

Caracterização da Resistência de Descontinuidades em Maciços Rochosos Competentes

Soraia Bastos Katereniuk
Mestranda, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, eng.sbk@gmail.com

Alessander Christopher Morales Kormann
Professor, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, alessander@ufpr.br

Vitor Pereira Faro
Professor, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, vitorpereirafaro@gmail.com

RESUMO: O presente trabalho apresenta uma aplicação da envoltória de resistência de Patton para descontinuidades em maciços rochosos metasedimentares e gnáissico. O objetivo do presente artigo é compartilhar experiência e boas práticas nos processos que envolvem a definição de parâmetros para avaliações de estabilidade em taludes rochosos. De maneira geral, pode-se verificar boa aderência da envoltória aos dados dos ensaios de cisalhamento direto para os metarenitos, considerando a faixa de tensões normais até 500 kPa. Este seria o nível de tensões as quais os taludes seriam submetidos devido aos efeitos das escavações. Para esta faixa de tensões normais todas as envoltórias obtidas são conservadoras. Apesar poder se considerar haver algum superdimensionamento, lembra-se que com a exposição da face do talude rochoso devido às escavações e, posteriormente, com o enchimento do reservatório e, conseqüente presença de água no maciço rochoso, é razoável se esperar que haja alguma alteração nas paredes das descontinuidades e, por conseqüência, redução da resistência das mesmas. Deste modo, entende-se que a caracterização geológica e geotécnica do talude rochoso antes da escavação é de extrema importância para garantir a segurança, eficiência e sucesso da obra.

PALAVRAS-CHAVE: Descontinuidades, Estabilidade de Taludes, Taludes Rochosos.

ABSTRACT: The present paper presents an application of Patton's resistance envelope to discontinuities in metasedimentary and gneiss rock masses. The objective of this paper is to share experience and good practices in the processes that involve defining parameters for stability assessments in rock slopes. In general, good adhesion of the envelope to data from direct shear tests for metarenites can be seen, for the range of normal stresses up to 500 kPa. This would be the level of tension to which the slopes would be subjected due to the effects of excavations. For this range of normal stresses, all envelopes obtained are conservative. Although it may be considered that there is some oversizing, it is necessary to remember that with the exposure of the rock slope face due to excavations and, subsequently, with the filling of the reservoir and, consequent presence of water in the rock mass, it is reasonable to expect that there will be some change on the walls of the discontinuities and, consequently, a reduction on resistance. Therefore, it is understood that the geological and geotechnical characterization of the rock slope before excavation is extremely important to guarantee the safety, efficiency and success of the work.

KEYWORDS: Discontinuities, Slope Stability, Rock Slopes.

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de encostas rochosas é uma questão fundamental tanto em engenharia geotécnica quanto em geologia, pois está diretamente relacionada à segurança de comunidades, infraestruturas e do meio ambiente em geral. A segurança das escavações em rocha é influenciada por diversos fatores geométricos, tais como a altura e a inclinação dos taludes, a presença de descontinuidades ou planos de fraqueza, o nível freático, além da resistência e deformabilidade da rocha que compõe o maciço (VALLEJO et al., 2002).

Verifica-se, portanto, que o dimensionamento de escavações em rocha demanda um conhecimento aprofundado das características das descontinuidades, uma vez que a estabilidade é determinada pela resistência ao cisalhamento das paredes dessas feições e por sua orientação espacial ou atitude (BELL, 2007).

A investigação do comportamento dos materiais geotécnicos, juntamente com o estudo de técnicas construtivas apropriadas, desempenha um papel crucial na geração de conhecimento para o desenvolvimento de projetos que atendam às demandas da sociedade e que reduzam os riscos potenciais associados.

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicação de uma envoltória de resistência bi-linear para a caracterização da resistência de descontinuidades em maciços rochosos competentes, além de abordar as implicações correspondentes para a estabilidade de taludes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram avaliados 28 ensaios de cisalhamento direto executados com amostras de rocha provenientes do maciço da ombreira esquerda da barragem do Aproveitamento Hidrelétrico de Laúca, localizada na República de Angola.

