

# ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM TALUDES ROCHOSOS PELO MÉTODO Q-SLOPE NO MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL/RS

*Data de submissão: 02/05/2023*

*Data de aceite: 02/06/2023*

### **Vitor Brandão Veloso**

Universidade Federal do Pampa –  
UNIPAMPA  
Caçapava do Sul – RS  
<http://lattes.cnpq.br/4443218617142832>

### **Diogo Peixoto Cordova**

Universidade Federal do Pampa –  
UNIPAMPA  
Caçapava do Sul – RS  
<http://lattes.cnpq.br/2354744565105719>

**RESUMO:** O presente trabalho teve como objetivo classificar um maciço rochoso pelo método Q-Slope, indicando ângulos favoráveis ao talude. Os resultados mostraram que das nove faces analisadas, cinco apresentaram-se estáveis e quatro apresentaram-se instáveis ao método. O método mostrou-se uma ferramenta prática e eficiente para os maciços rochosos pouco alterados e homogêneos, mostrando resultados aplicáveis na prática. Entretanto, para determinações em casos mais complexos, como em taludes compostos por saprólitos, o resultado apresentou alguma discrepância entre os ângulos de face recomendados e aplicabilidade real desses ângulos. Isto é evidenciado

principalmente na face W01 onde o ângulo indicado de 25° é praticamente o ângulo de repouso de materiais inconsolidado, como solos arenosos. Desta forma se sugere que nos casos mais complexos o método Q-Slope deve ser usado juntamente com outros métodos de classificação para a descrição detalhada e uma avaliação mais condizente com a realidade do problema.

**PALAVRAS-CHAVE:** métodos empíricos, estabilidade de taludes, classificação geomecânica.

### SLOPE STABILITY ANALYSIS USING Q-SLOPE METHOD IN THE CITY OF CAXIAS DO SUL/RS

**ABSTRACT:** The present work aimed to perform an analysis of the geomechanical properties that drive the structural behavior of the slope, in relation to its stability, as well as classify the rock mass by the Q-Slope method, indicating favorable angles to the slope face. The study area corresponds to rock slopes in the city of Caxias do Sul/RS. The results showed that of the nine analyzed faces, five were stable and four were unstable to the method. With the application of the method, it was possible to indicate favorable angles to the slope

faces. The method proved to be a practical and efficient tool for rock masses little altered and homogeneous, showing results applicable in practice. However, for determinations in more complex cases, such as slopes composed of saprolites and poor rock, the result showed some discrepancy between the recommended face angles and the real applicability of these angles. This is evidenced mainly in the face W01 where the indicated angle of 25 degrees is practically the angle of repose of unconsolidated materials, as sand soils. Thus, it is suggested that in more complex cases the Q-slope method should be used together with other classification methods for a detailed description and an assessment more consistent with the reality of the problem.

**KEYWORDS:** *empirical methods, slope stability, geomechanical classification.*

## 1 | INTRODUÇÃO

Na implantação de loteamentos residenciais, um dos pontos mais observados é a viabilidade geotécnica, pois áreas com altos declives, como encontrado em regiões serranas, podem necessitar de modificações no relevo da área gerando gastos que podem inviabilizar o projeto.

Para Borsatto (2011), a cidade de Caxias do Sul/RS sofre com problemas geotécnicos decorrentes da dinâmica social, geomorfologia e devido às características das rochas e estruturas geológicas que compõem o subsolo urbano. A cidade faz parte dos 959 municípios que possuem histórico de registros de desastres naturais em decorrência de movimentos de massa e ou processos hidrológicos e são monitorados pelo CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais). Esses registros incluem deslizamentos de encosta, queda e rolamento de blocos rochosos e processos erosivos (CEMADEN, 2021).

O tema observado no mundo todo motivou pesquisadores a se dedicarem em desenvolver métodos para classificar e avaliar as condições geotécnicas, a fim de que se proceda com medidas a prevenir, impedir ou mitigar qualquer risco eminente e se obter um cenário seguro principalmente no que diz respeito à vida das pessoas.

Dentre os métodos empíricos mais utilizados no mundo, está o sistema de classificação de maciços rochosos RMR (*Rock Mass Rating*), desenvolvido por Bieniawski (1976, 1989) e o sistema Q de Barton (1976) que foram empregados largamente em análise de maciços rochosos no ramo da mineração e construções de túneis. Esses métodos sofreram adaptações com o passar dos anos, no entanto, sempre houve uma carência de análise que predita ajuste no ângulo do talude de forma prática e que evita o retrabalho por corte em ângulos inadequados (BAR e BARTON, 2017). Assim, Barton e Bar (2015) introduziram o método Q-Slope para suprir essa carência. O método é derivado de adaptações no sistema Q de Barton, utilizado há mais de 40 anos na mineração e em construções de túneis. O método foi concebido para avaliar cortes em rocha de forma a possibilitar um ajuste no ângulo do talude a partir da análise empírica da face exposta.

