XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/92

Influência do Fator de Distúrbio (D) no Comportamento Mecânico de Maciços Rochosos de Qualidade Intermediária

Vitória Lima Tavares
Doutoranda em Engenharia Civil/Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil, vitorialimat@outlook.com

Bruna Letícia da Silva Lemos
Doutoranda em Engenharia Civil/Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília - DF, Brasil, engbrunaleticia21@gmail.com

Airlis Mendes de Freitas Júnior
Mestre em Engenharia Civil/Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, Brasil, airlismendes12@gmail.com

RESUMO: O comportamento mecânico dos maciços rochosos depende da estrutura geológica e das condições de escavação, que podem gerar diferentes níveis de distúrbio no maciço. O fator D, proposto no critério empírico de Hoek–Brown, representa esse grau de perturbação e desempenha papel fundamental na estimativa dos parâmetros de resistência e deformabilidade utilizados em projetos geotécnicos. Este trabalho tem como objetivo analisar a influência do fator de distúrbio sobre o comportamento de um maciço rochoso de qualidade intermediária, utilizando o *software* RocLab, como ferramenta de cálculo e estimativa de parâmetros geotécnicos. Foram avaliadas três condições distintas de distúrbio, representando estados que variam de maciço intacto a alterado. Os resultados evidenciam reduções significativas e não lineares nos parâmetros mecânicos: a coesão, o ângulo de atrito e o módulo de deformabilidade. Observou-se que a degradação é mais acentuada entre os níveis intermediário e elevado de distúrbio, demonstrando o impacto significativo da escavação sobre a integridade do maciço. Verifica-se que a consideração adequada do fator D é essencial em análises de estabilidade e no dimensionamento de obras subterrâneas e taludes.

PALAVRAS-CHAVE: Fator de Distúrbio, Critério de Hoek–Brown, Resistência, Maciços.

ABSTRACT: The mechanical behavior of rock masses depends on the geological structure and excavation conditions, which may generate different levels of disturbance within the rock mass. The disturbance factor (D), proposed in the empirical Hoek–Brown criterion, represents this degree of perturbation and plays a fundamental role in the estimation of strength and deformability parameters used in geotechnical design. This study aims to analyze the influence of the disturbance factor on the behavior of a rock mass of intermediate quality, using the RocLab software as a tool for the calculation and estimation of geotechnical parameters. Three distinct disturbance conditions were evaluated, representing states ranging from an intact to a disturbed rock mass. The results indicate significant and nonlinear reductions in the mechanical parameters, including cohesion, friction angle, and deformability modulus. It was observed that degradation is more pronounced between intermediate and high disturbance levels, demonstrating the significant impact of excavation on rock mass integrity. These findings confirm that proper consideration of the disturbance factor (D) is essential in stability analyses and in the design of underground structures and slopes.

KEYWORDS: Disturbance Factor, Hoek–Brown Criterion, Strength, Rock Masses.

1 INTRODUÇÃO

As características estruturais dos maciços rochosos desempenham papel determinante na definição de seu comportamento mecânico, o qual constitui um dos principais desafios da engenharia geotécnica, em função de sua elevada heterogeneidade e anisotropia resultantes de processos geológicos complexos e da presença de

descontinuidades estruturais. Fatores como fraturas, juntas, grau de intemperismo e condições de escavação influenciam diretamente a resistência e a deformabilidade do maciço, tornando essencial a adoção de modelos que representem adequadamente essas características em projetos de engenharia (Bieniawski, 1989; Hoek; Kaiser; Bawden, 1995). Diante desse cenário, torna-se necessária a utilização de ferramentas teóricas capazes de auxiliar na análise e no controle do comportamento do maciço ao longo do tempo e do espaço.

O critério empírico de resistência de Hoek–Brown tem sido amplamente empregado na caracterização de maciços rochosos, especialmente por sua capacidade de incorporar parâmetros representativos tanto da qualidade do maciço quanto dos efeitos induzidos pelos processos de escavação (Hoek; Brown, 1980). A evolução desse critério ao longo dos anos permitiu sua aplicação a diferentes condições geotécnicas, sendo amplamente utilizado em análises de estabilidade de taludes, túneis e outras obras subterrâneas (Hoek; Carranza-Torres; Corkum, 2002).