O maciço rochoso do local é constituído em sua porção superior por rochas metassedimentares, seguido por um gnaiss alterado e gnaiss são em sua base. A seção geológica pelo eixo da barragem é apresentada na Figura 1 e legenda na Figura 2.

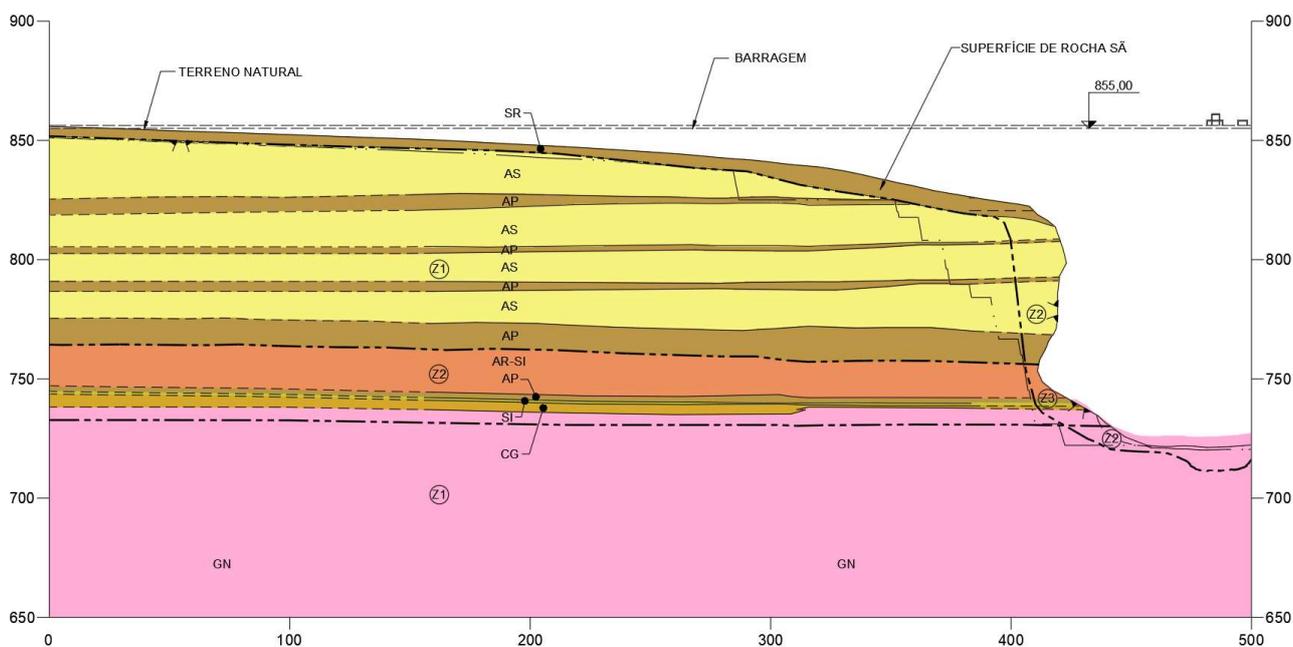


Figura 1. Seção geológica pelo eixo da barragem – Ombreira esquerda

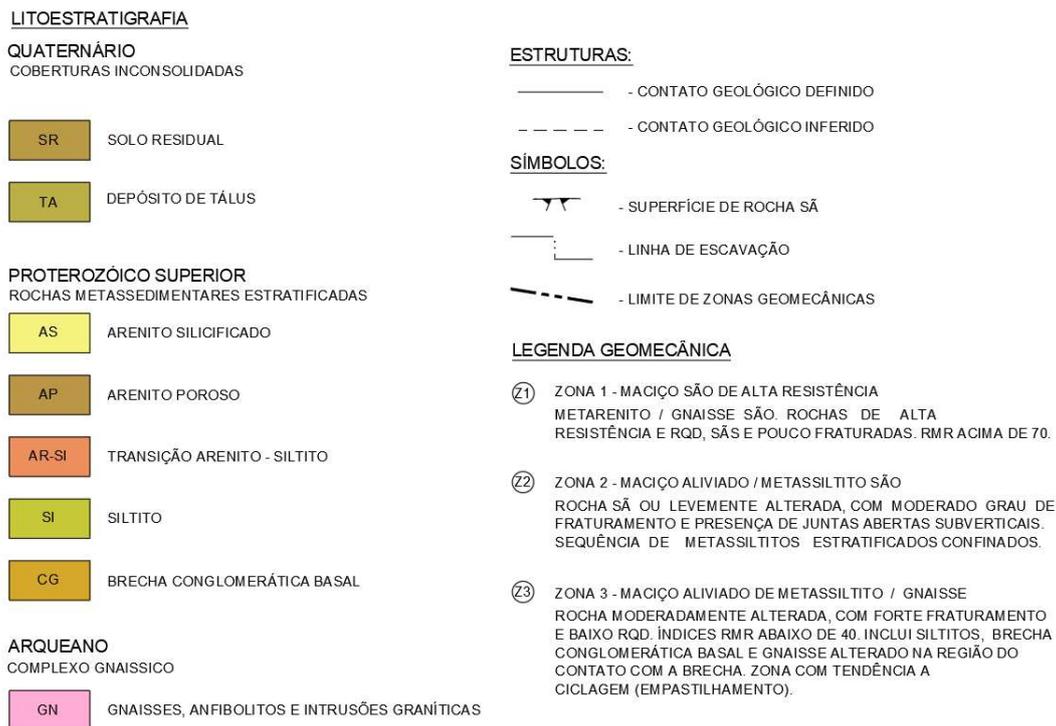


Figura 2. Seção geológica pelo eixo da barragem – Ombreira esquerda - Legenda

Os corpos-de-prova foram confeccionados a partir de testemunhos de sondagens rotativas. Foram ensaiadas as superfícies das descontinuidades naturais. Os ensaios foram realizados em uma prensa de bancada, com capacidade máxima de 40 kN de carga normal e 100 kN de carga cisalhante. Preconizou-se a realização dos ensaios com tensões normais de 250 kPa, 500 kPa, 1000 kPa e 2000 kPa. Não houve avaliação quanto à rugosidade da descontinuidade ensaiada.

Os ensaios foram realizados Laboratório de Furnas e os resultados foram disponibilizados para realização da presente avaliação que faz parte da dissertação de Katereniuk (2022).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização do maciço rochoso envolveu, além das campanhas de investigações in situ, a realização de ensaios de laboratório. Na fase de projeto básico, foram conduzidos ensaios triaxiais, ensaios de compressão simples e medições do módulo de deformabilidade em amostras de testemunhos obtidos por meio de sondagens rotativas. Na fase de projeto