

Análise Comparativa de Critérios de Ruptura para Estabilidade de Taludes de uma Cava a Céu Aberto Através do Plaxis

Gabriella Quaresma

Geóloga, HIDROBR, Belo Horizonte, Brasil, gabriela.quaresma@hidrobr.com

Josymar Carlos Augusto Araújo e Sá

Auxiliar de Engenharia, HIDROBR, Belo Horizonte, Brasil, josymar.sa@hidrobr.com

Marko Rupert

Especialista em Geotecnia, HIDROBR, Belo Horizonte, Brasil, marko.rupert@hidrobr.com

Ingrid Belcavello Rigatto

Coordenadora de Geotecnia, HIDROBR, Belo Horizonte, Brasil, ingrid.rigatto@hidrobr.com

Fernanda Barbaro Franco

Engenheira Civil, Jaguar Mining, Belo Horizonte, Brasil, fernanda.franco@jaguarmining.com

RESUMO: Este estudo realiza uma análise comparativa de três critérios de ruptura para avaliar a estabilidade de taludes em uma cava de mineração em Minas Gerais: Mohr Coulomb, Hoek Brown e Anisotropic Strength. A modelagem da cava considera a presença de movimentos de massa na zona central, onde a rocha apresenta foliação marcante, influenciando a ocorrência de rupturas planares. A dificuldade em distinguir entre solo residual e rochas altamente intemperizadas é evidenciada. A metodologia envolve uma retroanálise para obter parâmetros de resistência, seguida de análises 2D utilizando o software Plaxis. Os critérios são comparados quanto à sua eficácia na descrição e avaliação do cenário estudado. O estudo visa contribuir para discussões sobre a representação de cenários geologicamente complexos e compreensão dos méritos e limitações dos critérios de ruptura. Destaca-se a influência das estruturas rochosas na deflagração de rupturas e a importância desse conhecimento na análise de estabilidade. É crucial considerar as particularidades dos materiais estudados para obter informações mais precisas. Os resultados promovem práticas aprimoradas para a avaliação da estabilidade de taludes em rochas brandas, contribuindo para o avanço da engenharia geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: Critérios de ruptura; Cava de mineração; Estabilidade de taludes; Complexidades geológicas.

ABSTRACT: This study conducts a comparative analysis of three failure criteria to assess the stability of slopes in a mining pit in Minas Gerais: Mohr Coulomb, Hoek Brown, and Anisotropic Strength. The pit modeling considers the presence of mass movements in the central zone, where the rock exhibits prominent foliation, influencing the occurrence of planar failures. The challenge of distinguishing between residual soil and highly weathered rocks is evident. The methodology involves backanalysis to obtain resistance parameters, followed by 2D analyses using Plaxis software. The criteria are compared in terms of their effectiveness in describing and evaluating the studied scenario. The study aims to contribute to discussions on the representation of geologically complex scenarios and understanding the merits and limitations of failure criteria. The influence of rock structures on the initiation of failure criteria is highlighted, emphasizing the importance of this knowledge in stability analysis. It is crucial to consider the peculiarities of the materials studied to obtain more accurate information. The findings of this study contribute to advancing the field of geotechnical engineering by promoting enhanced practices and methodologies for evaluating the stability of mining slopes comprised of soft rocks with complex structural characteristics.

KEYWORDS: Failure criteria; criteria; Open pit mining; Slope stability; Geological complexities.

1 INTRODUÇÃO

Estruturas geotécnicas, como os taludes de uma cava de mineração, estão sujeitas a falhas que podem desencadear deslizamentos, gerando insegurança nas operações. É importante destacar que esses eventos podem ser oportunidades valiosas de aprendizado, uma vez que o estudo de tais acontecimentos auxiliam na compreensão do comportamento do maciço permitindo extrair lições fundamentais para embasar medidas preventivas e mitigação da ocorrência desses eventos.

Nesse contexto, as retroanálises (e.g. Gomes, 2023; Shapka-Fels e Elmo, 2022) surgem como ferramentas auxiliares para compreender as propriedades do maciço rochoso, permitem verificar e comparar resultados considerando fatores de segurança e parâmetros geológico-geotécnicos provenientes de ensaios laboratoriais e do comportamento do maciço *in situ*, uma vez que recriação das condições *in situ* do material, mesmo com amostras indeformadas, não é uma tarefa trivial. Além disso, o elevado grau de alteração do maciço dificulta a caracterização e a distinção entre solo saprolítico e rocha muito alterada, podendo implicar em divergências na definição de parâmetros geotécnicos, haja vista a dificuldade de estabelecer parâmetros para este tipo de material comumente descrito como rocha branda (e.g. Lim *et al.*, 2017, Lopes *et al.*, 2007).

