

Estudo de correlação entre os métodos SMR e Q-slope

André Vinicius Maion

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, andre.maion@usp.br

Marcos Egydio da Silva

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, megydios@usp.br

Bruna Catarino Xavier

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, brunacatarino@gmail.com

Camila Duelis Viana

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, camila.duelis@gmail.com

Marcos Saito de Paula

JS Geologia Aplicada, São Paulo, Brasil, msaito@jsgeo.com.br

RESUMO: : O SMR e Q-slope são métodos empíricos desenvolvidos para classificar maciços rochosos para escavação de taludes. Tais métodos abordam a estabilidade dos taludes rochosos de formas diferentes. Assim este estudo teve como objetivo verificar a existência de correlação entre estes métodos. Para tanto, os dados utilizados foram obtidos por meio de *scanlines* em taludes localizados no Bairro Jardim Trujillo em Sorocaba e na mina do Vau Novo, localizada no município de Santana do Parnaíba, ambos no estado de São Paulo. Utilizando o coeficiente de correlação (R^2) como ferramenta, observou-se que os métodos de classificação se correlacionam de forma adequada ao se relacionar o índice SMR com a razão do ângulo β , obtida pelo método Q-slope, pelo ângulo real do talude.

PALAVRAS-CHAVE: Classificação de Maciço Rochoso, Slope Mass Rating, Q-slope, Correlação, Scanline

ABSTRACT: SMR and Q-slope are empirical methods applied to classify rock masses for slope excavation. These methods approach the stability of rock resources in different ways. Thus, this study aimed to verify the correlation between these methods. To this end, the data used were captured by scanlines in slopes at Bairro Jardim Trujillo in Sorocaba and at Mina do Vau Novo, located in the municipality of Santana de Parnaíba, both in the state of São Paulo. Using the correlation coefficient (R^2) as a tool, the classification methods correlate adequately to compare the SMR index to ratio angle β , result the Q-slope method, to the real slope.

KEYWORDS: Rock Mass Classification, Slope Mass Rating, Q-slope, Correlation, Scanline.

1 Introdução

Estimar o comportamento de maciços rochosos frente às intervenções de engenharia é uma tarefa complexa que envolve a caracterização, tanto qualitativa quanto quantitativa, das propriedades e parâmetros de determinado maciço rochoso e o processamento dos dados por diferentes ferramentas. Os sistemas de classificação de maciços rochosos representam um destes tipos de ferramentas de processamento de dados de caracterização geológica (GeoEng2000 Workshop, 2001). São métodos empíricos de projeto, ou seja, foram desenvolvidos de acordo com a percepção e experiência de seus respectivos autores de forma que, a partir da aferição de parâmetros, previamente definidos, é possível estimar o comportamento do maciço rochoso perante determinada intervenção de engenharia e por fim propor soluções. Para isto, as classificações geomecânicas, os qualificam em função do denominado “índice de qualidade do maciço”
Diversos autores elaboraram métodos empíricos de estimativa de comportamento de maciços rochosos, dentre estes sistemas de classificação o Slope Mass Rating (SMR; (Romana,1985) é um sistema consagrado,

derivado do Rock Mass Rating (RMR; Bieniawski 1973) que prevê o comportamento de maciços diante de uma escavação de talude. O Q-slope (Bar e Barton, 2015) é outro sistema de classificação de comportamento de taludes rochosos baseado no Q-system (Barton, 1974)

Avaliar um maciço rochoso através de um único método empírico de classificação não é considerado adequado. Isto devido ao certo nível de subjetividade e viés que estes métodos possuem, justamente por terem sido desenvolvidos empiricamente. Assim mais do que aplicar métodos de classificação diferentes, em um mesmo maciço, é necessário comparar os resultados obtidos, tais como o índice de qualidade e a previsão de comportamento do maciço. Portanto tão importante quanto desenvolver novos métodos empíricos de classificação, é desenvolver correlações entre tais metodologias.

