACT

The stability condition assessment of slopes constitute a concerning in mining enterprises due to its failure consequences. This evaluation is very important to avoid accidents. With the due of proposing a tool to quickly check the hazard and stability conditions of mine slopes, the Quantitative Hazard Assessment System, in 2018, was proposed by Santos *et al.* using 88 mine slopes located around the world. In this research, the method was applied to nine slopes of a quartzite quarry mine, located in São Thomé das Letras - MG, with the objective of test its applicability and determining the geotechnical conditions of the studied slopes. The obtained results were validated by equilibrium limit analysis.

Keywords: hazard assessment; geotechnical stability; rock slopes.

INTRODUÇÃO

Devido às consequências associadas a deslizamentos e rupturas de taludes na mineração e, não distantes, nas obras de terra na construção civil, a análise das condições de estabilidade se enriquece como um ramo fundamental da engenharia geotécnica. Em sua maioria, tais análises são baseadas na teoria do equilíbrio limite e apresentam cunho determinístico ou probabilístico, onde a determinação dos parâmetros geotécnicos e de suas distribuições estatísticas não ocorrem na velocidade que o dinamismo das operações de mina exigem.

Sistemas baseados em dados para avaliação das condições de estabilidade foram propostos na literatura. Entre sistemas que possibilitam determinar a susceptibilidade de ocorrência de ruptura em taludes rochosos, pode-se citar o *Slope Mass Rating*, proposto por Romana em 1985 [1] e o Q-Slope proposto por Bar & Barton em 2017 [2]. Além desses sistemas, existem diversos sistemas de classificação geomecânica, cujos objetivos vão desde determinar a qualidade do maciço rochoso até prover maneiras de dimensionar escavações subterrâneas em rochas. Dentre os mais conhecidos, pode-se destacar o Índice de Qualidade da Rocha proposto por Deere em 1963 [3], o Sistema-Q proposto por Barton *et al.* em 1974 [4], o *Rock Mass Rating* proposto por Bieniawski em 1989 [5] e o *Rock Mass Index* proposto por Palmström em 1995 [6], que quantificam a qualidade do maciço rochoso utilizando como alguns dos parâmetros as características das descontinuidades.

Os métodos tradicionais para avaliação das condições de estabilidade de taludes rochoso, de modo geral, são fundamentados na teoria do equilíbrio limite. Essa teoria consiste na consideração de uma superfície crítica de ruptura em que a razão entre os esforços resistentes e solicitantes fornece um valor adimensional, denominado fator de segurança [7]. No entanto, as previsões do desempenho de taludes quanto à segurança são dominadas por incertezas. Estas podem ser associadas às configurações geológicas, propriedades do maciço rochoso e/ou solo, condições ambientais, desmontes e carregamentos, abalos sísmicos dentre outros fatores. Dessa forma, a constatação dessas incertezas em projetos de taludes associa-se a uma probabilidade de falha, ou seja, uma chance matemática de insucesso [8]. Sendo assim, um enfoque probabilístico permite quantificar as incertezas oriundas da variabilidade dos parâmetros geotécnicos, com a determinação de um índice de confiabilidade e de uma probabilidade de ruptura [9]. No entanto, as análises probabilísticas dependem do conhecimento da distribuição estatística das variáveis que muitas vezes não é de fato conhecida.

O Quantitative Hazard Assessment System (Has-q) é um sistema de avaliação de perigo e avaliação das condições de estabilidade de taludes rochosos de mina proposto por Santos *et al.* [10] em 2018. Essa ferramenta foi gerada utilizando um banco de dados com 88 taludes de mina localizados em vários países do mundo. Tal sistema foi desenvolvido aplicando-se técnicas de estatística multivariada, incluindo análise de componentes principais e análise discriminante com elipses de confiança. A metodologia utiliza como parâmetros de entrada variáveis quantitativas e qualitativas, facilmente levantadas em campo. E o sistema tem como principal vantagem propiciar uma rápida checagem das condições de estabilidade de taludes de mina para atender o dinamismo que as operações de mina exigem, uma vez que, o sistema depende de variáveis facilmente levantadas em campo. Além disso, a probabilidade de erro no uso do método é conhecida e é igual a 11,36%.