Entre os parâmetros do critério de Hoek–Brown, destaca-se o Fator de Distúrbio (D), que representa o grau de perturbação sofrido pelo maciço rochoso em decorrência de escavações, alívio de tensões e danos estruturais associados a métodos construtivos inadequados. Esse fator exerce influência direta na estimativa dos parâmetros de resistência e deformabilidade do maciço, podendo alterar significativamente os resultados das análises geotécnicas quando não considerado de forma apropriada (Hoek; Diederichs, 2006).

Apesar de sua relevância, o fator D é frequentemente adotado de maneira empírica ou conservadora, o que pode conduzir a estimativas imprecisas do comportamento mecânico do maciço. Em especial, maciços rochosos de qualidade intermediária tendem a apresentar maior sensibilidade às variações do grau de distúrbio, tornando necessária uma avaliação mais criteriosa dos efeitos desse parâmetro sobre suas propriedades mecânicas.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência do fator de distúrbio (D) no comportamento mecânico de um maciço rochoso de qualidade intermediária, por meio da aplicação do *software* RocLab, desenvolvido pela empresa *Rocscience.* A partir da simulação de diferentes condições de distúrbio, busca-se avaliar as variações nos parâmetros geotécnicos de resistência e deformabilidade, bem como discutir suas implicações para o dimensionamento e a segurança de obras geotécnicas (Rocscience Inc., s.d.).

2 METODOLOGIA

Este estudo adotou o sistema de classificação de acordo com o índice de resistência geológica – GSI, proposto por Hoek, Carranza-Torres e Corkum (2002). Com base nessa metodologia, o valor de GSI foi estimado em função do grau de fraturamento do maciço rochoso. Adicionalmente, foram definidos a resistência à compressão simples da rocha intacta (σ_{ci}), a constante do material intacto (*mi*), e o fator de distúrbio (D), considerados fundamentais para a caracterização do comportamento mecânico do maciço.

Para estimativa dos parâmetros de resistência e deformabilidade, foi utilizado o RocLab, fundamentado no critério empírico de ruptura de Hoek-Brown (Rocscience Inc., s.d.). Ademais, são geradas envoltórias de ruptura, permitindo a análise comparativa do comportamento do maciço sob níveis de distúrbio de 0, 0,5 e 1 para efetiva comparação.

2.1. Índice de Resistência Geológica (GSI - *Geological Strength Index*)

O Índice de Resistência Geológica (GSI), desenvolvido por Hoek (1994), foi proposto com o objetivo de avaliar a qualidade dos maciços rochosos a partir de suas características estruturais, utilizado na caracterização mecânica desses materiais. O método permite reduzir a influência de variáveis externas e possibilita ajustes em sistemas tradicionais de classificação geomecânica.

O GSI é determinado a partir de ábacos baseados em avaliações visuais das condições do maciço, sendo aplicado sobretudo na estimativa da resistência de rochas duras a quebradiças. O método passou por sucessivas atualizações, destacando-se a proposta de Hoek e Marinos (2000), que classifica os maciços rochosos em diferentes categorias estruturais: intacta, fraturada, muito fraturada, perturbada, desintegrada e laminada.

Apesar de suas vantagens, como a praticidade e a rapidez na aplicação, o GSI apresenta limitações relacionadas à dependência da experiência do avaliador e às restrições em análises diretas de Fatores de

Segurança (FS) e campos de deslocamentos. Nesse contexto, a integração do GSI a ferramentas computacionais tem se mostrado fundamental para superar essas limitações. Com o avanço dos softwares de engenharia, os sistemas de classificação geomecânica passaram a ser incorporados a análises computacionais mais robustas, permitindo uma representação mais detalhada do comportamento dos maciços rochosos e aumentando a confiabilidade dos projetos geotécnicos (Hoek; Diederichs, 2006).

2.2 Resistência do maciço rochoso

O critério de resistência proposto por Hoek e Brown (1980) foi posteriormente revisado por Hoek *et al*. (2002) com o objetivo de ampliar sua aplicabilidade a maciços rochosos fraturados. Essa revisão resultou em um critério de ruptura mais geral, capaz de representar tanto o comportamento da rocha intacta quanto o de maciços rochosos. O critério de ruptura é expresso pela Equação 1:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci}\left(mb\frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s\right)^a \quad (1)$$

Onde:

- σ'_1 é a tensão principal maior efetiva;
- σ'_3 é a tensão principal menor efetiva;
- σ_{ci} é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
- m_b é a constante m referente ao maciço rochoso;
- s e a são constantes empíricas associadas às características do maciço rochoso.