O RQD (*Rock Quality Designation*) é o primeiro parâmetro analisado tendo sido

desenvolvido por Deere em (1967), baseado na verificação de fraturas em testemunhos de sondagem. Mais tarde, Priest e Hudson (1976), apresentaram uma forma de se estimar o valor do RQD por meio da medida do espaçamento das discontinuidades na face do talude, o que definiram como RQD', técnica que será utilizada nesse trabalho.

Os parâmetros  $J_n$ ,  $J_r$  e  $J_a$  continuam praticamente inalterados do clássico sistema Q, porém no Q-Slope pode-se atribuir à razão ( $J_r/J_a$ ) o fator "O" que corresponde à orientação e pode ser aplicado para cada lado de uma possível ruptura em cunha já o  $J_w$  e SRF foram os parâmetros mais modificados, estando agora atribuídos às condições ambientais que atuaram sobre o talude e os fatores que reduzem à resistência a ruptura (BAR e BARTON, 2017).

Neste trabalho cada um dos parâmetros supracitados, foi determinado a partir do levantamento sistêmico das discontinuidades do talude pelo método de *Scanline*, descrito em Brady e Brown (1985).

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal determinar as propriedades geomecânicas que conduzem o comportamento estrutural de um talude rochoso, a respeito de sua estabilidade e classificar o maciço pelo método Q-Slope indicando os maiores ângulos que podem ser adotados para as faces dos taludes. Para cumprir com o objetivo geral, foi necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Levantamentos de discontinuidades do maciço rochoso;
- Determinar as propriedades geotécnicas em ensaios in situ;
- Identificar o mecanismo de ruptura, se planar, cunha, de tombamento ou circular;
- Classificar o maciço rochoso no sistema Q-Slope e indicar ajustes nos ângulos de talude.

## 1.2 Área estudo de caso

Localizada a sul do perímetro urbano do município de Caxias do Sul, no estado do Rio Grande do Sul, a área do estudo (Figura 1) corresponde a quadra 5828, da Estrada do Imigrante no bairro Nossa Senhora das Graças.

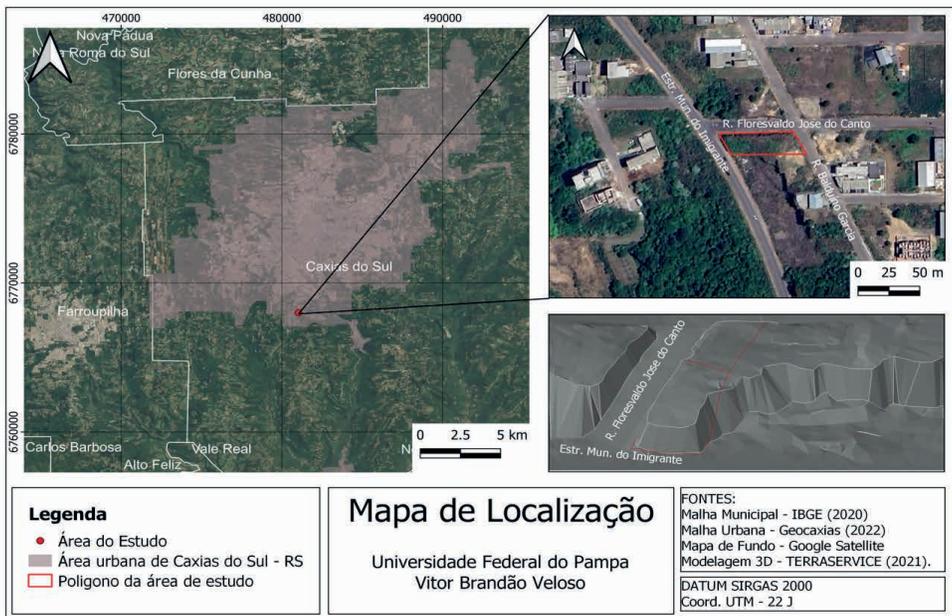


Figura 1. Mapa de Localização da área do estudo.