Este trabalho tem por objetivo geral avaliar a aplicabilidade do Has-q na determinação das condições de estabilidade de nove taludes de um empreendimento de lavra ornamental de quartzito. Os resultados obtidos foram validados por meio de análises cinemáticas de ruptura e análises determinísticas por equilíbrio limite com auxílio de *softwares* da empresa Rocscience. Esse empreendimento mineiro, se encontra na cidade de São Thomé das Letras no estado de Minas Gerais, distante cerca de 300 Km da capital Belo Horizonte, como mostra a Figura 1.



Figura 1 - Localização da cidade São Thomé das Letras (ponteiro de localização), no estado de Minas Gerais, em relação a sua capital Belo horizonte (estrela). Fonte: adaptada do site fundicaodieral, disponível em: http://www.fundicaosideral.com.br/localizacao.php

METODOLOGIA

O método Quantitative Hazard Assessment System

O Quantitative Hazard Assessment System (Has-q) [10] foi desenvolvido utilizando um banco de dados, composto por 88 taludes coletados em minas ao redor do mundo. As variáveis nele consideradas são aquelas tradicionalmente levantadas em campo e usadas em sistemas de classificação de maciços rochosos, geometria do talude e fatores externos, incluindo a resistência a compressão uniaxial da rocha intacta (P_1), espaçamento das descontinuidades (P_2), persistência de descontinuidades (P_3), abertura (P_4), rugosidade (P_5), preenchimento (P_6), grau de alteração do maciço rochoso (P_7), presença de água (P_8), orientação da família principal de descontinuidades (P_9), método de desmonte (P_{10}), altura (P_{11}) e inclinação (P_{12}) do talude. No caso das variáveis quantitativas, os valores absolutos foram utilizados. E, no caso das variáveis qualitativas, estas foram ordenadas e foram atribuídos pesos maiores as características que estavam associadas às melhores condições geotécnicas e menor valor às piores características geotécnicas, atribuídos assim, pesos variando de 1 a 5, representado na Tabela 1 a seguir.

Variável	el Parâmetro									
P ₁	U	CS - Resistêr	icia à compres	são uniaxial da ro	ocha intacta (M	Pa)	Quantitativa			
P 2			Espaç	çamento (m)			Quantitativa			
P3		Persis	stência da des	continuidade prin	cipal (m)		Quantitativa			
P4		Aber	tura da desco	ntinuidade princip	al (mm)		Quantitativa			
		Ru	gosidade da de	escontinuidade pri	incipal					
P5	Parâmetro	Muito rugosa	Rugosa	Levemente rugosa	Lisa	Polida	Qualitativa ordinal			
	Peso	5	4	3	2	1				
		Pree	nchimento da	descontinuidade p	principal					
Pe	Parâmetro	Nenhum	Preench	imento duro	Preenchime	ento macio	Qualitativa			
10	rarametro		<5 mm	>5 mm	<5 mm	>5 mm	ordinal			
	Peso	5	4	3	2	1				
			Altera	ção da rocha						
P7	Parâmetro	Não alterada (W1)	Ligeiramente alterada (W2)	Moderadamente alterada (W3)	Muito alterada (W4)	Decompost a (W5)	Qualitativa ordinal			
	Peso	5	4	3	2	1				
			Condição de	e água subterrânea	а					
Р 8	Parâmetro	Seco	Úmido	Encharcado	Gotejando	Com fluxo	Qualitativa			
	Peso	5	4	3	2	1				
		Ori	entação da de	escontinuidade pri	ncipal					
	Parâmetro	βd>βs	βd>βs	0≤βd≤βs/4	βs/4≤βd≤βs/ 2	βs/2≤βd≤β s				
Po		αd - αs >30°	αd - αs <30°	αd - αs >30°	αd - αs <30°	αd - αs <30°	Qualitativa			
- 9	Descrição	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavoráve I	Muido desfavoráv el	ordinal			
	Peso	5	4	3	2	1				
			Método	de desmonte						
P ₁₀	Parâmetro	Pré- fissuramen to	Pós- fissurament o	Parede lisa / almofadada	Explosão de produção modificada	Desmonte regular / mecânico	Qualitativa ordinal			
	Peso	5	4	3	2	1				
P ₁₁			Altura do t	talude global (m)			Quantitativa			
P ₁₂			Inclinação d	lo talude global (°))		Quantitativa			

Tabela 1 - Valor associado aos parâmetros do modelo Has-q [10].

*onde, βd é o mergulho da descontinuidade, βs é o mergulho do talude, αd é a direção de mergulho da descontinuidade e, αs é a direção de mergulho do talude.