executivo, foram realizados ensaios triaxiais, ensaios de cisalhamento direto em descontinuidades, ensaios de compressão simples e determinação do módulo de deformabilidade em amostras de testemunhos provenientes das sondagens rotativas.

Para determinar as envoltórias de resistência das descontinuidades, foram analisados os ensaios de cisalhamento das diversas litologias presentes no maciço rochoso. Os pares de tensões de pico e residual obtidos nos ensaios, conforme avaliação efetuada neste estudo, são apresentados na Tabela 1.

A tensão normal indicada nas tabelas anteriores corresponde à tensão especificada para o ensaio (250 kPa, 500 kPa, 1000 kPa e 2000 kPa) corrigida pela área do corpo-de-prova.

Realizou-se, então o ajuste de uma envoltória linear, tendo sido escolhida a envoltória de Patton, aos dados do resultado dos ensaios de cisalhamento direto.

O critério de ruptura desenvolvido por Patton em 1966 é representado por uma envoltória bi-linear que contempla dois estágios do cisalhamento por descontinuidades, conforme ilustrado na Figura 3. Para uma superfície lisa, a envoltória de resistência (1) é uma reta cujo coeficiente angular corresponde ao ângulo de atrito básico. Em baixos níveis de tensão e para uma superfície rugosa, a envoltória (2) é uma reta com coeficiente angular igual ao ângulo de atrito básico acrescido de i . A partir do momento em que o cisalhamento começa a ocorrer na rocha intacta, a envoltória de resistência é descrita pela equação (3) (ANDRIANI, 2015).