De acordo com levantamento aerofotogramétrico (Figura 2) realizado nos anos de 2011 e 2018 disponibilizadas pela Prefeitura Municipal de Caxias do Sul, no sítio eletrônico GeoCaxias, é possível observar por meio de imagens históricas, os cortes dos taludes para implantação do Projeto Urbanístico.



Figura 2. Imagens mostrando a evolução dos cortes ao longo dos anos gerando o talude. – Portal GeoCaxias.

## 2 | GEOLOGIA

A geologia regional da área corresponde à porção sudeste da Bacia do Paraná. De acordo com Zalán et al. (1987) a bacia teve acumulação de rochas sedimentares e vulcânica entre o siluriano e o cretáceo, sobre a bacia está a Formação Serra Geral, que representa umas das maiores manifestações vulcânicas do mundo, segundo Nardy, Machado & Oliveira (2008).

O município de Caxias do Sul está inserido na unidade geológica Formação Serra Geral, que recobre toda a metade norte do Estado do Rio Grande do Sul, e é representada por uma sucessão de derrames de lavas. São aflorantes no município, rochas vulcânicas dessa formação e arenitos da Formação Botucatu (BRESSANI et al., 2005).

No município de Caxias do Sul, segundo classificação geoquímica e lito estratigráfica de Nardy, Machado e Oliveira (2008), ocorrem rochas da Fácies Caxias e Gramado. Posteriormente, tais fácies foram subdivididas para unidades geológico - geotécnicas, segundo o Mapa de Unidades Geotécnicas da Área Urbana do Município de Caxias do Sul, visto nas (Figura 3) (BORSATTO, 2011 *apud* BRESSANI et al, 2005). Na área estudada, afloram apenas rochas da Fácies Caxias, caracterizadas por coloração cinza, por vezes, vermelho acastanhado, afírica, com textura variando de hipohialinas a holohialinas e aspecto “sal & pimenta”, variando de intermediárias à ácidas.

Bressani et al. (2005) descreve que as rochas dessa unidade apresentam um

aspecto maciço com disjunções tabulares medindo cerca de 30 cm de espessura. Também foram observados estratos tabulares sub-horizontais na porção basal dessa unidade, com espessuras de 5 a 30 cm.

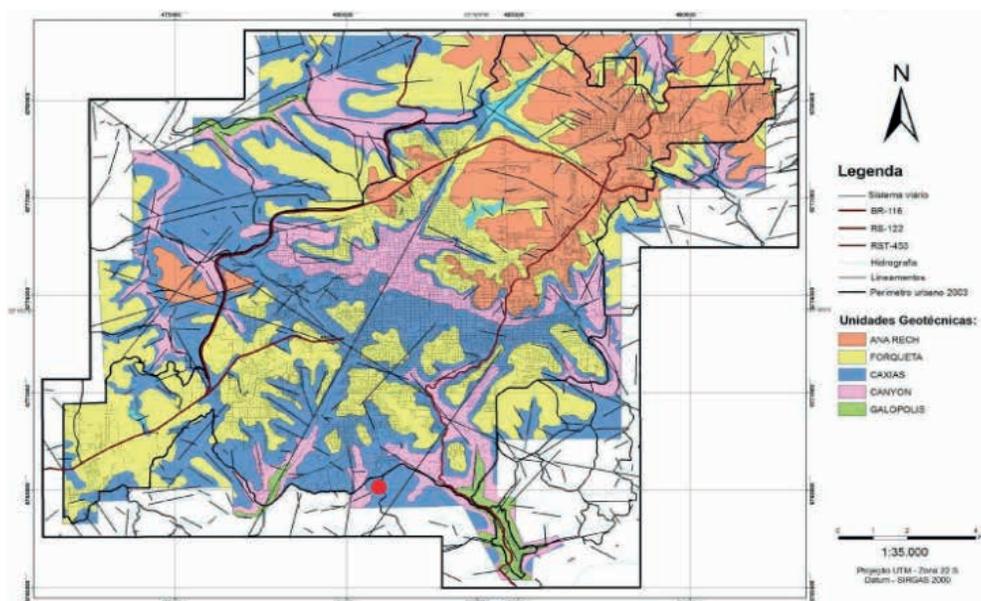


Figura 3. Mapa geológico-geotécnico de Caxias do Sul - Adaptado de (BORSATTO et al., 2012).

### 3 | O MÉTODO Q-SLOPE

Bar & Barton (2015) 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 saprólitos desses tipos de rocha. De acordo com os autores, a proposta do *Q-Slope* é permitir que os engenheiros geotécnicos tivessem acesso em campo, às condições de estabilidade de taludes escavados em rocha (Figura 4), 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 face em minas a céu aberto, mas também pode ser empregado em obras de engenharia civil (BAR; BARTON, 2017).