O primeiro passo da metodologia é a padronização das variáveis P_n , n = 1, 2,..., 12. Isso é importante devido às diferenças de escala entre as variáveis métricas e também pelo fato do método considerar tanto variáveis quantitativas quando qualitativas. Obtidas em campo as 12 variáveis (P_n) é possível realizar essa padronização através da Equação 1, onde μ_n representa as médias e δ_n representa os desvios padrões de cada uma das variáveis. Os valores μ_n e de δ_n são apresentados na Tabela 2.

$$Z_n = \frac{(P_n - \mu_n)}{\delta_n} \tag{1}$$

Tabela 2 - Média e desvio padrão das variáveis [6]

Variável	<i>P</i> ₁	P ₂	P ₃	P ₄	<i>P</i> ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂
Média µ Dosvio	77,92	1,52	9,39	2,23	3,32	2,69	3,27	4,05	3,4	2,64	325,06	42,82
padrão δ	44,9	1,00	7,45	1,4	0,70	0,8	0,90	0,90	1,00	1,6	212,50	9,83

Com as variáveis padronizadas (Z_n), o segundo passo para a obtenção da classificação de perigo é o cálculo dos escores (Cp_n , n = 1, 2, ..., 12) das doze componentes principais através das Equações 2 a 13.

<i>Cp</i> ₁ =	$0,24Z_1+0,33Z_2-0,29Z_3-0,34Z_4+0,36Z_5+0,03Z_6+0,41Z_7+0,36Z_8-0,32Z_9+0,21Z_{10}+0,15Z_{11}+0,12Z_{12}$	(2)
<i>Cp</i> ₂ =	$-0,46Z_1+0,06Z_2+0,10Z_3-0,10Z_4+0,05Z_5-0,04Z_6+0,02Z_7+0,35Z_8-0,30Z_9$ $-0,52Z_{10}+0,07Z_{11}-0,52Z_{12}$	(3)
<i>Cp</i> ₃ =	$-0,08Z_1+0,41Z_2+0,17Z_3+0,22Z_4+0,01Z_5-0,40Z_6+0,15Z_7-0,04Z_8+0,38Z_9+0,19Z_{10}+0,57Z_{11}-0,22Z_{12}$	(4)
<i>Cp</i> ₄ =	$-0,34Z_1+0,17Z_2-0,49Z_3-0,24Z_4-0,14Z_5+0,39Z_6-0,35Z_7-0,32Z_8-0,05Z_9+0,19Z_{10}+0,33Z_{11}-0,12Z_{12}$	(5)
<i>Cp</i> ₅ =	$0,01Z_1-0,08Z_2-0,14Z_3-0,57Z_4-0,65Z_5-0,33Z_6+0,16Z_7+0,15Z_8+0,23Z_9-0,06Z_{10}-0,05Z_{11}+0,05Z_{12}$	(6)
<i>Cp</i> ₆ =	$-0,18Z_1-0,18Z_2-0,49Z_3+0,06Z_4+0,33Z_5-0,69Z_6-0,28Z_7-0,04Z_8-0,06Z_9+0,06Z_{10}-0,16Z_{11}+0,03Z_{12}$	(7)
<i>Cp</i> ₇ =	$-0,22Z_{1}+0,65Z_{2}+0,03Z_{3}+0,07Z_{4}-0,07Z_{5}-0,05Z_{6}-0,17Z_{7}-0,01Z_{8}+0,00Z_{9}-0,34Z_{10}-0,20Z_{11}+0,58Z_{12}$	(8)
<i>Cp</i> ₈ =	$0,09Z_1+0,16Z_2-0,52Z_3-0,32Z_4-0,02Z_5+0,22Z_6+0,25Z_7+0,15Z_8+0,48Z_9-0,16Z_{10}-0,34Z_{11}-0,29Z_{12}$	(9)
<i>Cp</i> ₉ =	$0,49Z_1+0,25Z_2+0,10Z_3-0,13Z_4-0,01Z_5-0,02Z_6-0,68Z_7+0,33Z_8+0,07Z_9+0,08Z_{10}-0,09Z_{11}-0,28Z_{12}$	(10)
<i>Cp</i> ₁₀ =	$0,36Z_1+0,27Z_2-0,00Z_3-0,15Z_4+0,00Z_5-0,18Z_6+0,15Z_7-0,70Z_8-0,24Z_9-0,27Z_{10}-0,17Z_{11}-0,32Z_{12}$	(11)