Nesse sentido, este trabalho propõe um estudo de caso que investiga deslizamentos em um talude de uma cava exaurida por meio de uma retroanálise. Para tanto, foi considerado três critérios de ruptura para avaliação dos modelos comparativamente a realidade observada, incluindo o Mohr-Coulomb, Anisotropic Strength e Hoek Brown (e.g. Hoek e Brown, 1997; Hoek *et al.*, 2002). Além disso, o arranjo geométrico da estrutura antes e após a ruptura foi utilizado na análise retroativa. Essas análises foram realizadas em duas dimensões, utilizando o software PLAXIS LE.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo envolveu a análise de um estudo de caso no contexto da mineração envolvendo taludes de uma cava localizada em Minas Gerais, Brasil. Inicialmente, foi realizada uma revisão da literatura para compreender os métodos mais utilizados na análise de estabilidade de taludes, destacando a importância do método de equilíbrio-limite e a definição prévia do modelo e condição de ruptura.

O estudo de caso foi selecionado com base em sua relevância prática e características geotécnicas específicas, incluindo a presença de rochas brandas em elevado estágio de intemperismo e um histórico de deslizamentos na região. Por meio de observações de campo e análises geológicas, foram coletados dados sobre a geometria da cava, a litologia predominante e sua condição de intemperismo.

A metodologia de análise envolveu a utilização de três modelos constitutivos para a retroanálise da estabilidade do talude: Hoek-Brown, Mohr Coulomb e Anisotropic Strength. Para tanto, foram realizadas análises comparativas em duas dimensões (2D) de forma a avaliar a adequação de cada modelo em representar o comportamento do material no cenário estudado.

Para a avaliação dos parâmetros de resistência, foram realizados investigações de campo e foram considerados ensaios de laboratório especificamente ensaios de cisalhamento direto referentes a duas amostras coletadas no local, a fim de obter valores realistas nos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais. No entanto, apenas foi possível a coleta de amostras referentes a camadas saprolíticas das litologias avaliadas, essencialmente devido ao difícil acesso ao local de estudo, assim como não foram consideradas a direção da foliação nos ensaios. Dessa forma, os parâmetros foram baseados inicialmente em valores típicos de rochas brandas apresentadas pela literatura (e.g. Hunt, 1984; Lopes *et al.*, 2006; Shen *et al.*, 2013; Araújo *et al.*, 2014), sendo ajustados por meio de retroanálise para atingir um fator de segurança o mais próximo possível de 1, em que, a priori, é quando a ruptura ocorre ou na iminência de ocorrer, devido as forças mobilizadoras se sobreporem ou se igualarem as forças resistivas ao cisalhamento. Nesse sentido, fez-se uso das relações entre o grau de resistência dos maciços rochosos e das características apresentadas pelo maciço, conforme definições de Hoek (2002) e Norbury (2010).

O software PLAXIS LE foi utilizado para realizar as análises de equilíbrio-limite, empregando os métodos de cálculo de Morgenstern-Price, Spencer e o método de busca Cuckoo Search. As simulações foram realizadas considerando a ruptura não circular em estado bidimensional, levando em conta a geometria da cava e as características geológicas locais.

3 RESULTADOS

Nos tópicos seguintes são apresentados os resultados obtidos nas retroanálises realizadas.

3.1 Caracterização geológica local e classificação geomecânica do maciço rochoso

A cava estudada encontra-se com problemas de estabilidade, principalmente em sua região central. As características do terreno, como: xistosidade da rocha; intemperismo avançado e concentração da drenagem superficial, deterioraram os taludes com o tempo. Nestas condições, é necessário intervir para aumentar fator de segurança de estabilidade dos taludes. A cava tem a forma aproximada de um anfiteatro e seus taludes são caracterizados majoritariamente por xisto e filito do Grupo Nova Lima, no contexto geotectônico do Quadrilátero Ferrífero.

As unidades litológicas identificadas estão dispostas em camadas inclinadas, assim como os planos de fraqueza, foliação e xistosidade, com direção média para SE e mergulho de aproximadamente 45°, característica também considerada favorável para a deflagração de deslizamentos na porção central, conforme pode ser observado nas Figura 1 e Figura 2.



Figura 1. Filito alterado de coloração cinza a amarronzado fragmentado conforme plano de foliação e descontinuidades.