O método *Q-Slope* requer a atribuição de classificações para designação de qualidade de rocha *RQD*, número de família de discontinuidades *J<sub>n</sub>*, número de rugosidade *J<sub>r</sub>* e número de alteração da junta *J<sub>a</sub>*, que permanecem inalterados do sistema Q (Barton et al., 1974).

$$Q_{slope} = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_0 \times \frac{J_{wice}}{SRF_{slope}} \quad (1)$$

A qualidade do maciço rochoso no *Q-Slope* pode ser considerada uma função de três parâmetros, que são medidas brutas de:

Tamanho do bloco	$\left(\frac{RQD}{J_n}\right)$	(2)
Resistência ao cisalhamento ou	$\left(\frac{J_r}{J_a}\right)$	(3)
Resistência ao cisalhamento médio, no caso de cunhas	$\left(\frac{J_r}{J_a}\right)_1 \times \left(\frac{J_r}{J_a}\right)_2$	(4)
Fatores externos e estresse	$\left(\frac{J_{wice}}{SRF_{slope}}\right)$	(5)

Já a resistência ao cisalhamento é dada pela equação (6) a seguir:

$$\tau \approx \sigma_n \tan^{-1} \left(\frac{J_r}{J_n}\right) \quad (6)$$

Barton e Bar (2015) desenvolveram uma fórmula simples para avaliar as condições de estabilidade de um talude rochoso a partir do método *Q-Slope*, assim deve-se dispor de dois valores: o valor do *Q-Slope* e o valor de  $\beta$ , sendo este o ângulo de inclinação do respectivo talude.

$$\beta = 20 \log_{10} Q_{slope} + 65^\circ \quad (7)$$

Caso o talude já tenha sido escavado e o objetivo seja avaliar a sua estabilidade pelo método, o valor de  $\beta$  a ser utilizado será o ângulo de inclinação do talude no momento da avaliação. Para os casos em que se deseja realizar uma retroanálise ou conhecer a maior inclinação possível para que o talude seja classificado como estável, os autores propõem a Equação 7.

Considerando apenas os taludes quase estáveis, ou seja, que o resultado do *Q-Slope* se encontra na zona de incerteza na probabilidade de falha (PoF) pode ser calculada.

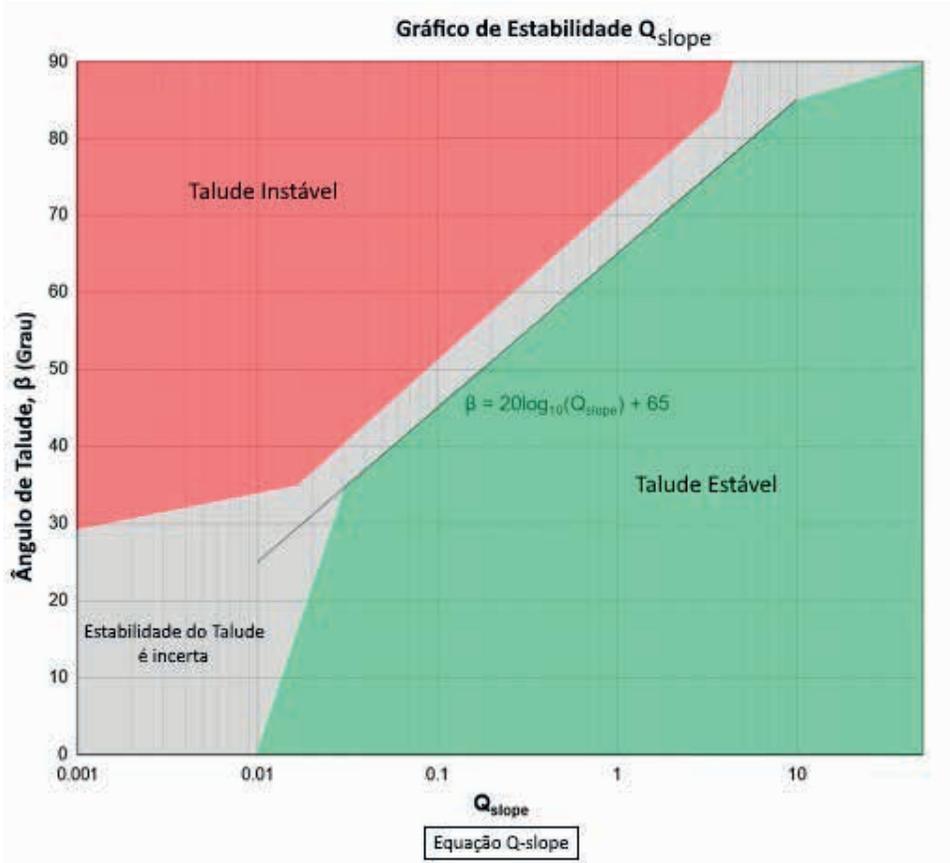


Figura 4. Gráfico de estabilidade *Q-Slope* - Modificado de Barton e Bar 2015.