A correlação entre métodos distintos permite analisar criticamente os resultados encontrados, além de possibilitar a execução de uma análise multiparamétrica, viabilizando um conhecimento mais amplo do comportamento de determinado maciço perante a escavação de um talude.

Assim o objetivo deste trabalho é averiguar a existência de correlação, tanto quantitativa quanto conceitual, entre os métodos SMR e Q-slope, e propor a utilização de uma delas.

2 SMR (Slope Mass Rating)

O índice SMR, desenvolvido por Romana (1985), é calculado por quatro fatores empíricos de ajuste adicionados ao índice RMR básico (RMRb) proposto por Bieniawski (1976). Estes fatores dependem da relação entre as descontinuidades presentes no talude e o método de escavação. Assim o índice SMR é obtido segundo a equação 1.

$$SMR = RMRb + (F1 \times F2 \times F3) + F4 \quad (1)$$

(os parâmetros Fn especificados em Romana (1985))

O resultado do índice SMR pode ser agrupado em 5 classes, as quais é atrelado uma estimativa de comportamento do maciço rochoso (Tabela 1)

Tabela 1 – Descrição das classes de SMR (Romana, 1985)

Classe	SMR	Descrição	Estabilidade	Rupturas	Probabilidade de ruptura
I	81 - 100	Muito bom	Completamente estável	Nenhuma	0
II	61 - 80	Bom	Estável	Alguns blocos	20%
III	41 -60	Normal	Parcialmente estável	Pequenas planares ou muitas por cunha	40%
IV	21 -40	Ruim	Instável	Planar ou grandes por cunha	60%
V	0 -20	Muito ruim	Completamente instável	Grandes planares ou circulares	90%

3 Q-slope

Q-slope é um método empírico de engenharia desenvolvido por Barton e Bar (2015) para analisar a estabilidade de taludes rochosos sem obras de contenção.

Para o cálculo do Q-slope atribui-se notas para seis parâmetros. São eles: RQD, Número de descontinuidades (Jn), Índice de rugosidade (Jr), Índice de alteração (Ja), Índice das condições ambientais e geológicas (Jwice), e o Fator de redução de tensões para taludes (SRF). Estes parâmetros são importados do Q-System (Barton et al, 1974), entretanto alguns sofreram modificações em relação ao Q-System.

Assim, segundo os autores, o Q-slope é calculado segundo a formula:

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right)_0 \cdot \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (2)$$

O valor do índice Q-slope por si só não classifica o talude rochoso quanto ao seu comportamento. Bar e Barton (2015) utilizando a correlação entre os resultados do índice Q-Slope e o comportamento observado de taludes em maciços rochosos, elaboraram o gráfico da Figura 1 que permite inferir o comportamento de taludes rochosos utilizando o resultado do Q-slope e a inclinação do talude.