Figura 2. Xisto de coloração esbranquiçada com planos de fraqueza (xistosidade), ilustrados pelas setas vermelhas, bem-marcados

A classificação geomecânica foi feita de acordo com a metodologia de Bieniawski (1989) quase que integralmente por meio das informações advindas dos furos de sondagem executados, como exemplificado nas Tabela 1 e Tabela 2, bem como considerou-se as avaliações realizadas em campo. Salienta-se que tais tabelas reúnem informações de cinco furos realizados no local, sendo os dados referentes a média dos valores encontrados nos furos. Reitera-se que não necessariamente os dados apresentados na Tabela 1 e Tabela 2 representam os parâmetros e características da unidade geológica avaliada. A classificação geomecânica e obtenção do valor RMR é apresentado apenas para fins comparativos e de entendimento do material estudado. Por isso, optou-se pela penalização do valor RMR pela orientação das descontinuidades, haja vista que foi utilizado um modelo geológico simplificado para a realização das retroanálises.

Tabela 1. Classificação do maciço rochoso.

Rocha	Filito 1	
Início do horizonte avaliado (m)	4,5	
Fim do horizonte avaliado (m)	10,5	
Recuperação (sondagem)	60	
RQD ("Rock Quality Designation")	0	
Parâmetros		Pesos
Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta	R0 (<1)	0
RQD ("Rock Quality Designation")	<20	3
Espaçamento das descontinuidades (mm)	<0,06	5
Condição das descontinuidades	Polida	20
Influência da água	Seco	15
Orientação das descontinuidades	Razoável	-25
Valor RMR		18
Classe		V
Índice GSI		13

Fonte: Bieniawski (1989).

Tabela 2. Classificação do maciço rochoso.

Rocha	Xisto	
Início do horizonte avaliado (m)	11	
Fim do horizonte avaliado (m)	25	
Recuperação (sondagem)	90	
RQD ("Rock Quality Designation")	60	
Parâmetros		Pesos
Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta	R3 (25-50)	4
RQD ("Rock Quality Designation")	50-75	13
Espaçamento das descontinuidades (mm)	0,2 - 0,6	10
Condição das descontinuidades	Rugosa	30
Influência da água	Seco	15
Orientação das descontinuidades	Desfavorável	-50
Valor RMR		22
Classe		IV
Índice GSI		17

Fonte: Bieniawski (1989).

Para a avaliação dos parâmetros de resistência foram considerados, também, os ensaios de cisalhamento direto executados em duas amostras de solo residual jovem (saprolítico), cujos resultados são apresentados na Tabela 3, haja vista que as rochas analisadas se encontram muito alteradas e são consideradas como brandas.

Tabela 3. Resultado do ensaio de cisalhamento direto

Amostra	Profundidade (m)	Tensão Efetiva Inundado	
		ϕ' (°)	c' (kPa)
01	3 - 5	23,89	35,69
02	11 - 13	17,59	64,73

Ressalta-se que devido a ausência de ensaios de resistência nas rochas e a limitada quantidade de informações de campo devido a dificuldade de acesso, foram considerados os valores típicos de rochas brandas apresentadas pela literatura (e.g. Hunt, 1984; Lopes *et al.*, 2006; Shen *et al.*, 2013; Araújo *et al.*, 2014) para se introduzir inicialmente no software de análise de estabilidade e sendo ajustados por meio de retroanálise para atingir um fator de segurança o mais próximo possível de 1.

Quanto ao posicionamento da linha freática no local, em nenhum dos furos de sondagem avaliados entre 30 e metros e 40 metros de profundidade foi encontrado N.A. Portanto as análises de estabilidade foram realizadas considerando o maciço seco.

3.2 Hoek-Brown

A retroanálise em que foi utilizado o critério de ruptura de Hoek-Brown (Figura 3) apresentou resultados consistentes, com uma superfície de ruptura ligeiramente mais profunda se comparada a que ocorreu no local. No entanto, os parâmetros obtidos permaneceram dentro do limite inferior do considerado para rocha branda, demonstrando a capacidade do modelo em representar parâmetros realistas.