$$Cp_{11} = 0.35Z_1 - 0.13Z_2 - 0.30Z_3 + 0.43Z_4 - 0.37Z_5 - 0.06Z_6 - 0.05Z_7 + 0.12Z_8 - 0.35Z_9 - 0.31Z_{10} + 0.44Z_{11} + 0.15Z_{12}$$
(12)

$$Cp_{12} = -0.17Z_1 + 0.22Z_2 + 0.03Z_3 + 0.31Z_4 - 0.41Z_5 - 0.09Z_6 + 0.09Z_7 + 0.08Z_8 - 0.44Z_9 + 0.54Z_{10} - 0.35Z_{11} - 0.18Z_{12}$$
(13)

Obtido os escores (Cp_n) é possível então conhecer as condições de estabilidade e consequentemente a classe de perigo em que o talude se encontra, plotando os valores obtidos pelas funções discriminantes, das pelas Equações 14 e 15 no gráfico de perigo, apresentado na Figura 2. Segundo Santos *et al.* [10] taludes que apresentam perigo baixo são aqueles que se apresentam estáveis, perigo médio aqueles taludes que apresentam rupturas na escala de bancada e perigo alto aqueles taludes que apresentam ruptura global. O perigo se associa às consequências que a ruptura pode trazer e, portanto, rupturas a nível de bancada são por vezes toleráveis e não chegam a constituir um perigo alto.

$$LD_{1} = -1,00Cp_{1}-0,75Cp_{2}-0,23Cp_{3}-0,19Cp_{4}-0,29Cp_{5}-0,11Cp_{6}-0,15Cp_{7} \\ -0,08Cp_{8}-0,02Cp_{9}+0,39Cp_{10}+0,32Cp_{11}+0,31Cp_{12}$$
(14)

$$LD_{2} = \begin{array}{c} 0,26Cp_{1}-0,01Cp_{2}-0,39\ Cp_{3}+0,09Cp_{4}-0,03Cp_{5}+0,36Cp_{6}+0,07Cp_{7}\\ -0,51Cp_{8}+0,37Cp_{9}-0,20Cp_{10}-0,05Cp_{11}+0,01Cp_{12} \end{array}$$
(15)



Figura 2 - Classificação de perigo do talude pelo Has-q [10].

Análise de estabilidade por Equilíbrio-Limite

Com objetivo de se validar os resultados obtidos por meio da aplicação do Has-q, análises de estabilidade por equilíbrio limite foram realizadas nos nove taludes estudados. Primeiramente foi feita a análise cinemática através do *software* Dips® [11] a fim de se identificar os possíveis mecanismos de rupturas em cada talude. Conhecidos os principais mecanismos de ruptura de cada talude, foram feitas então as análises de estabilidade obedecendo ao critério de resistência proposto por Barton & Brandis em 1982 [11], dado pela Equação 16.

$$\tau = \sigma_n tan \left[\phi_r + JRC \log 10 \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$
(16)

Em que τ é a resistência ao cisalhamento; ϕ_r é O ângulo de atrito residual, obtido através do valor do grau de alteração das descontinuidades (J_a); *JRC* é o coeficiente de rugosidade da descontinuidade, obtido através da correlação com grau de rugosidade das descontinuidades (J_r); σ_n é a tensão normal atuante na superfície da descontinuidade e JCS é a resistência à compressão da descontinuidade, cujo valor pode ser obtido a partir do gráfico de Deere-Miller [13], que mostra a sua dependência em relação à resistência da rocha segundo os ensaios de martelo de Schmidt.

As análises determinísticas de estabilidade por equilíbrio limite foram feitas nos seguintes *softwares*: RocPlane® (rupturas planares) [14], Swedge® (rupturas em cunha) [15], RocTopple® (rupturas por tombamento de blocos) [16]. Não foi realizado análise referente ao volume de material movimentado em possíveis rupturas.

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Levantamento geológico-geotécnico e observações prévias de campo

No âmbito da geotecnia é fundamental uma criteriosa análise em campo e assim, as observações do analista. A Tabela 3 representa algumas observações pertinentes às nove faces dos taludes analisados relacionadas a indícios de instabilidade e possíveis causas. As nove faces estudadas no presente trabalho, apresentadas na Figura 3, correspondem a uma lavra em pedreira de quartzito para rochas ornamentais na cidade de São Thomé das Letras - MG.