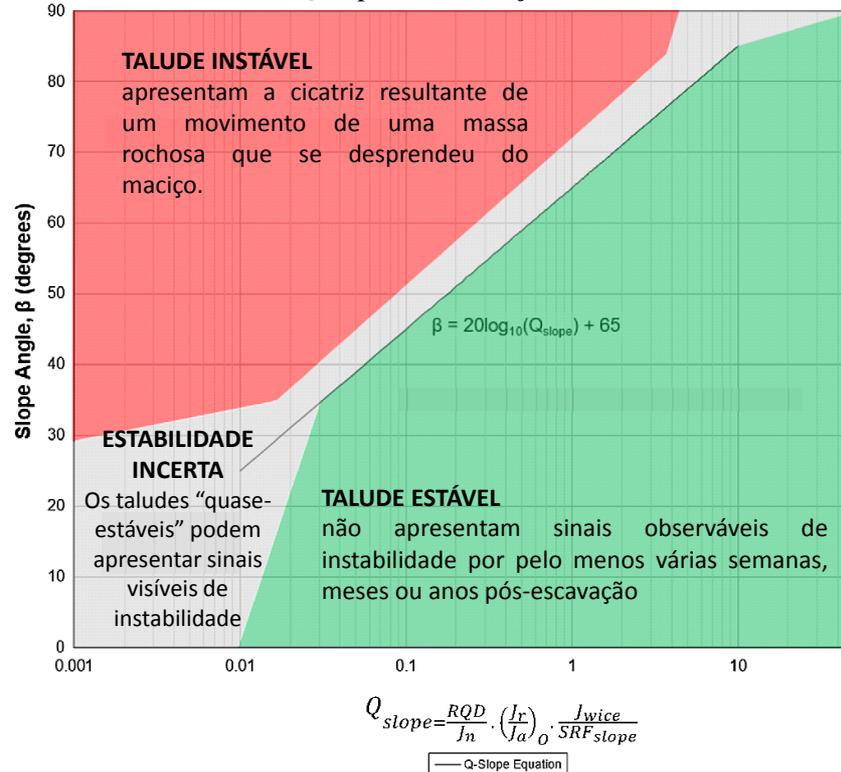


Figura 1 – Gráfico de estabilidade de talude baseado no Q-slope (Bar e Barton, 2015)

Bar e Barton (2017) também desenvolveram a equação 3 para calcular o ângulo máximo de mergulho (β) que determinado talude pode permanecer estável sem a necessidade de tratamento. Esta equação, é válida somente para taludes com mergulhos superiores a 35° e inferiores a 85°.

$$\beta = 20 \log(Q_{slope}) + 65 \quad (3)$$

Na fórmula, β significa o ângulo que determinado talude apresenta 1% de probabilidade de ruptura. Para os autores, isso é suficiente para classificar o talude como sendo estável, ou seja, que não apresentam sinais observáveis de instabilidade por pelo menos várias semanas, meses ou anos pós-escavação (Bar e Barton, 2015). Se um talude apresenta um mergulho real maior do que β , isso indica que esse talude pode ser *quasi*-estável ou rompido.

4 Coleta de Dados

A técnica de *scanline*, ou linha de varredura, confere uma sistemática e um melhor controle na obtenção dos dados das discontinuidades, e por esse motivo é considerada uma boa técnica de campo (Brown e Brady, 2004). O método do *scanline*, conforme descrito por Piteau (1970) e Brown e Brady (2004), foi executado em 13 taludes, sendo 10 localizados na mina do Vau Novo, situada no município de Santana do Parnaíba, e em 3 taludes no Bairro Jardim Trujillo, Sorocaba, todos no estado de São Paulo.

Os dados fornecidos pelos *scanlines* foram processados de forma a se obter os vários parâmetros que os sistemas SMR e Q-slope exigem para os cálculos de seus índices, como: persistência, espaçamento, Rock Quality Designation (RQD, Deere, 1967), número de famílias de discontinuidades, tipo de ruptura e suas respectivas famílias condicionantes.

5 Correlação entre os métodos SMR e Q-slope

Em estatística, correlação significa uma relação entre duas variáveis que exiba dependência, podendo ser expressa por uma função.

Neste estudo, foi feita a análise de regressão linear, através do método dos mínimos quadrados, para verificar a existência de uma relação de dependência entre os índices de qualidade de rocha SMR e Q-slope, por meio da confecção de um diagrama de dispersão e da obtenção da reta de regressão linear.

Para estimar a força desta correlação, foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2), que varia entre 0 e 1. Este coeficiente é uma medida descritiva da porcentagem da variação de y, que pode ser explicada por variações em x, segundo modelo de regressão especificado. Foram correlacionados os índices SMR e Q-slope, além da razão entre β , calculado segundo definido pelo Q-slope, e o respectivo ângulo de inclinação do talude amostrado.

Os índices SMR e Q-slope calculados para os taludes da mina do Vau Novo foram analisados utilizando a análise de regressão linear e o coeficiente de determinação (R^2). A análise resultou em um gráfico de dispersão de escala logarítmica que relaciona os índices SMR e Q-slope (Figura 2).