De acordo com Hoek, Carranza-Torres e Corkum (2002), os valores dos parâmetros a e s podem ser assumidos conforme a qualidade do maciço rochoso: para maciços de boa qualidade, pouco alterados, com descontinuidades fechadas e blocos angulares, o parâmetro a é geralmente assumido como igual a 0,5 (ou seja, $a = 1/2$). Para maciços de baixa qualidade, intensamente alterados ou intemperizados, com descontinuidades cisalhadas e resistência à tração considerada nula, o parâmetro s é adotado igual a zero (s = 0).

Devido a limitação em realizar ensaios laboratoriais representativos em maciços rochosos, os parâmetros do modelo de resistência proposto por Hoek *et al*. (2002) são, em geral, estimados a partir de classificações geomecânicas, especialmente o GSI, bem como por meio de correlações empíricas com base em dados previamente publicados.

O parâmetro m_b, correspondente à constante do material para o maciço rochoso, é obtido a partir da seguinte correlação; em que m_i representa o valor da constante m para a rocha intacta, e D é o fator de perturbação do maciço, representado pela Equação 2:

$$\frac{mb}{mi} = exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (2)$$

Para maciços com $GSI > 25$ (maciço pouco alterado) e com o parâmetro a assumido como igual a 0,5, dada pela Equação 3:

$$s = exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (3)$$

Para maciços com $GSI < 25$ (maciço alterado), nos quais a resistência à tração é considerada nula e, portanto, $s = 0$, representado pela Equação 4:

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}\left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}\right) \quad (4)$$

De acordo com Hoek, Carranza-Torres e Corkum (2002), o fator de distúrbio (D) foi introduzido com o objetivo de representar os efeitos da escavação, em especial aqueles associados aos processos de detonação, sobre a integridade dos maciços rochosos. Esse parâmetro assume valores entre 0, correspondente a um maciço praticamente não perturbado, e 1, que caracteriza uma condição de elevado grau de distúrbio. A definição do valor mais adequado para o fator D pode ser realizada com base nas recomendações apresentadas por Hoek (2023). Em virtude disso, foram utilizados os parâmetros 0, 0,5 e 1 para efetiva comparação.

2.3 Comparação com os parâmetros do critério de Mohr–Coulomb

Para fins de aplicação prática em análises geotécnicas, os parâmetros do critério de Hoek–Brown podem ser convertidos em parâmetros equivalentes do critério de Mohr–Coulomb, de acordo com a metodologia proposta por Hoek, Carranza-Torres e Corkum (2002), representado pela Figura 1.

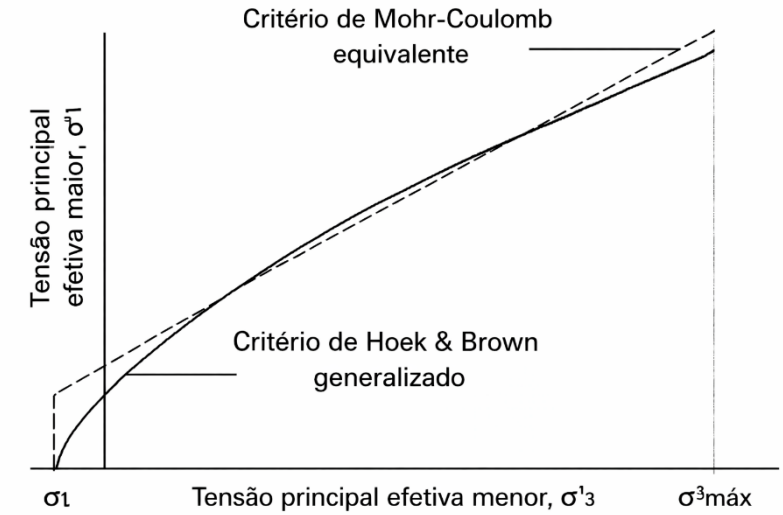


Figura 1. Representação do ajuste da envoltória de Mohr–Coulomb ao critério de ruptura de Hoek–Brown, Assis, 2013.

Onde:

- σ_t é a resistência à tração do maciço rochoso;
- σ_3' é a tensão principal efetiva menor;
- $\sigma_{3,máx}'$ é a tensão principal efetiva menor máxima, definida em função do tipo de obra.