	Orientação	D					
Talude	Descontinuidade principal	Talude	Anotações gerais feitas em campo				
JP ₁ face 1	76/065	90/040	Desmonte e deslizamentos da família de descontinuida (F3) podem gerar desplacamentos a partir da foliação.				
JP ₁ face 2	64/120	75/138	Deslizamento evidente no local, tipo de ruptura planar pela família descontinuidade (F2).				
JP ₁ face 3	64/120	90/290	Família de descontinuidade (F2) tomba contra a parede do talude. Observado desplacamentos devido ao tipo de desmonte.				
JP₁ face 4	76/065	90/007	Desmonte e deslizamentos da família de descontinuidade (F3) podem gerar desplacamentos a partir da foliação.				
JP₂ face 1	11/240	73/180	Região estável, porém com desplacamentos localizados gerados pelo tipo de desmonte. Esses desplacamentos não chegam a caracterizar visual instabilidade no maciço				
JP ₂ face 2	11/240	86/226	Região estável, sem desplacamentos observados.				
CJ	85/304	90/127	Família de descontinuidade (F3) tombante. Desplacamentos a partir da foliação.				
PG face 1	72/141	90/118	Desmonte e deslizamentos da família de descontinuidade (F2) podem gerar desplacamentos a partir da foliação.				
PG face 2	10/268	90/197	Região estável, porém com desplacamentos localizados gerados pelo tipo de desmonte. Esses desplacamentos não chegam a caracterizar visual instabilidade no maciço.				

Tabela 3 - Levantamentos de análise em campo.



Figura 3 - Fotografias das nove faces de taludes: (A) JP₁ face 1, (B) e (C) JP₁ face 2, (D) JP₁ face 2 evidenciando o desplacamento, (E) JP₁ face 3, (F) JP₁ face 4, (G) JP₂ face 1, (H) JP₂ face 2, (I) CJ, (J) e (K) PG face 1 e (L) PG face 2.

Durante essa fase foram levantados os dados geomecânicos dos maciços rochosos, a saber: grau de resistência; espaçamento, abertura, persistência, rugosidade, preenchimento e orientação da família de descontinuidades principal, alteração da matriz rochosa, condição de percolação de água subterrânea. Além dessas características, foram determinadas a altura e inclinação do talude.

Sobre a análise de campo, de maneira geral, em todas as faces de taludes analisados existe a foliação praticamente horizontal, que sozinha de fato dificilmente causa problemas em um talude vertical, salvo em situações em que há trincas no talude. Tais trincas são provenientes, principalmente, ao método de desmonte. E, em determinadas faces, como apresentado na Figura 3 (C), é possível notar o desplacamento de blocos e cunhas de pequeno porte.

Aplicação do Has-q

No local do empreendimento mineiro, foram coletados dados referentes às nove faces de taludes. A Tabela 4 apresenta os valores médios representativos de cada um dos taludes estudados. Sendo esses dados àqueles pertinentes ás variáveis (P_n), para utilização no método Has-q [10], já apresentados na Tabela 1. É importante salientar que a resistência à compressão uniaxial foi obtida em campo com o martelo de geólogo e está na faixa entre 100 e 250 MPa. Porém, no método Has-q esse parâmetro é uma variável métrica e, portanto, deve ser dado em valor absoluto. Sendo assim, para P_1 , foi adotado o valor de 175 MPa, que corresponde à média da faixa observada em campo. Para o espaçamento (P_2), persistência (P_3) e abertura (P_4), foram considerados os valores médios para a família de descontinuidade mais crítica de cada talude.

Talude	Р ₁ (Мра)	<i>P</i> ₂ (m)	P ₃ (m)	<i>P</i> ₄ (mm)	P 5	P ₆	P 7	P ₈	P 9	P ₁₀	Р ₁₁ (m)	P ₁₂ (°)
JP ₁ face 1	175	0,9	6,5	5	4	2	4	5	1	1	11,03	90
JP ₁ face 2	175	0,5	6,5	5	4	2	4	5	1	1	16,78	75
JP ₁ face 3	175	0,5	6,5	5	4	2	4	5	1	1	4,6	90
JP ₁ face 4	175	0,9	6,5	5	4	2	4	5	1	1	4,6	90
JP ₂ face 1	175	0,05	20	5	2	2	5	2	3	1	4,6	73
JP_2 face 2	175	0,05	20	5	2	2	5	2	3	1	10	86
CJ	175	0,515	6,5	5	4	2	4	5	1	1	13,78	90
PG face 1	175	0,5	5,5	5	4	2	5	5	1	1	7,25	90
PG face 2	175	0,5	20	5	2	2	5	5	3	1	7,25	90

 Tabela 4 - Faces dos taludes constituintes do banco de dados.