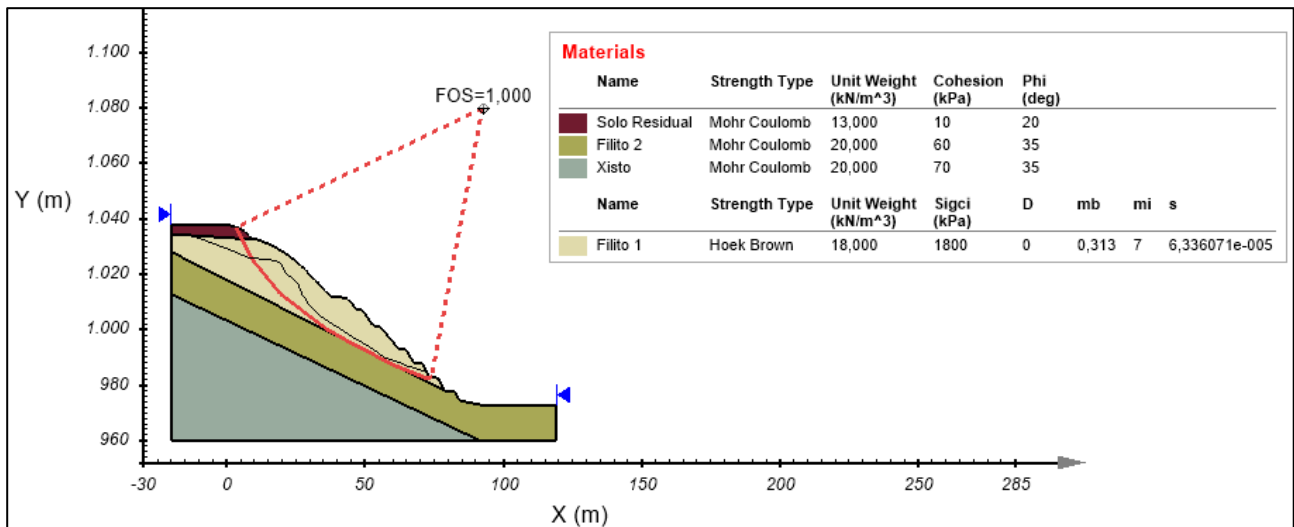


Figura 3. Resultado da retroanálise utilizando Hoek Brown.

3.2 Mohr-Coulomb

Os resultados obtidos com o critério de ruptura de Mohr Coulomb mostraram grande semelhança com os dados coletados em campo. Conforme apresentado na 4, a superfície de ruptura calculada se apresenta com grande semelhança à superfície mapeada em campo.

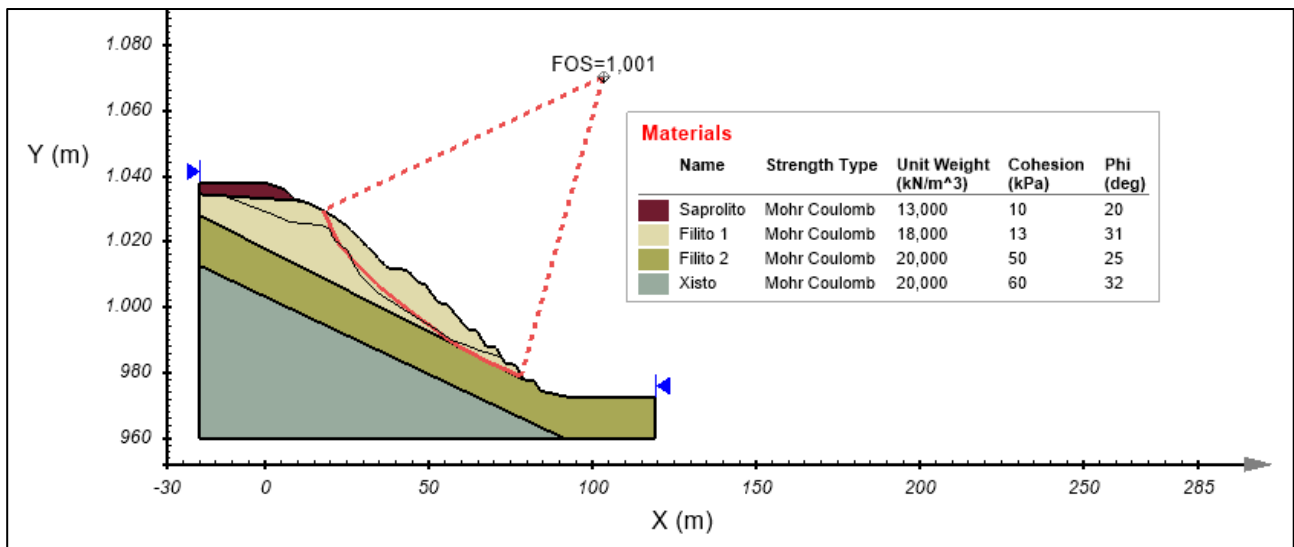


Figura 4. Resultado da retroanálise utilizando Mohr Coulomb.