Da análise de correlação pode se concluir que os índices SMR e Q-slope se correlacionam segundo a reta e a equação de melhor ajuste é a que obedece a equação abaixo:

$$y = 7,0196 \ln(x) + 67,324 \quad (4)$$

Para os índices aqui analisados esta equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$SMR = 7,0196 \ln(Qslope) + 67,324 \quad (5)$$

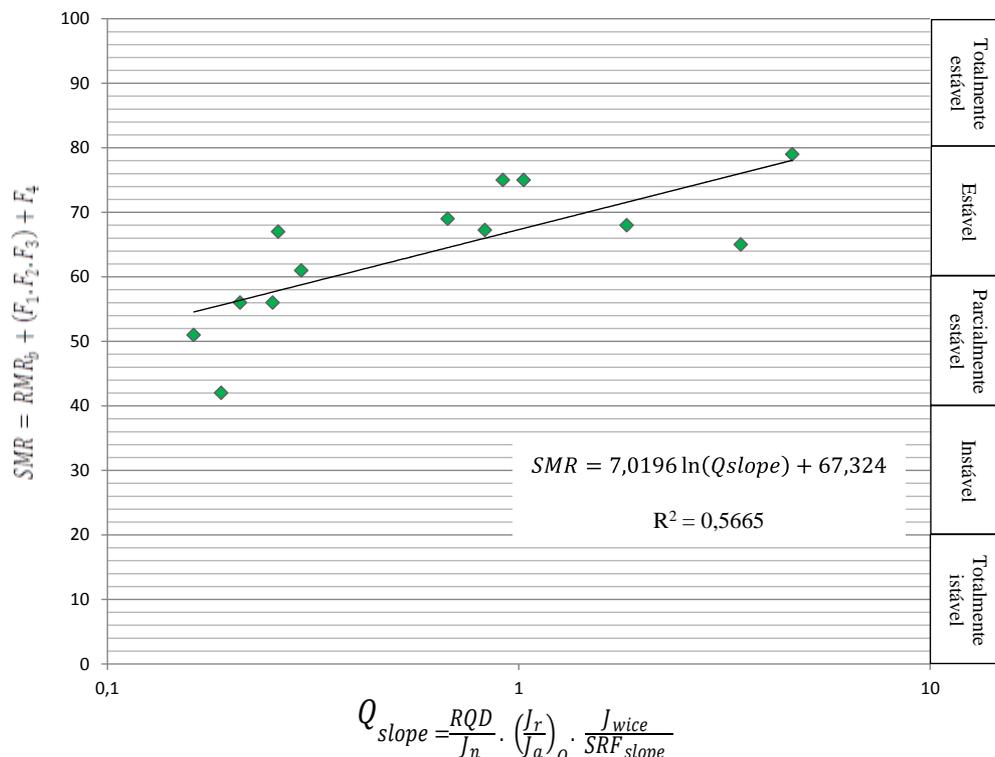


Figura 2 – Correlação logarítmica entre SMR e Q-slope

O coeficiente de determinação (R^2) foi calculado para essa equação como sendo 0,5665, isso significa que a equação da reta consegue satisfazer 56% dos resultados.

Jorda-Bordehore et al. (2018) realizaram esse mesmo tipo de análise para 57 taludes em diferentes partes do mundo, de litologias e modos de rupturas distintos, (Figura 3). Tal estudo obteve a equação 6:

$$SMR = 7,4219 \ln(Q_{slope}) + 47,196 \quad (6)$$

Esta equação representa a linha de melhor ajuste que, segundo o coeficiente de correlação calculado para essa reta, satisfaz 42% dos resultados.