Com os dados das 12 variáveis (P_n), presentes na Tabela 3, e de posse das médias (μ_n) e desvios padrões (δ_n) de cada uma das variáveis, apresentadas na Tabela 2, é possível empregar a Equação 1 para padronizar os dados (Z_n). Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Talude	Z 1	Z ₂	Z 3	Z4	Z_5	Z 6	Z 7	Z 8	Z۹	Z ₁₀	Z ₁₁	Z ₁₂
JP ₁ face 1	2,16	-0,62	-0,39	1,98	0,97	-0,86	0,81	1,06	-2,40	-1,03	-1,48	4,80
JP ₁ face 2	2,16	-1,02	-0,39	1,98	0,97	-0,86	0,81	1,06	-2,40	-1,03	-1,45	3,27
JP ₁ face 3	2,16	-1,02	-0,39	1,98	0,97	-0,86	0,81	1,06	-2,40	-1,03	-1,51	4,80
JP ₁ face 4	2,16	-0,62	-0,39	1,98	0,97	-0,86	0,81	1,06	-2,40	-1,03	-1,51	4,80
JP ₂ face 1	2,16	-1,47	1,43	1,98	-1,89	-0,86	1,92	-2,28	-0,40	-1,03	-1,51	3,07
JP ₂ face 2	2,16	-1,47	1,43	1,98	-1,89	-0,86	1,92	-2,28	-0,40	-1,03	-1,48	4,39
CJ	2,16	-1,01	-0,39	1,98	0,97	-0,86	0,81	1,06	-2,40	-1,03	-1,46	4,80
PG face 1	2,16	-1,02	-0,52	1,98	0,97	-0,86	1,92	1,06	-2,40	-1,03	-1,50	4,80
PG face 2	2,16	-1,02	1,43	1,98	-1,89	-0,86	1,92	1,06	-0,40	-1,03	-1,50	4,80

Tabela 5 - Variáveis padronizadas

A partir da padronização dos dados (Z_n) e emprego das Equações 2 a 13 é possível obter os escores (Cp), com os resultados apresentados na Tabela 6 a seguir.

Talude	Ср 1	Ср 2	Ср 3	Cp₄	Cp₅	Ср 6	Ср 7	Ср 8	Ср 9	Ср 10	Ср 11	Ср 12
JP ₁ face 1	1,70	-2,15	-2,63	-3,36	-1,24	1,14	2,50	-2,06	-1,05	-0,58	2,81	0,09
JP ₁ face 2	1,39	-1,37	-2,44	-3,23	-1,28	1,16	1,35	-1,69	-0,72	-0,20	2,65	0,27
JP ₁ face 3	1,56	-2,17	-2,81	-3,44	-1,20	1,22	2,25	-2,12	-1,15	-0,68	2,85	0,01
JP ₁ face 4	1,69	-2,15	-2,65	-3,37	-1,24	1,15	2,51	-2,05	-1,05	-0,57	2,80	0,10
JP ₂ face 1	-1,73	-3,01	-1,27	-3,22	0,49	-0,88	1,05	-1,83	-2,28	1,77	2,01	0,40
JP ₂ face 2	-1,57	-3,69	-1,55	-3,37	0,55	-0,85	1,81	-2,23	-2,65	1,342	2,32	0,16
CJ	1,57	-2,17	-2,78	-3,42	-1,21	1,21	2,25	-2,13	-1,15	-0,69	2,87	0,00
PG face 1	2,06	-2,16	-2,66	-3,75	-1,01	0,97	2,05	-1,77	-1,92	-0,52	2,84	0,10
PG face 2	-0,18	-2,71	-1,60	-4,41	1,04	-1,05	2,31	-1,77	-1,55	-1,00	2,61	0,45

Tabela 6 - Escores das componentes principais geradas na análise.

De posse dos escores (*Cp*) o próximo passo para aplicação da metodologia é calcular os escores das funções discriminantes, apresentados nas Equações 14 e 15, com resultados apresentados na Tabela 7. Obtidos os valores LD_1 e LD_2 das nove faces dos taludes é possível plotar no gráfico proposto no método Has-q, Figura 3 e, assim, determinar a classe de perigo e estimar a condição de estabilidade dos taludes estudados.