#### 4 | MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada consistiu na divisão do talude em nove faces (Figura 5) onde foram realizados levantamentos das descontinuidades pelo método de *Scanline*, descrito em Brady e Brown (1985). As alturas dos taludes são apresentadas nos perfis de elevação: A-A', B-B', C-C' e D-D' (Figura 6).

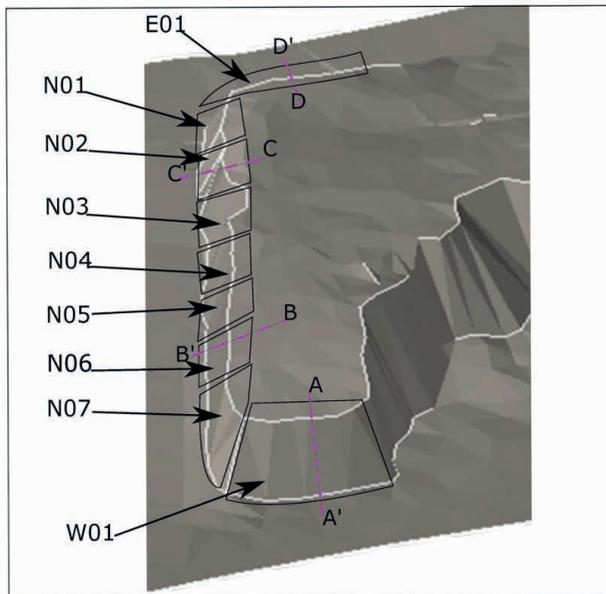


Figura 5. Divisão dos taludes em faces e indicativo dos locais dos perfis de elevação.

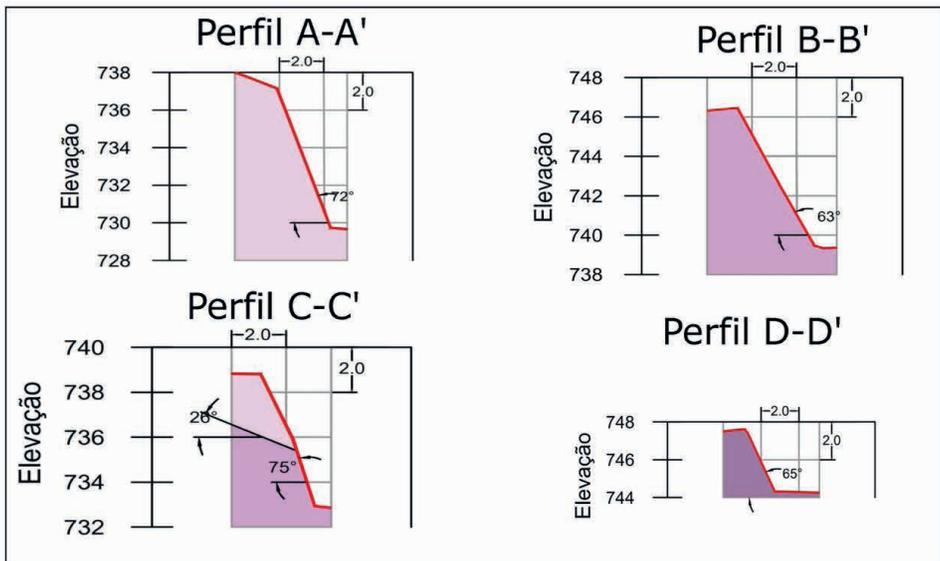


Figura 6. Perfis de elevação.

Em detalhe, foram determinados o *Rock Quality Designation* modificado (RQD'), análise cinemática para a identificação dos mecanismos de ruptura, grau de alteração das paredes das famílias de discontinuidades e análises dos fatores externos que influenciam na estabilidade dos taludes.



Figura 7. Levantamento de campo do dia 19/02/2022.