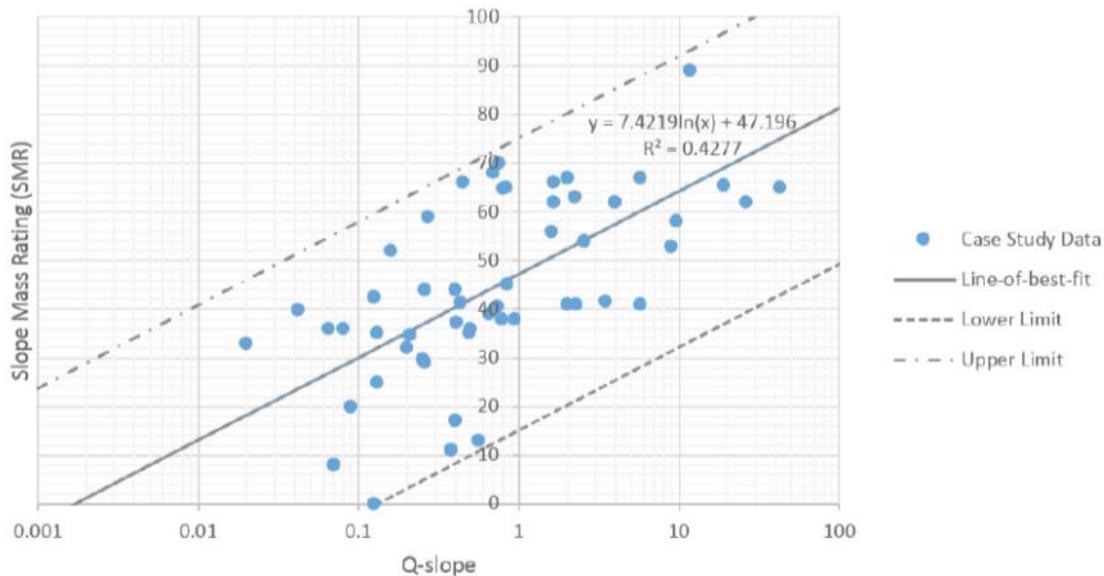


Figura 3 – Relação entre Q-slope e SMR (Jorda-Bordehore et al., 2018)

Entretanto, correlacionar os dois métodos desta maneira não permite comparar o comportamento dos maciços rochosos estimados por cada um dos diferentes métodos, pois o valor do Q-slope (equação 2) por si só, não traz um significado a respeito da estabilidade do talude. Esse valor só adquire significado quando plotado no gráfico com o ângulo de mergulho do talude (Figura 1). Portanto, as equações 5 e 6 só conseguem expressar uma correlação entre os índices numéricos, não expressando adequadamente uma correlação entre as previsões de comportamento dos taludes rochosos entre os diferentes métodos. Isto é inadequado, pois dois diferentes métodos, que visam estimar e fornecer informações a respeito do comportamento de determinado maciço rochoso, submetido a determinada intervenção de engenharia, devem ser correlacionados numericamente de forma que a estimativa de comportamento inferido também seja levada em consideração.

Assim, com o objetivo de se obter uma correlação matemática entre os métodos SMR e Q-slope, de forma que a classificação de estabilidade do talude seja considerada, propõe-se a relação entre o valor do índice SMR com a razão entre o ângulo ideal (β), calculado pela equação 3, pelo ângulo real, medido em campo. Pode-se dizer que essa razão funciona como um índice, onde valores maiores que 1 indicam um talude estável, valores entre 1 e 0,90 indicam um talude com comportamento incerto e taludes com valores menores que 0,90 indicam taludes com comportamento instável. Entretanto este índice só é aplicável para taludes com inclinação maior que 35° e menor que 85°. Isto porque este é o intervalo em que o cálculo de β é válido.

Realizando a análise de correlação entre o índice SMR e a razão entre o ângulo ideal (β) pelo ângulo real, temos que a melhor equação que os relaciona é uma equação polinomial e segundo grau (Figura 4)

$$y = -43,168x^2 + 115,98x - 5,6625 \quad (7)$$

Na equação 7 y representa o SMR e x representa a razão entre β e o ângulo real do talude amostrado.