A partir desse ajuste, são obtidas expressões analíticas que permitem estimar os parâmetros de resistência do maciço rochoso, especificamente o ângulo de atrito efetivo (φ') e a coesão efetiva (c'), conforme indicado nas Equações 5 e 6.

$$\emptyset' = \sin^{-1}\left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}\right] \quad (5)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}\left[(1+2a)s + (1-a)\, m_b\sigma'_{3n}\right](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad (6)$$

Onde:

- σ'_{3n} representa a tensão principal efetiva normalizada, definida como a razão entre a tensão de confinamento máxima e a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, conforme a relação $\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3,máx}}{\sigma'_{ci}}$;
- $\emptyset'$ corresponde ao ângulo de atrito;
- c' é a coesão efetiva do maciço;
- $\sigma'_{3,máx}$ refere-se à tensão de confinamento máxima;
- m_b, "s" e "a" são os parâmetros do critério de ruptura de Hoek–Brown;
- σ_{ci} denota a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta.

2.4 Deformabilidade do maciço rochoso

A deformabilidade é considerada um dos parâmetros mais importantes que governam o comportamento dos maciços rochosos. Segundo Gonçalves (2013), a deformabilidade das rochas, entendida como a capacidade do material de se deformar sob a ação de esforços externos, constitui um parâmetro fundamental na avaliação de recalques em estruturas como barragens e fundações, bem como na previsão das deformações associadas à escavação de túneis. Além disso, o conhecimento desse comportamento contribui para a análise da bacia de recalque e para a compreensão dos mecanismos de plasticidade do maciço rochoso. O módulo de deformação (E_m) pode ser determinado por três abordagens principais: ensaios de laboratório, ensaios de campo e estimativas empíricas (Lemos, 2024). Diversos estudos indicam que ambas as formas apresentam limitações, sobretudo de ordem econômica. Em função disso, têm sido propostas, na literatura, metodologias para a estimativa do módulo de deformabilidade do maciço rochoso a partir de sistemas de classificação geomecânica, utilizando índices amplamente consolidados, como Classificação do Maciço Rochoso (RMR), a Qualidade do Maciço Rochoso (Q) e o GSI (Bieniawski, 1978; Grimstad; Barton, 1993; Hoek; Carranza-Torres; Corkum, 2002).

3 RESULTADOS

Inicialmente, o maciço rochoso foi classificado como muito fraturado, com GSI = 15. O σ_{ci} foi estimado em 50 MPa com base em observações de campo. O parâmetro mi adotado foi 15, típico de arenito/quartzito (Hoek e Brown, 1980). A Tabela 1 mostra que o aumento do fator D resulta em reduções significativas nos parâmetros do maciço rochoso, com reduções da ordem de 95% em m_b, 75% na coesão, 74% no ângulo de atrito e 50% no módulo de deformabilidade (E_m), evidenciando a degradação da resistência e da rigidez do maciço. Além disso, os resultados obtidos para $D = 0$, são compatíveis com os apresentados por Lemos (2024).

Tabela 1. Parâmetros equivalentes de resistência e deformabilidade para diferentes valores do fator D

D	*mb*	*S*	*A*	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	*Em*
0	0,721	$1{,}0 \times 10^{-4}$	0,561	1390	23	942,942
0,5	0,262	$1{,}0 \times 10^{-4}$	0,561	905	15	707,207
1	0,035	$7{,}04 \times 10^{-7}$	0,561	344	6	471,471

A Figura 2 mostra que, para D = 0, os valores de m_b/m_i são mais elevados, enquanto, para D = 0,5 e D = 1, observa-se uma diminuição progressiva desse parâmetro ao longo do intervalo de GSI analisado, sendo mais pronunciada no caso de D = 1. Esses resultados indicam que o fator D influencia a redução da resistência do maciço, mesmo para valores elevados de GSI.