Tabela 1. Resultados do ensaio de cisalhamento direto realizado em amostras de metarenito poroso

Corpo-de-prova	Litologia	Comportamento	σ (kPa)	τ (kPa)	
				Pico	Residual
202	Metarenito Poroso	Frágil-dúctil	281,0	403,50	282,52
203		Frágil-dúctil	1998,5	2054,00	1721,76
204		Dúctil	247,0	378,26	
205		Dúctil	501,0	450,92	
206		Dúctil	998,5	655,58	
206		Dúctil	495,0	737,94	
218	Metarenito Silicificado	Dúctil	254,5	381,55	
219		Dúctil	996,5	501,57	
220		Frágil-dúctil	2003,0	2231,30	1923,85
221		Dúctil	254,5	472,66	
222		Dúctil	507,5	600,82	
223		Frágil-dúctil	997,5	1364,70	-
224	Frágil-dúctil	1999,5	2225,80	1637,44	
212	Metasiltito	Dúctil	254,0	299,41	
213		Dúctil	492,0	575,54	
214		Dúctil	999,0	402,45	
215		Dúctil	1999,0	1179,2	
216A		Dúctil	257,0	474,26	
216B		Dúctil	990,0	1130,36	
217	Dúctil	2003,0	1113,92		
235	Gnaiss	Dúctil	233	751,01	
236		Frágil-dúctil	505	604,19	472,26
237		Dúctil	1004	471,25	
238		Dúctil	2002	1578,08	
239		Frágil	249,2	815,87	348,45
240		Frágil-dúctil	497	745,84	626,5
241		Dúctil	1000	1254,29	
242		Frágil	1996,5	1583,36	677,63

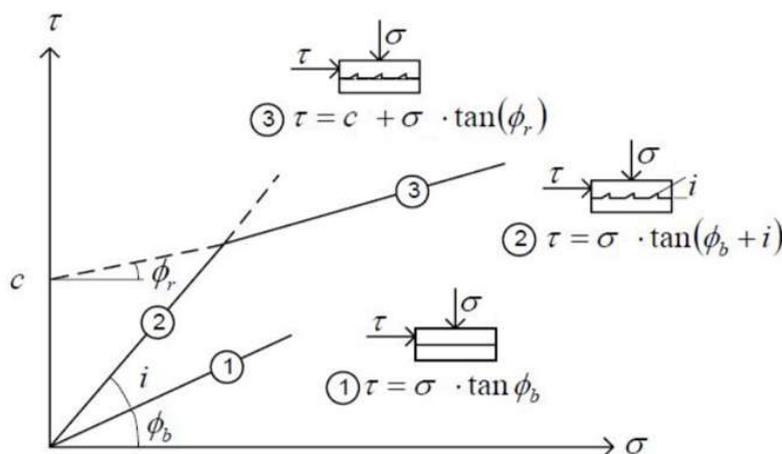


Figura 3. Envoltória bi-linear de Patton. Fonte: Modificado de Andersson (2019).

Na análise geotécnica da estabilidade de uma escavação, quando não são tolerados deslocamentos significativos, os cálculos empregam os parâmetros de resistência de pico. Isso ocorre porque para que uma descontinuidade atinja sua resistência residual, são necessários grandes deslocamentos. Essa premissa foi considerada para as escavações do AH Laúca.

A envoltória de resistência de Patton, previamente à resistência de pico, é definida pela reta descrita pela equação 1:

$$\tau = \sigma \tan(\phi_b + i) \quad 1$$

Onde:

i – Ângulo entre a feição superficial da descontinuidade e a inclinação da vertente;

ϕ_b – Ângulo de atrito básico;

τ – Tensão cisalhante;

σ – Tensão normal.

Ou seja, o primeiro segmento da envoltória é representado por uma equação de reta que parte da origem (coesão nula) e tem um coeficiente angular correspondente ao ângulo de atrito básico acrescido de uma componente relacionada à rugosidade das paredes da descontinuidade.