Talude	LD ₁	LD 2	Grau de perigo
JP ₁ face 1	1,90	2,45	Perigo Médio
JP ₁ face 2	1,86	2,09	Perigo Médio
JP ₁ face 3	2,09	2,50	Perigo Médio
JP ₁ face 4	1,91	2,45	Perigo Médio
JP_2 face 1	6,34	-0,83	Perigo Baixo
JP_2 face 2	6,51	-0,49	Perigo Baixo
CJ	2,07	2,49	Perigo Médio
PG face 1	1,69	1,94	Perigo Médio
PG face 2	3,64	0,36	Perigo Baixo

Tabela 7 - Valores de LD₁ e LD₂ e respectivo grau de perigo.



Figura 4 - Gráfico com estabilidade das fáceis com classificação de perigo dos taludes pelo método Has-q [10]. Notar que faces JP₂ face 1 e JP₂ face 2 saem do limite do gráfico, mas compreendem a área de perigo baixo.

Os taludes que apresentaram perigo baixo de ruptura são os taludes considerados estáveis pelo método. Os taludes classificados como perigo médio são aqueles que apresentam ruptura na escala de bancada, normalmente condicionado por descontinuidades. Como esperado, nenhum talude foi classificado como perigo alto, uma vez que essa classificação se associa a ruptura global de taludes de cava e neste trabalho, esse tipo de talude não é avaliado.

Análises de estabilidade por meio da teoria do equilíbrio limite

Através do *software* Dips®, utilizando o banco de dados, foi realizada a análise cinemática para determinação das possíveis rupturas nas nove faces de taludes. Desses, os que apresentaram condição cinemática para ocorrência de rupturas planar e/ou cunha e/ou tombamento de blocos foram selecionados para análises de estabilidade e obtidos dos mesmos, o valor do fator de segurança, como apresentado na Tabela 8. Essas análises determinísticas de estabilidade foram feitas com os *softwares* RocPlane® para rupturas planares, Swedge® para rupturas em cunha e RocTopple® para rupturas por tombamento de blocos.

F. Talude	Plar	nar	Cu	ınha	Tombame	nto de Blocos	
	Análise	Análise FS Análise		FS	Análise	FS	
JP1 face 1	. Improvável		Provável	0,51	Provável	0,17	
JP1 face 2	Provável 0,40		Provável	0,46	Improvável		
JP1 face 3	Impro	vável	Impr	ovável	0,24		
JP1 face 4	Improvável		Provável	Análise inconclusiva	Provável	0,20	
JP2 face 1	Impro	vável	Impr	ovável	Improvável		
JP2 face 2	Impro	vável	Impr	ovável	Improvável		
CJ	Provável	0,08	Provável	0,40	Provável	Análise inconclusiva	
PG face 1	Provável	0,27	Provável	Análise inconclusiva	Provável	Análise inconclusiva	
PG face 2	Impro	vável	Impr	ovável	Improvável		

Tabela 8 - Análises de cinemática com Fator de Segurança quando existe possibilidade de ruptura de taludes com auxílio de *softwares.*

É importante destacar que quando se trata de análises de estabilidade por equilíbrio limite utilizando *softwares*, o resultado é baseado no fator de segurança e, portanto, é único. Ou seja, tomando como base um FS mínimo aceitável e maior do que 1 para caracterizar a estabilidade, ou o talude é estável ou instável, não havendo um meio termo, uma probabilidade média de ruptura. Já no método Has-q, o fato de um talude apresentar perigo médio já indica que há instabilidade na escala de bancada, ou seja, é um local que merece atenção. A resposta não é única (estável ou instável), mas sim, dada em um nível de perigo. Quando os *softwares* não são capazes de estimar deterministicamente um fator de segurança, a partir das condições geométricas apresentadas, a análise se torna inconclusiva.

Com isso tanto pelo Has-q quanto pelas análises de estabilidade por equilíbrio limite, foi possível verificar a instabilidade de seis faces de taludes, que são elas, JP₁ Face 1, JP₁ Face 2, JP₁ Face 3, JP₁ Face 4, CJ e PG Face 1. Já os de taludes JP₂ face 1, JP₂ face 2 e PG face 2 foram classificados como taludes estáveis tanto pelas análises cinemáticas como pelo Has-q (perigo baixo). Esses três taludes não apresentam uma descontinuidade principal que possa levar a uma ruptura, no entanto, um baixo controle das atividades de desmonte poderia geral descalçamento localizado de algumas descontinuidades. Além disso, partir das análises de campo foi possível notar que os blocos formados por desplacamento, ou cunhas, são pequenos, mas em termos geométricos e de resistência, o FS é menor que 1. Tais resultados são compatíveis com as observações prévias feitas em campo e compatíveis entre si, conforme a comparação dos resultados apresentada na Tabela 9, que confere ao método Has-q [10] uma elevada confiabilidade ao se avaliar a estabilidade de taludes em rochas.