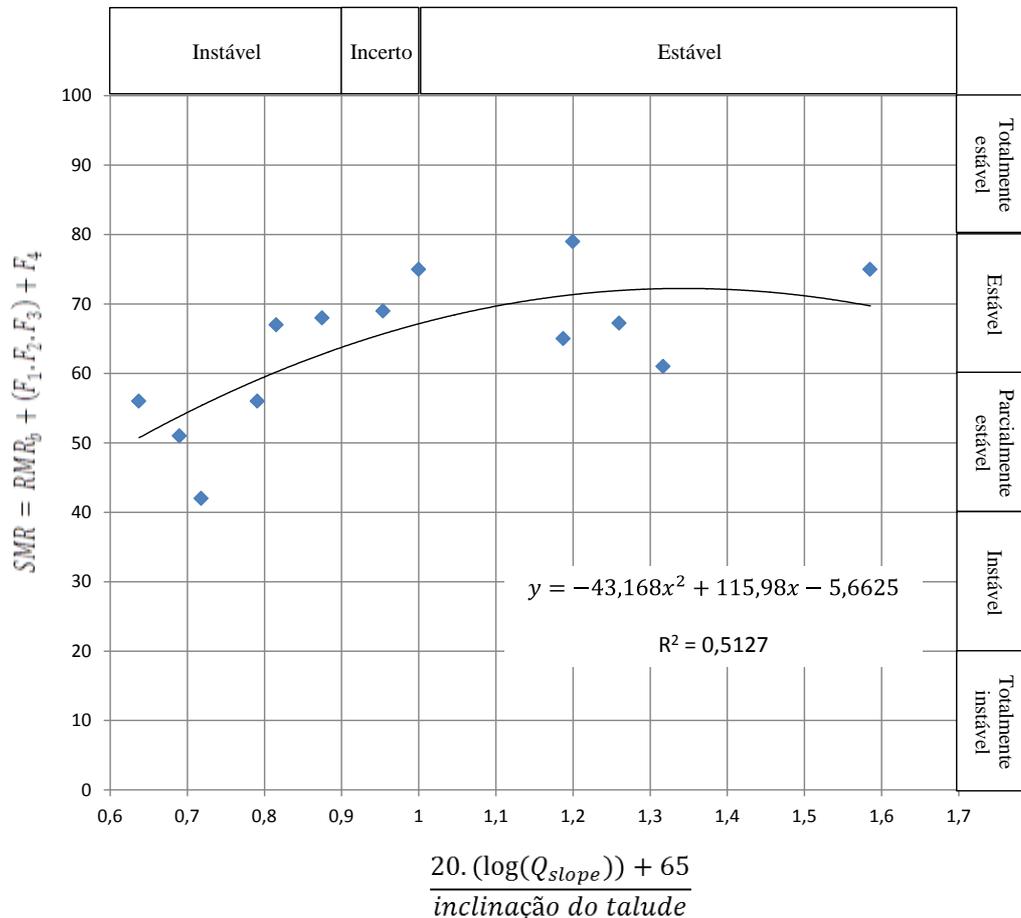


Figura 4 – Correlação polinomial entre o índice SMR e a razão entre β e o ângulo do talude amostrado

O coeficiente de determinação calculado para essa equação foi de 0,5127, o que significa que a fórmula acima explica 51% dos dados.

6 Discussão

As fórmulas matemáticas 5 e 6 definidas, respectivamente, por este estudo e por Jorda-Bordhore et al. (2018), são equações logarítmicas. Baseado na comparação com o coeficiente de determinação calculado para estas equações com o mesmo coeficiente obtido por outras referências bibliográficas é possível afirmar que ambas correlacionam os índices SMR e Q-slope de forma satisfatória.