Wyllie e Mah (2004) afirmam que uma típica envoltória linear de resistência ao cisalhamento de descontinuidades sem preenchimento e rugosas apresenta coesão nula e ângulo de atrito composto pelas componentes $\phi_b + i$.

As descontinuidades do AH Laúca são descritas como rugosas e sem preenchimento, portanto, compatíveis com a utilização da envoltória de resistência de Patton.

As equações que descrevem a envoltória para cada tipo rochoso são apresentadas nas figuras subsequentes.

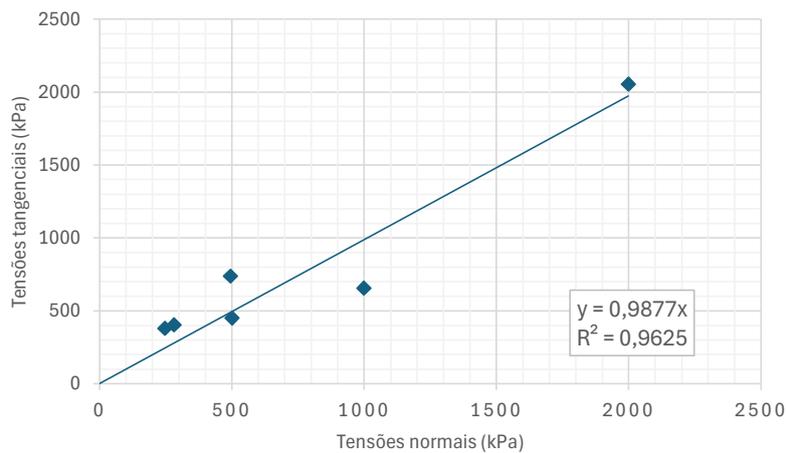


Figura 4. Metarenito poroso – Envoltória de Patton para resistência de pico

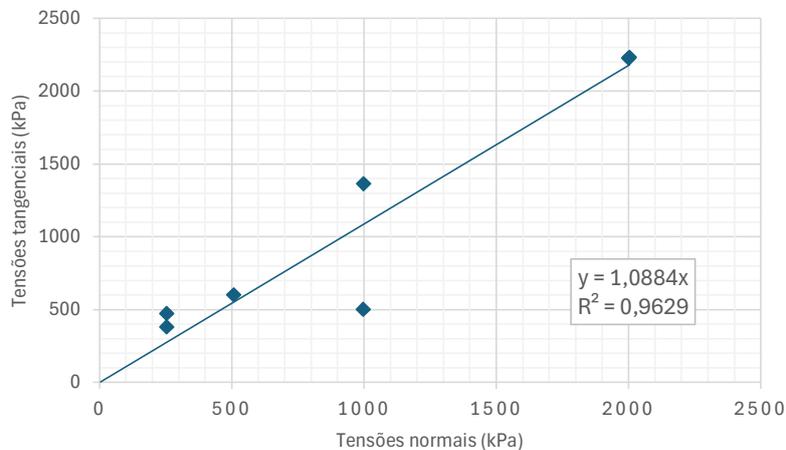


Figura 5. Metarenito silicificado – Envoltória de Patton para resistência de pico