3.3 Anisotropic Strength

Caracterizando o Filito 1 com o modelo constitutivo Anisotropic Strength, observou-se que a superfície de ruptura mais se aproximou da realidade quando os parâmetros foram ajustados para a superfície de maior fraqueza, com um ângulo de mergulho favorável ao deslizamento. Tal comportamento, aponta forte influência da orientação dos planos de fraqueza no comportamento da estrutura.

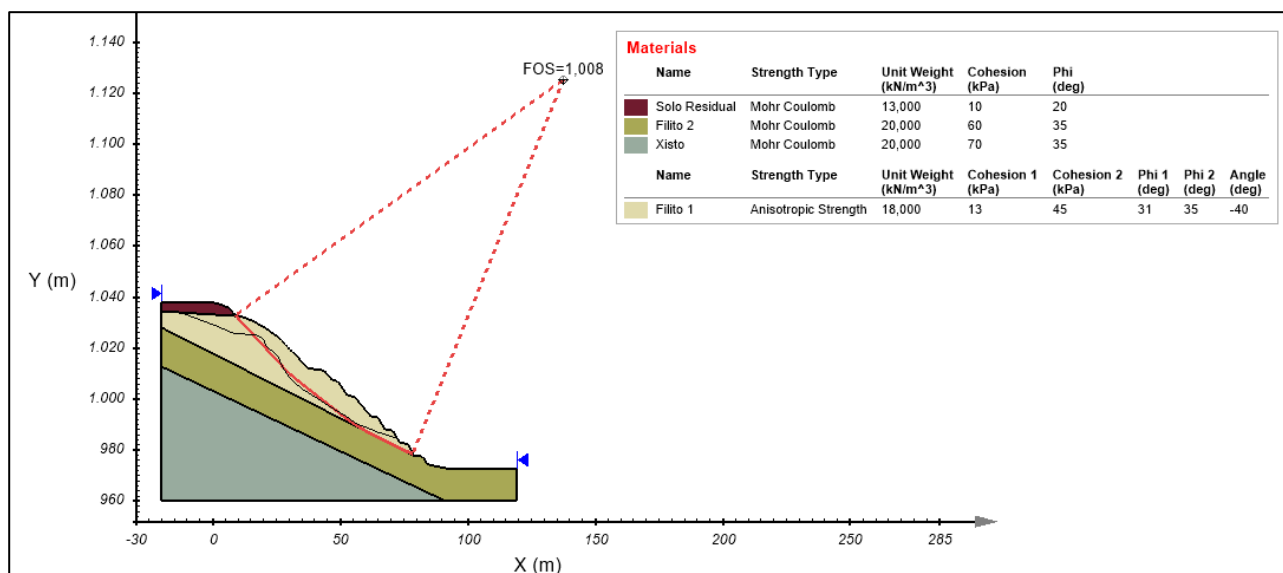


Figura 3. Resultado da retroanálise utilizando Anisotropic Strength

4 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos das análises comparativas dos três modelos constitutivos representaram de forma razoável o comportamento do material na cava estudada. Ao realizar a retroanálise com diferentes combinações de parâmetros de resistência, foi possível alcançar um fator de segurança próximo de 1 em todas as simulações, indicando uma aproximação adequada da superfície de ruptura real.

O modelo de Hoek-Brown, apesar de apresentar uma superfície de ruptura ligeiramente mais profunda em comparação com os outros modelos, conseguiu representar com parâmetros realistas, ficando no limite inferior do considerado para rocha branda. Por outro lado, o Mohr Coulomb e o Anisotropic Strength mostraram resultados similares, especialmente quando os parâmetros foram introduzidos para o plano de maior fraqueza com um mergulho favorável ao deslizamento.

Salienta-se que o objetivo principal do presente trabalho é a comparação dos valores de resistência obtidos entre os 3 métodos propostos entre si, por meio de um modelo geológico simplificado. A classificação RMR foi apresentada apenas para fins de entendimento do contexto geomecânico local, não tendo sido utilizado como base para os parâmetros iniciais inseridos na análise de estabilidade.

Comparativamente, os ensaios de campo e laboratório revelaram parâmetros de resistência mais elevados do que os obtidos pela retroanálise, destacando a importância de considerar as características específicas do material estudado. Observou-se que a direção dos planos de fraqueza, juntamente com a baixa qualidade geomecânica do maciço rochoso, foram fatores determinantes para a ocorrência do deslizamento na cava.