Foram desempenhados os dias 18/12/2021 e 19/02/2022 para a coleta de dados em campo (Figura 7) e os dados foram registrados em planilha (Figura 8) previamente preparada para ao método *Q-Slope*. Os materiais utilizados em campo foram o martelo de *Schmidt*, rugosímetro (pente de Barton), tinta *spray*, trena de 30 metros de comprimento, martelo petrográfico, marreta, material de escritório e tabelas de consulta.

<b>Planilha para levantamento geotécnico Q-Slope</b>						
Data: ____/____/____		Nº da janela		Coord. (UTM)		
Tamanho Horizontal (m)		Strike Talude (°)		X		Y
Tamanho Vertical (m)		Ângulo do Talude (°)				
Estimativa de RQD'			<i>J<sub>wice</sub></i>	Ambiente úmido	Ambiente tropical	
Nº Total de Fraturas			Estrutura estável; rocha competente.	0.7 ( )	0.5 ( )	
Nº de fraturas por metro (λ)			Estrutura estável; rocha incompetente.	0.6 ( )	0.3 ( )	
RQD'			Estrutura instável; rocha competente.	0.5 ( )	0.1 ( )	
$RQD' = 100e^{-0.1\lambda} \times (0.1\lambda + 1)$			Estrutura instável; rocha incompetente.	0.3 ( )	0.05 ( )	
Parâmetros			$Q_{slope} = \frac{RQD}{Ja} \times \left(\frac{Jr}{Ja}\right)_0 \times \frac{J_{wice}}{SFR_{slope}}$			
<i>Ja</i> <sub>1</sub>	<i>Jr</i> <sub>1</sub>	Fator <i>O</i> <sub>1</sub>				
<i>Ja</i> <sub>2</sub>	<i>Jr</i> <sub>2</sub>	Fator <i>O</i> <sub>2</sub>				
SFRa	SFRb	SFRc	SFR SLOPE			
<i>Q<sub>slope</sub></i>						
Nº	Jn / Fator O		Jwice		Jr	Ja
	Mergulho (°)	Strike (°)	Martelo Schmidt	Orientação do martelo	Valor de acordo com a tabela 5	Valor de acordo com a tabela 1
1						
2						
3						
4						

Figura 8. Planilha para levantamento geotécnico.

## 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

O trabalho buscou descrever e interpretar características geotécnicas que induzem ao comportamento geomecânico dos taludes em questão e contou com a realização de levantamento de descontinuidades com foco nos parâmetros necessários na classificação *Q-Slope*.

Os resultados do *Q-Slope* mostram uma variação significativa, com valores decrescentes de leste a oeste da área de estudo, sendo o valor máximo para a face E01 com 9.80 e o valor mínimo 0.01 na face W01 (Figura 10). Após calcular o *Q-Slope* para cada face do talude, foi possível plotar no gráfico (Figura 9) que relaciona o resultado com o ângulo do talude. Desta forma, as faces N05, N06 N07 e W01 caíram no campo de instabilidade.

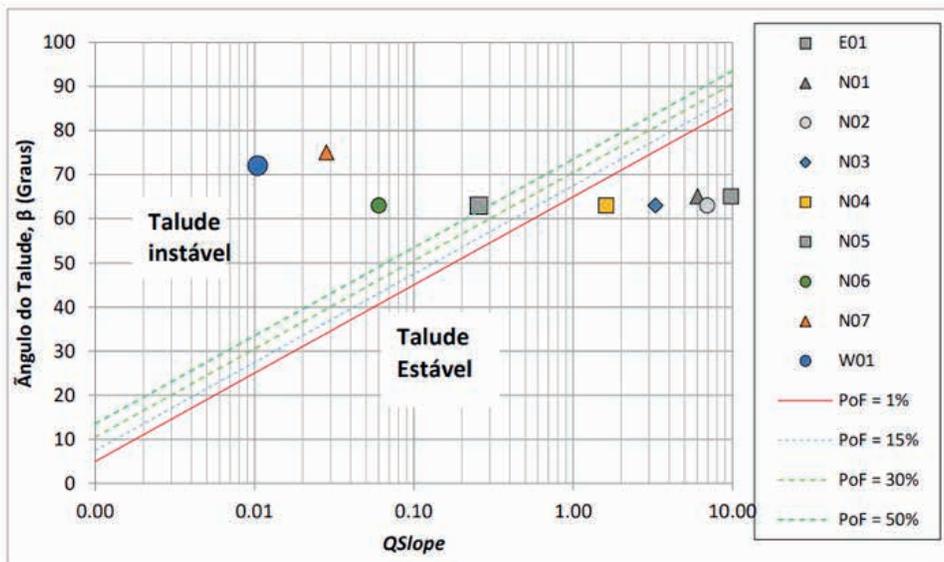


Figura 9. Resultados plotados no gráfico relacionando *Q-Slope* e o ângulo das faces do talude.