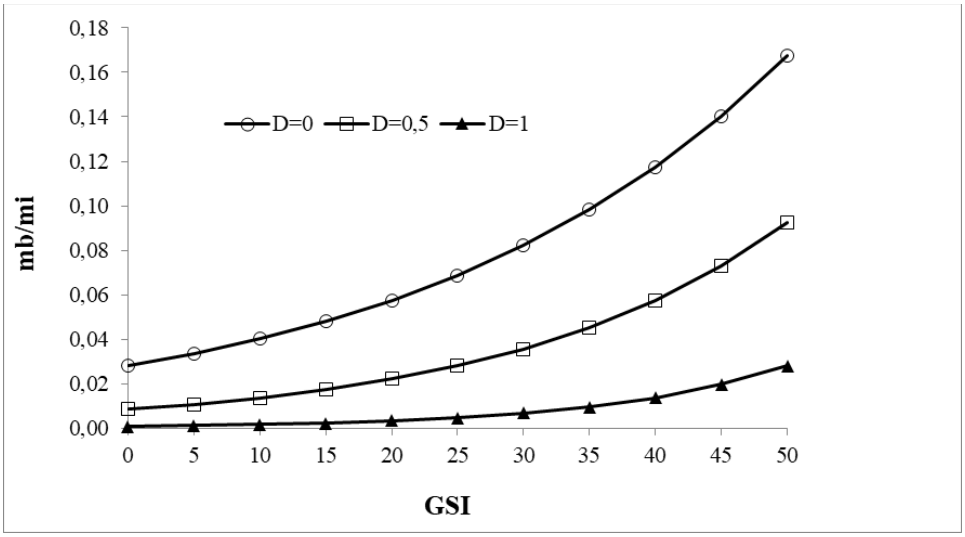


Figura 2. Variação dos parâmetros de Hoek, Carranza-Torres e Corkum (2002) em função do GSI.

A Figura 3 apresenta que, para GSI $\leq$ 25, o parâmetro s assume valores próximos de zero para todos os níveis do fator D. Com aumento do GSI, verifica-se um incremento de s para D = 0; em contrapartida, para D = 0,5 e D = 1, os valores permanecem reduzidos ao longo de toda a faixa de GSI considerada.

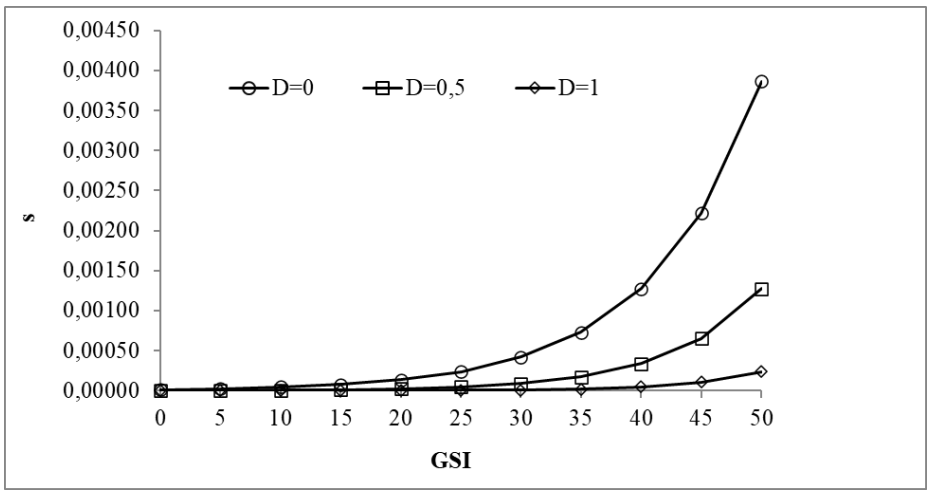


Figura 3. A variação do s em função do GSI.

Os resultados apresentados das Figuras 2 e 3 evidenciam a influência conjunta do GSI e do fator D sobre os parâmetros de resistência do maciço rochoso. Com base nessas variações, a Figura 4 ilustra que, para D = 0, as envoltórias de ruptura apresentam maiores σ_1 para um mesmo nível de confinamento σ_3. Para D = 0,5, verifica-se uma redução intermediária; já para D = 1, as envoltórias indicam a menor resistência ao longo de todo o intervalo de confinamento.

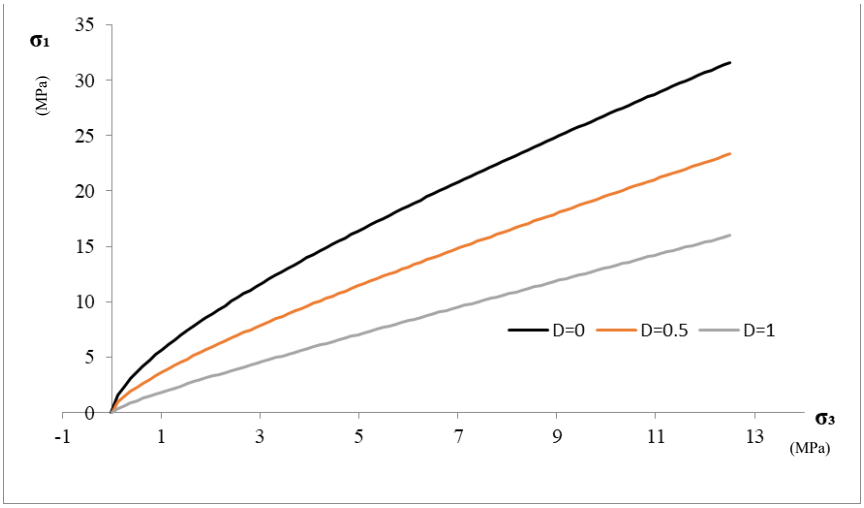


Figura 4. Envoltórias de ruptura ($\sigma_1 \times \sigma_3$), com tensões expressas em MPa.