É importante ressaltar que os resultados obtidos são baseados em um modelo idealizado e simplificado do problema real, e há limitações associadas à análise em duas dimensões de um problema tridimensional. No entanto, as conclusões fornecem pontos valiosos sobre a estabilidade do talude e destacam a importância da escolha adequada do modelo e dos parâmetros para análises mais fidedignas do cenário real.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo aborda a importância e a representatividade de diferentes modelos constitutivos na avaliação da estabilidade de taludes em condições geotécnicas específicas, incluindo ambiente minerário e com maciços constituídos por rochas brandas. Os resultados obtidos demonstraram que os modelos Hoek-Brown, Mohr Coulomb e Anisotropic Strength foram capazes de representar de maneira satisfatória o comportamento do material na cava estudada, para as condições analisadas.

Utilizando-se da retroanálise foi possível ajustar os parâmetros de resistência para alcançar um fator de segurança próximo de 1 e se aproximar da superfície de ruptura observada em campo. Contudo, observou-se que, quando as superfícies de ruptura apresentavam valores próximos de 1, os parâmetros obtidos por ensaios de campo e laboratório foram mais elevados do que os valores obtidos pela retroanálise, ressaltando a importância de considerar as características específicas do material estudado para determinação das propriedades de resistência ao cisalhamento desses materiais.

Além disso, se mostrou nítida a influência da direção dos planos de fraqueza e da baixa qualidade geomecânica do maciço rochoso, que foi evidenciada como fatores determinantes para a ocorrência do deslizamento dos taludes na cava. Nesse sentido, é imperativo a realização de ensaios que levem em consideração as estruturas do maciço rochoso e avaliem a resistência do material em diferentes direções.

Para mais, este estudo ressalta a necessidade de uma abordagem integrada e crítica na análise de estabilidade de taludes, utilizando modelos que melhor representem o comportamento do material em condições apresentadas em campo. A caracterização do maciço com o modelo adequado e dos parâmetros é essencial para garantir análises representativas que embasem tomadas de decisões mais assertivas e seguras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à HIDROBR pelo apoio e incentivo na realização deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, T. P., Amaral Jr., A. F., Amaral, C. G., Zenóbio, A.A. (2014) Estudo da resistência de maciços de rocha branda em taludes de mineração. *Mecânica das Rochas para Recursos Naturais e Infraestrutura SBMR 2014 – Conferência Especializada ISRM 09-13 Setembro 2014*.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. New York : John Wiley & Sons .
- Gomes, C. L. R. (2023) *Retroanálise em estabilidade de taludes em solo: metodologia para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento / Cláudio Luiz Ridente Gomes - Campinas, SP: [s.n.]*.
- Hoek, E. (2002). *Rock Mass Properties for Underground Mines*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME). Litleton, Colorado. 21 p.
- Hoek, E., Brown, E. T. (1997) *Practical Estimates of Rock Mass Strength*. *International Journal Rock Mechanics Mining Science*, 34, 1165-1186.
- HUNT, R.E. (1984). *Geotechnical Engineering Investigation Manual*. McGraw-Hill, USA.983 p.
- Lim, K.; Li, A. J.; Schmid, A.; Lyamin, A. V. (2017) Slope-stability assessments using finite-element limit-analysis methods. *International Journal of Geomechanics*, Vol. 17, Issue 2, n. 06016017.
- Lopes MC (2006) *Comportamento geotécnico e mecanismo de ruptura em rochas brandas - Mineração Córrego do Sítio*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, p 94.
- Norbury, D. (2010) *Soil and rock description in engineering practice*. Whittles Publishing, April 2010. 302 pp, ISBN 978-1904445-65-4.
- Shapka-Fels, T.; Elmo, D. (2022) Numerical Modelling Challenges in Rock Engineering with Special Consideration of Open Pit to Underground Mine Interaction. *Geosciences*, 12, 199. <https://doi.org/10.3390/geosciences12050199>
- Shapka-Fels, T.; Elmo, D. (2022) Numerical Modelling Challenges in Rock Engineering with Special Consideration of Open Pit to Underground Mine Interaction. *Geosciences*, 12, 199. <https://doi.org/10.3390/geosciences12050199>
- Shen, J.; Karakus, M.; XU, C. (2013) Chart-based slope stability assessment using the Generalized Hoek–Brown criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 64: 210-219. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.09.002>