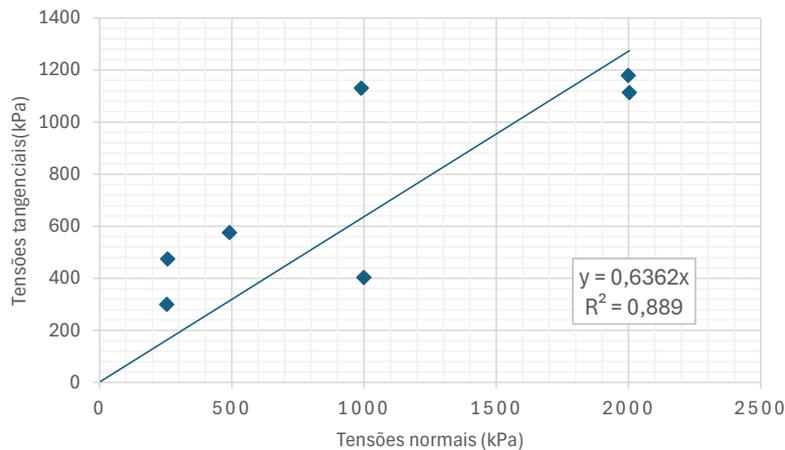


Figura 6. Metasiltito– Envoltória de Patton para resistência de pico

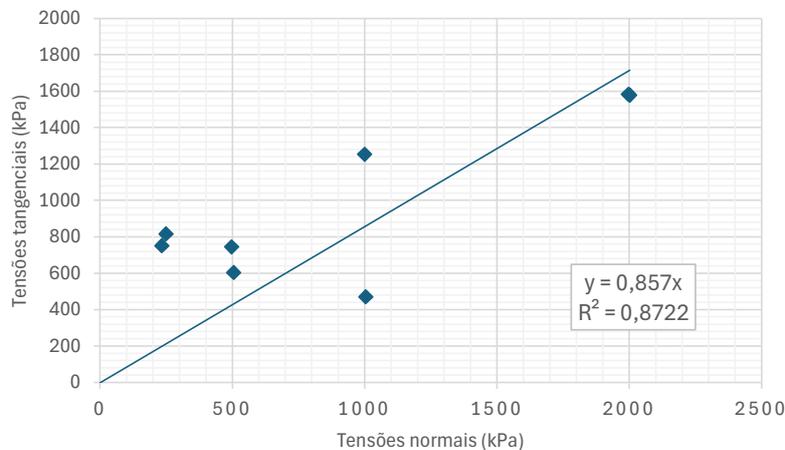


Figura 7. Gnaisse– Envoltória de Patton para resistência de pico

Verifica-se nos gráficos, que vão da Figura 3 até a Figura 6, que, em todas as litologias, os resultados dos ensaios para uma tensão normal de 1000 kPa foram os que apresentaram maior afastamento da reta de regressão linear.

Conforme indicam os valores de R^2 apresentados nos gráficos, a envoltória de Patton teve melhor aderência aos dados dos ensaios para os metarenitos. Nestas litologias, considerando tensões de até 500 kPa, verifica-se que a envoltória representa o limite inferior da resistência destas discontinuidades, comparando-a com os resultados dos ensaios de cisalhamento realizados. Este seria o nível de tensões as quais os taludes seriam submetidos devido aos efeitos das escavações. Para esta faixa de tensões normais todas as envoltórias as envoltórias obtidas são conservadoras. Vale ressaltar que para tensões mais elevadas o mais adequado seria empregar a equação do segundo trecho da envoltória de Patton, referente à resistência residual.

A partir das equações das envoltórias obtidas para cada litologia, considerando valores para ângulo de atrito básico baseados em Krsmanovic (1967), Patton (1996) e Coulson (1972), conforme apresentado no trabalho de Barton e Choubey (1977), estimou-se qual seria o valor da contribuição das irregularidades (i) na resistência ao cisalhamento das discontinuidades (Tabela 2).

Conforme a literatura técnica, os valores do ângulo de atrito básico para arenitos variam entre 25° e 35° , para siltitos a faixa de variação é de 27° a 33° , e para maciços gnáissicos de 23° a 29° . Os valores apresentados na Tabela 2 correspondem à média da faixa de variação encontrada na bibliografia. Esses valores também estão em conformidade com Vallejo et al. (2002), que menciona que para rochas sedimentares o ângulo de atrito está entre 25° e 37° , e para rochas metamórficas entre 21° e 30° .

Considerando os ângulos de atrito básicos indicados na tabela 2, verificou-se que a contribuição das irregularidades ou rugosidades na resistência ao cisalhamento das discontinuidades é de $12,29^\circ$ em média, sendo que quase não há contribuição da rugosidade no metasiltito.

Os valores estimados para a contribuição das irregularidades (i) são comparáveis aos apresentados por Look (2007), que sugere uma faixa típica de variação para rugosidades de primeira ordem entre 10° e 15° .