A fórmula 7 é uma equação polinomial, que possui o coeficiente menor do que a fórmula 5 e maior do que a encontrada na fórmula 6, entretanto esta equação, diferentemente das demais, consegue correlacionar os métodos levando em consideração os índices de qualidade de maciço de cada um dos métodos, e a previsão de estabilidade dos maciços.

Estes dois métodos de classificação aqui estudados, apresentam diferenças conceituais significativas, enquanto o SMR se propõe a sugerir tipos de tratamento e suporte para determinado talude, o Q-slope preocupa-se em determinar o ângulo de inclinação que determinado talude deve ter para que não precise receber nenhum tipo de tratamento e suporte. Para o Q-slope um talude só pode ser considerado estável quando ele apresenta probabilidade de ruptura de 1%, ou seja, não requer a instalação de nenhum tipo de suporte, já para o SMR, um talude pode ser considerado estável quando este possui até 20% de probabilidade apresentar rupturas de alguns blocos, portanto, segundo a Figura 5 (Romana 1985), tal talude é passível de receber intervenções, como: pregagens, ancoragens, valas de pé de talude e redes metálicas.

Assim, os métodos abordam a estabilidade de forma diferente e por isto adotam entendimentos distintos para os conceitos “talude estável” e “talude instável”. Utilizando o índice SMR e o novo índice constituído pela razão entre o ângulo ideal (β) pela inclinação real do talude a Figura 5 ilustra esquematicamente esta diferença de conceitos.

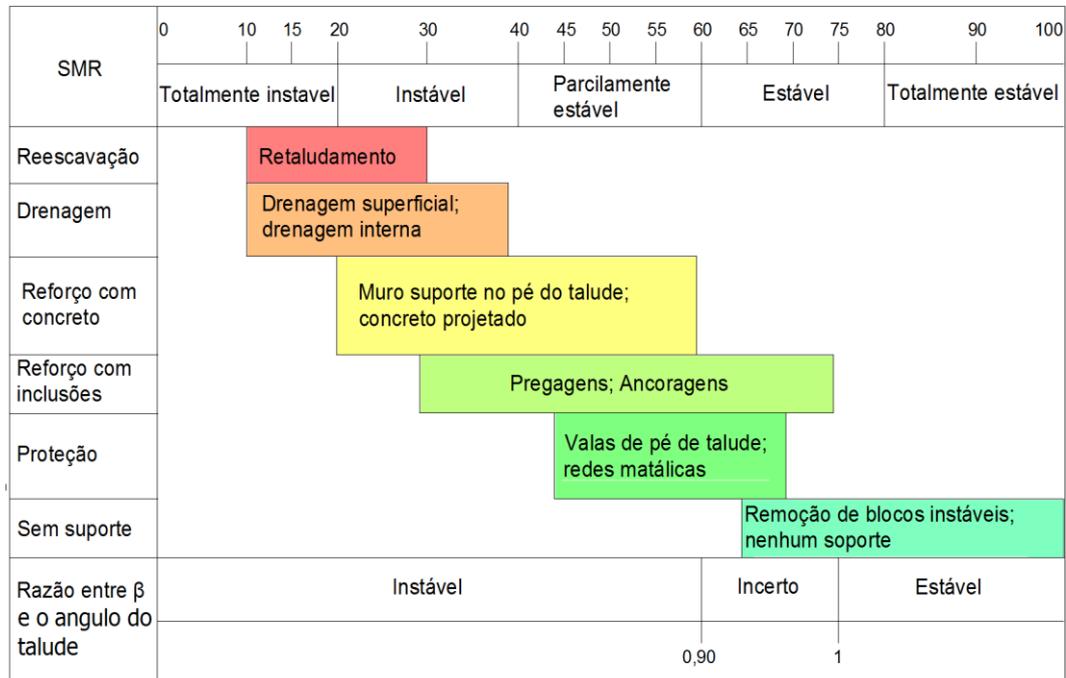


Figura 5 – Ilustração esquemática da sobreposição de conceitos adotados pelos métodos SMR e Q-slope (modificado de Romana, 1985)

7 Conclusões

Diferentes métodos de classificação de maciços rochosos usam diferentes formas para avaliar e interpretar o comportamento destes maciços perante determinada intervenção de engenharia. Portanto é importante correlacionar tais metodologias de forma quantitativa e qualitativa.