Talude	Has-q	Análise cinemática com softwares					
		Possibilidade	Тіро				
JP1 face 1	Perigo Médio	Provável	Cunha Tombamento de Blocos				
JP1 face 2	Perigo Médio	Provável	Planar Cunha				
JP1 face 3	Perigo Médio	Impro	vável				
JP1 face 4	Perigo Médio	Provável	Cunha				
JP2 face 1	Perigo Baixo	Impro	vável				
JP2 face 2	Perigo Baixo	Impro	vável				
CJ	Perigo Médio	Provável	Planar Cunha				
PG face 1	Perigo Médio	Provável	Planar Cunha				
PG face 2	Perigo Baixo	Impro	vável				

Tabela 9 - Comparativo entre resultados da metodologia Has-q [10] e Análises cinemáticascom auxílio de softwares.

Sistemas de análises de ruptura

CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisados pelo método Has-q e por análise de estabilidade por equilíbrio limite, nove faces de taludes de um empreendimento mineiro de lavra em pedreira de quartzito. Sendo que, ambas as metodologias apontaram a instabilidade de seis faces de taludes e a estabilidade de três. A partir das análises de campo foi possível notar que os blocos formados por desplacamento, ou cunhas, são pequenos, mas em termos geométricos e de resistência, o FS é menor que 1.

Os resultados obtidos mostraram que o método Has-q é uma ferramenta eficaz em projetos de engenharia geotécnica, com foco em estudos de estabilidade de taludes rochosos de mina, pois fornece de maneira consistente o nível de perigo de ocorrer rupturas. Isso porque os resultados desse método foram coerentes com o que foi observado preliminarmente em campo e similares aos resultados fornecidos por análises de estabilidade por equilíbrio limite já reconhecidos e difundidos no meio geotécnico. Além do mais, possui o diferencial de ser uma metodologia quantitativa, com forte embasamento estatístico e fácil de ser aplicada, cujas equações consideram os parâmetros que são levantados e representativos na avaliação da condição de estabilidade de taludes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] ROMANA, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. Int. Symp. on the role of rock mechanics ISRM. Zacatecas, p. 49-53.

[2] BAR, N.; BARTON, N. (2017). The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering. 16p.

[3] DEERE, D. U. (1989). Rock Quality Designation (RQD) After Twenty Years. National Technical Information Service. Gainesville, Florida. 22 p.

[4] BARTON, N., LIEN, R.; LUNDE, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of rock support. Rock Mechanics, v. 6, p. 189-236.

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

[6] PALMSTRÖM, A. (1995) RMi – a rock mass characterization system for rock engineering purposes. Ph.D. thesis, Oslo University, Norway, 400 p.

[7] JUNIOR, A.J.G. (2018). Análise probabilística da estabilidade de taludes via teoria da confiabilidade. Dissertação de mestrado, UNESP. 93 p.

[8] EL-RAMLY, H. M. F. (2001). Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: Bridging theory and practice. University of Alberta. Edmonton, 391 p.

[9] APAZA, M.A.; BARROS, J.M.C. (2014). Análise probabilística de estabilidade de taludes pelo Método de Monte Carlo. Artigo.

[10] SANTOS, T.B.; LANA, M.S.; PEREIRA, T.M.; CANIBULAT, I. (2018). Quantitative hazard assessment system (Has-q) for open pit mine slopes. Artigo. 9 p.

[11] ROCSIENCE INC. (2019). Dips Version 7.0 - Analyze orientation-based geological data. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.

[12] 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.

[13] DEERE, D.; MILLER, R. (1966). Engineering classification and index properties for intact rock, 1°, New Mexico: University of Illinois, 300 p.

[14] ROCSIENCE INC. (2019). RocPlane Version 3.0 - Planar rock slope stability analysis. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.

[15] 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.

[16] ROCSIENCE INC. (2019). RocTopple Version 1.0 - Toppling Analysis of Rock Slopes. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.