As avaliações também mostraram que as faces E01, N01, N02, N03 e N04, encontram-se estáveis de acordo com método *Q-Slope*. Esses resultados refletem coerência com as características geotécnicas observadas em campo, pois nessas faces as rochas são competentes, isto é, apresentam alta resistência quanto a rocha intacta. As faces E01 e N01 apresentam rochas pouco alteradas, as discontinuidades são fechadas e sem preenchimento ou quando ocorre são arenosos, todavia observa-se nas faces N02, N03 e N04 blocos soltos e de menores tamanhos, esse aspecto reflete as condições físicas do talude, classificada no parâmetro SRFa.

A partir da análise cinemática de estabilidade dos taludes que foi aplicada nas faces onde a rocha é competente, foi identificado possível ruptura planar nas faces E01, N01, N02 e N03 e em cunha nas demais. No caso de ruptura em cunha, é possível observar que ocorrem situações passíveis de ruptura devido à verticalidade constante do *Dip* das discontinuidades com altos valores de ângulo, próximos a 80°, e variação constante no *Dip Direction*.



Figura 10. Comparativo de tamanhos de blocos entre as faces E01 e W01.

Em relação ao  $J_n$ , todo o talude apresenta mais que uma família de juntas, desta forma foi aplicada o fator O que representa a criticidade aplicada por cada família, variando em cinco classes de muito favorável até as situações que podem ocorrer falhas pontuais, entretanto nas faces N05, N06 e W01 o alto grau de alteração das rochas impossibilita o reconhecimento das famílias, essa situação foi considerada na classificação  $J_n$  e que corroborou para os resultados desses taludes apresentarem resultados tão abaixo da média.

Esses taludes foram escavados na rocha a partir do desmonte mecânico e com uso de explosivos, o que resultou no acúmulo de blocos soltos e descontinuidades aleatórias na face do talude que, em constante exposição às intempéries, vão alterando-se e se despreendendo do talude. A perturbação relacionada ao desmonte teve maior influência no parâmetro  $SRF_{slope}$ .

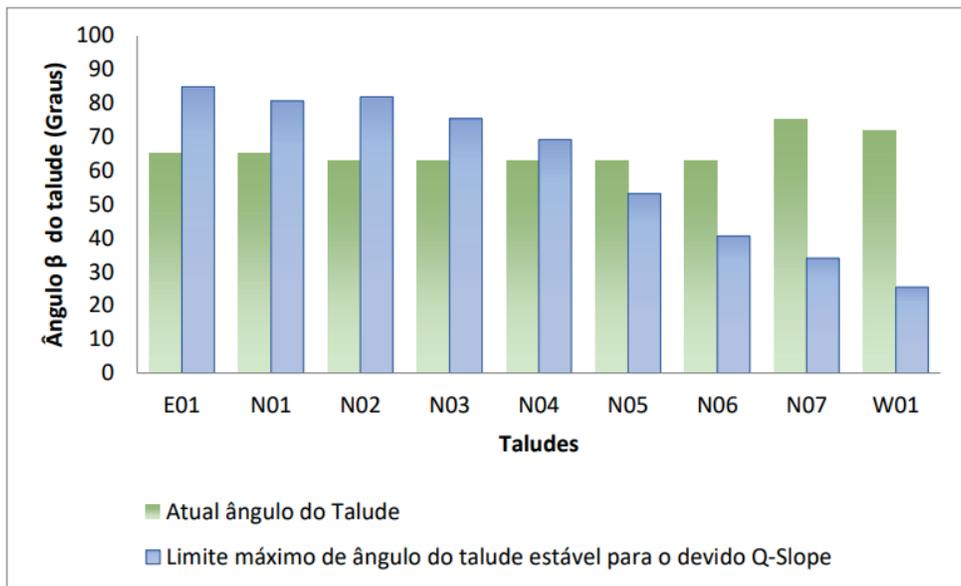


Figura 11. Comparativo entre os ângulos das faces na avaliação e o recomendado pelo método.

Após calcular o *Q-Slope* para cada face do talude, foi possível, a partir da (Equação 4) verificar ângulos os quais as faces com baixo valor de *Q-Slope*, tornam-se estáveis segundo o método. Desta forma, as faces N05, N06, N07 e W01 precisariam de um retaludamento para os ângulos de 53°, 40°, 34° e 25°, respectivamente (Figura 11). Esses resultados mostraram-se incoerentes com a realidade aplicável ao que se referem principalmente as faces N07 e W01 que apesar da baixa resistência da rocha e outros fatores, os ângulos sugeridos pelo método são ângulos extremamente baixos, considerando taludes rochosos ou até mesmo saprólitos.