Este trabalho propõe que a correlação entre os métodos SMR e Q-slope seja realizada utilizando a fórmula abaixo:

$$y = -43,168x^2 + 115,98x - 5,6625 \quad (r^2 = 0,5127) \quad (8)$$

Onde y representa o SMR e x representa a razão entre β e o ângulo de inclinação do talude amostrado.

Esta equação, válida para taludes com inclinação entre 35° e 85° , além de permitir analisar os métodos SMR e Q-slope de forma quantitativa, conforme ilustrado na Figura 4, também possibilita correlacionar as estimativas de comportamento do talude de cada um destes métodos, segundo a Figura 5.

Para que as análises futuras dos taludes rochosos se tornem mais robustas, mais dados em diferentes taludes, em diferentes contextos geológicos, são necessários para aprimorar e compreender melhor a correlação entre os métodos SMR e Q-slope, possibilitando analisar a estabilidade de taludes a partir de duas abordagens diferentes, o que seria muito vantajoso do ponto de vista da geologia de engenharia.

AGRADECIMENTOS

Especial agradecimento aos Eng Luis Espinhal, Eng Clory Pacheco dos Santos e toda a equipe da mineradora Geocal, que forneceram suporte primordial para a realização deste trabalho.

Gostaríamos de agradecer também à agência de fomento CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo patrocínio deste projeto

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bar, N., and Barton, N. (2017) The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering: Rock Mechanics and Rock Engineering, v. 50, p. 3307–3322, doi:10.1007/s00603-017-1305-0.
- Barton, N., and Bar, N. (2015) Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects. *EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium.*, p. 157–162.
- Barton, N., Lien, R., and Lunde, J. (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, v. 6, p. 189–236, doi:10.1007/BF01239496.
- Bieniawski, Z. T. (1976) Rock mass classification in rock engineering applications, *Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering*, p. 97–106, <https://ci.nii.ac.jp/naid/80014931500/>.
- Bieniawski, Z.T. (1973) Engineering Classification of Jointed Rock Masses. *Civil Engineer in South Africa*, v. 15, p. 343–353, doi:http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(74)92075-0.
- Brown, B.H.G., and Brady, E.T., 2004, *Rock Mechanics for underground mining*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 645 p., doi:10.1007/978-1-4020-2116-9.
- Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D., and Cording, E.J. (1967). Design of surface and near surface constructions in rock (C. Fairhurst, School of Mineral and Metallurgical Engineering, & University of Minnesota, Eds.). *Failure and Breakage of Rock*, p. 237–302.
- GeoEng2000 Workshop, (2001) The Reliability of Rock Mass Classification Used in Underground Excavation and Support Design. *ISRM NEWS*, v.6, p.40–41, <https://www.isrm.net/fotos/gca/1332114828isrm_newsjournal_2001_volume_6_number_3_web.pdf>. Acesso em 15 dez. 2019.
- Jorda-Bordehore, L., Bar, N., Gonzáles, M., C., Guill, A., R., Jover, R., T. (2018) Stability Assessment of Rock Slopes Using Empirical, in Congresso Internacional de Energía y Recursos Minerales, 14, Seville. *Proceedings..Spain*.
- Piteau, D. (1970) Geological factors significant to the stability of slopes cut in rock., in S. Af Inst. Min. Met., Syrup. Planning Open Pit Mines, Johannesburg., South African Institute of Mining and Metallurgy, p. 33–53.
- Romana, M. (1985) New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In: International Symp. on the role of rock mechanics in excavations for mining and civil works. *Proceedings.. ISRM, Zacatecas*, p. 49–53.