Tabela 2. Estimativa do valor de i

Litologia	Coesão (kPa)	$\phi_b + i$ (°)	ϕ_b (°)	i (°)
	Pico			
Metarenito poroso	0	44,64	30	14,64
Metarenito silicificado	0	47,42	30	17,42
Metasiltito	0	32,51	30	2,51
Gnaise	0	40,59	26	14,59

4 IMPLICAÇÕES PARA ESTABILIDADE DE TALUDES

Entende-se que, considerando as hipóteses admitidas nesta pesquisa, a envoltória de resistência ao cisalhamento de Patton resultaria em dimensionamentos seguros para a avaliação da estabilidade das escavações.

Apesar de inicialmente se considerar a possibilidade de superdimensionamento, é importante ressaltar que a exposição da face do talude rochoso devido às escavações, seguida pelo enchimento do reservatório e pela presença subsequente de água no maciço rochoso, é plausível esperar alguma alteração nas paredes das descontinuidades e, conseqüentemente, uma redução em sua resistência.

Deste modo, compreende-se que a caracterização geológica e geotécnica do talude rochoso antes da escavação é de extrema importância para garantir a segurança, eficiência e sucesso da obra. Esta fase é crucial para fornecer informações detalhadas sobre as condições geológicas e geotécnicas do terreno, capacitando os engenheiros geotécnicos e geólogos a tomarem decisões assertivas sobre o projeto e a execução da escavação.

Recomenda-se enfatizar e realizar uma caracterização geotécnica abrangente do maciço a ser escavado, uma vez que esta etapa fornece informações cruciais sobre a resistência à compressão, resistência ao cisalhamento e outras propriedades mecânicas das rochas. Esses dados são fundamentais para o planejamento e projeto adequados das escavações.

5 CONCLUSÕES

No presente estudo, foi empregada a envoltória de resistência bi-linear proposta por Patton para caracterizar a resistência ao cisalhamento de descontinuidades em maciços metassedimentares e gnáissicos. A análise geológica e geomecânica das descontinuidades possibilitou a determinação dos parâmetros a serem utilizados, levando em consideração tal envoltória.

De modo geral, observa-se uma boa concordância entre a envoltória e os dados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto para os metarenitos, dentro da faixa de tensões normais de até 500 kPa. Este seria o nível de tensões as quais os taludes estudados seriam submetidos devido aos efeitos das escavações.

Além disso, uma análise foi conduzida para avaliar a influência da rugosidade na resistência ao cisalhamento das descontinuidades. Foi constatado que, para as quatro litologias investigadas, a contribuição das irregularidades ou rugosidades na resistência ao cisalhamento das descontinuidades é em média de 12,29°, sendo praticamente insignificante para o metasiltito. Os valores estimados para a contribuição das irregularidades são consistentes com os relatados por Look (2007), que sugere uma variação típica de 10° a 15° para as rugosidades de primeira ordem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Gabinete de Aproveitamento do Médio Kwanza (GAMEK), à Odebrecht e Intertechne Consultores pela disponibilização das informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andersson, E. (2019) *Evaluation of influence from matedness on the peak shear strength of natural rock joints*. Dissertação – Division of soil and rock mechanics, KTH Royal Institute of Technology, Estocolmo.
- Andriani, G. F. (2015) Uso próprio e improprio dei criteri di resistenza degli ammassi rocciosi. *Geologi e Territorio - Ordine regionale dei geologi*, Puglia, n° 1/2015, p. 17-22.
- Barton, N., Choubey, V. (1977) The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics*, v. 10, p. 1–54.
- Bell, F. G. (2007) *Engineering Geology*. Oxford: Elsevier.
- Katereniuk, S. B. (2022) *Avaliação da resistência ao cisalhamento de descontinuidades em metarenito, metasiltito e gnaiss e aplicação de método probabilístico à estabilidade de taludes*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Curitiba.
- Look, B. G. (2007) *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. AK Leiden: Taylor & Francis / Balkema.
- Vallejo, L. I. G., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002) *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Wyllie, D. C., Mah, C. W. (2004) *Rock Slope Engineering and mining – Based on Rock Slope Engineering* (third edition, 1981) by Dr Evert Hoek and Dr John Bray. London and New York: Spon Press.