## 6 | CONCLUSÕES

O método mostrou-se uma ferramenta prática e eficiente para definição de ângulos de face para maciços rochosos pouco alterados e homogêneos, mostrando resultados aplicáveis na prática. Para determinações em casos mais complexos, como em taludes compostos por saprólitos, o resultado foi muito conservador, considerando os ângulos recomendáveis aos taludes e aplicabilidade desses ângulos. Isto é evidenciada principalmente na face W01 onde o ângulo indicado de 25° é inferior ao ângulo de repouso de materiais inconsolidados, como taludes em solos arenosos.

Desta forma sugere-se que nos casos mais complexos, envolvendo baixos valores de *Q-Slope* o método deva ser usado com cautela e se possível em conjunto de outros métodos de análise, para a descrição detalhada e uma avaliação mais condizente com a realidade do problema.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. M.; HASUI, Y. (1984). *O Pré-Cambriano do Brasil*, São Paulo, 374 p.

BAR, N.; BARTON, NICK. (2017). **The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering**. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 50. 3307-3322.

BARTON N.; BAR N. (2015). **Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects**. In: Schubert W, Kluckner A Future development of rock mechanics; *Proceedings of the ISRM regional symposium, Eurock 2015 and 64th geomechanics colloquium*, Salzburg, 162 p.

BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. (1974). **Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support**. *Rock Mechanics*. Vol 6, pp. 189-236.

BIENIAWSKI, Z. T. (1989) *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering*. Wiley, New York.

BORSATTO, S. et al. (2012). **Mapeamento Geológico da Área Urbana de Caxias do Sul**. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, p. 83–92.

BORSATTO, S. (2011). *Contribuição ao estudo geológico-geotécnico da área urbana de Caxias do Sul - RS*. 97 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BRADY B. H. G.; BROWN E. T. (1999). **Rock mass structure**. *Rock Mechanics*. Springer, Dordrecht. PP. 46- 84.

BRESSANI, L. A.; FLORES, J. A. A.; NUNES, L. F., (2005). *Desenvolvimento de Estudos de Engenharia Geotécnica / Geologia com Vistas à Geração de Relatório e Mapa Geotécnico dos Solos e Rochas Superficiais da Área Urbana da Cidade de Caxias do Sul*. Caxias do Sul, Brasil: Contrato No 2615.000386 - 97/2004. Programa Habitar Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CAXIAS DO SUL, (2021). *Portal GeoCaxias – Mapa público*, disponível em <https://geopublico.caxias.rs.gov.br/geocaxias>. Acesso em: 19 set.2021.

CEMADEM, (2021). **Municípios monitorados**, disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/municipios-monitorados-2/>. Acesso em: 19 set.2021.

DEERE, D.; MILLER, R. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*. 1°. New Mexico: University of Illinois, p. 65- 116.

DEERE, D. U.; PATTON F.D. (1971). **Slope stability in residual soils**. *Proc 4th. Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. San Juan, vol. 1. Pg.98-170.

DEERE, D. U. (1964). **Technical description of rock cores for engineering purposes**. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 1, No. 1, p. 16-22.

FIORI, A. P.; GARMIGNANI, L. (2016). **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. São Paulo: oficina de Textos.

ISRM. (INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS). (1981). **Rock Characterization, Testing and Monitoring - ISRM Suggested Methods**. Londres: Pergamon Press.

PRIEST, S. D.; HUDSON, J. A. (1976). **Discontinuity spacings in rock**. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences; Geomechanics*, 13, p. 135–148.

RENNE, P. R., DECKART, K., ERNESTO, M., FERRAUD, G., PICCIRILLO, E. M., (1996). **Age of the Ponta Grossa Dike Swarm (Brazil) And implications to Parana flood volcanism**. *Earth and Planetary Science Letters*. p. 199 – 212.

TERRASERVICE, (2020). **Levantamento topográfico**, TERRASERVICE - Engenharia e geologia LTDA. Arquivo DXF, Caxias do sul.

VALLEJO, L. I. G. et al., (2002). **Geological Engineering**. Madri, Espanha: Pearson Educación.

ZALÁN, P. V. et al. (1987). **Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná**. *Atas do III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*. Curitiba, v. 1.