A análise do gráfico evidencia que o aumento do fator D resulta em uma redução progressiva da resistência do maciço rochoso, refletida no rebaixamento das envoltórias de ruptura para níveis crescentes de perturbação. Observa-se que, para um mesmo nível de confinamento, os valores de resistência são sistematicamente menores à medida que D aumenta, sendo essa redução mais pronunciada para a condição de maciço altamente perturbado (D = 1).

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que o fator de distúrbio (D) exerce influência significativa no comportamento mecânico de maciços rochosos de qualidade intermediária (GSI = 15). O aumento do grau de perturbação provoca reduções expressivas e não lineares nos parâmetros de resistência e deformabilidade, evidenciando forte influência das condições de escavação sobre a resposta mecânica do maciço.

A comparação entre os diferentes níveis de distúrbio indicou reduções da ordem de 75% na coesão, 74% no ângulo de atrito e cerca de 50% no módulo de deformabilidade para a condição mais perturbada (D = 1), em relação ao estado pouco perturbado. Dessa forma, a correta definição do fator de distúrbio é essencial para análises de estabilidade e para o dimensionamento seguro de obras geotécnicas, evitando estimativas imprecisas do comportamento mecânico do maciço rochoso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Assis, A. P. *Mecânica das rochas.* Brasília, DF: Universidade de Brasília, 2013. Apostila Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/472028290/>. Acesso em: 14 jan. 2026.

Barbosa, J. A. Sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos. In: congresso brasileiro de geologia, 24., 1977, Belo Horizonte. *Anais*... Belo Horizonte: SBG, 1977.

Bieniawski, Z. T. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. New York: John Wiley & Sons, 1989.

Gonçalves, J. A. G. F. *Estabilidade de fundações e taludes em maciço rochoso*. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/9138>. Acesso em: 5 jan. 2026.

Grimstad, E.; Barton, N. *Updating of the Q-System for NMT*. In: International Symposium On Sprayed Concrete, 1993, Fagernes. Proceedings [...]. Oslo: Norwegian Concrete Association, 1993. p. 46-66.

Hoek, E.; Brown, E. T. *Empirical strength criterion for rock masses*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, New York, v. 106, n. GT9, p. 1013–1035, 1980.

Hoek, E. *Strength of rock and rock masses.* Internacional Society for Rock Mechanics –News Journal, [Lisboa], v. 2, n. 2, p. 4-16, 1994. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/294755153/>. Acesso em: 5 jan. 2026.

Hoek, E.; Carranza-Torres, C.; Corkum, B. *Hoek–Brown failure criterion – 2002 edition.* In: North American Rock Mechanics Symposium, 5., 2002, Toronto. Proceedings…Toronto: University of Toronto, 2002. p. 267–273.

Hoek, E.; Diederichs, M. S. *Empirical estimation of rock mass modulus*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Oxford, v. 43, n. 2, p. 203–215, 2006.

Hoek, E.; Kaiser, P. K.; Bawden, W. F. *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995.

Hoek, E. *Pratical rock engineering*. Toronto, on: Rocscience, 2023. E-book. Disponível em: <https://static.rocscience.cloud/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-E.Hoek-2023.pdf.> Acesso em: 5 jan. 2026.

Hoek, E.; Marinos, P. *Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Tunnels and Tunnelling International,* [London], v. 32, n. 11, p. 45-51, jan. 2000. Disponível em: <https://static.rocscience.cloud/assets/resources/learning/hoek/Predicting-Tunnel-Squeezing-Problems-in-Weak-Heterogeneous-Rock-Masses-2000.pdf.> Acesso em: 5 jan. 2026.

Lemos, B. L. S. *Avaliação Da Capacidade De Carga De Fundações Diretas Sobre Camada Suporte De Blocos De Rocha Compactados*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Federal do Ceará, Fortaleza, 2024. Disponível em: < http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/81196>. Acesso em: 8 fev. 2026.

Rocscience, INC. *RocLab: rock mass strength analysis using the Hoek–Brown failure criterion*. Toronto, Canadá, s.d. Manual do usuário, 2002.