



UTILIZAÇÃO DO CRITÉRIO DE RUPTURA DE HOEK-BROWN EM MECÂNICA DE ROCHA

Arlindo J. Bazante¹, Aarão A. Lima¹, Marconi E. Alcântara & Natanael V. Oliveira²

¹Departamento de Mineração e Geologia, ²Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, UFPB. CEP 58109-970, Campina Grande, PB, bazante@dmg.ufpb.br, aarao@dmg.ufpb.br, natanael@dem.ufpb.br.

Resumo. A Mecânica das rochas tem sido encarada mais seriamente nas obras de engenharia como aberturas subterrâneas, sendo uma das ciências responsáveis pela solução de problemas relacionados aos maciços rochosos como sua classificação, estado de tensão in situ bem como o dimensionamento de vãos, pilares e áreas de subsidência. A crescente complexidade dos projetos de mineração e o avanço a níveis cada vez mais profundos de exploração exigem técnicas cada vez mais precisas de dimensionamento. A utilização e teorização da Mecânica dos Sólidos nos regimes elástico e elastoplástico, aplicada à Mecânica das Rochas, são uma realidade. Nesse sentido, tem-se experimentado um extraordinário avanço, apesar de ser um ramo relativamente novo da ciência aplicada. Procura-se investigar neste trabalho, a correlação entre os critérios de ruptura de Hoek-Brown e o de Mohr-Coulomb. As técnicas de computação numérica, entre as quais os métodos dos elementos finitos e dos elementos de fronteira, têm dado uma grande contribuição à solução de problemas de engenharia calcados na análise de tensões, substituindo os modelos analíticos e físicos. Um programa, no ambiente MATLAB, foi codificado para estabelecer o campo de distribuição das tensões principais e a evolução das superfícies de escoamento, utilizando-se estes dois critérios. Em seguida, apresentam-se resultados em conjunção com o método dos elementos finitos em regime elástico e elastoplástico do campo de distribuição de tensões ao longo do túnel em função do fator de segurança.

Palavras-Chave: Ruptura, Envoltória, Elastoplástico, Mohr-Coulomb, Hoek-Brown.

1. INTRODUÇÃO

As tentativas de uma formulação matemática dos processos de dimensionamento das escavações deparam com os obstáculos decorrentes da dificuldade e da complexidade dos comportamentos mecânicos das rochas, além da influência das estruturas geológicas e da irregularidade da geometria das cavidades, as quais tornam os cálculos clássicos de estabilidade muito impreciso e de aplicabilidade discutível por métodos clássicos entendem-se aqueles baseados nas Teorias da Elasticidade e da Resistência dos Materiais, que assumem comportamentos ideais para os maciços rochosos. Em toda obra de engenharia, as fases que

antecedem o seu projeto pressupõem o conhecimento, com certo grau de confiança dos fatores que condicionam sua construção, sejam eles físicos ou econômicos. A complexidade dos projetos de mineração e o avanço a níveis cada vez mais profundos de exploração e extração, exigem técnicas cada vez mais precisas de dimensionamento. As técnicas de computação numérica, entre as quais os métodos dos elementos finitos e dos elementos de fronteira, têm dado uma grande contribuição à solução de problemas de engenharia calcados na análise de tensões, substituindo os modelos analíticos e físicos. Como em escavações é comum se encontrar o maciço rochoso em regime de pós-ruptura, é importante generalizar-se o Critério de Hoek-Brown para este regime. Pode-se, portanto, entender a caracterização de maciços rochosos à luz da Mecânica de Rocha, como o conhecimento das características que determinam seu comportamento mecânico em função das solicitações do seu entorno físico. Este Critério, foi concebido através de uma base de dados experimentais sobre ruptura de rocha em estado triaxial de tensões e análise estatística. É importante observar que a rocha constitui um caso particular de material de engenharia, e os problemas associados são bastante peculiares. Nas construções com materiais artificiais, a resistência dos materiais é composta em função das necessidades de resistência e esforços que lhe são aplicados. Já na rocha, a resistência lhe é intrínseca e as tensões existem independentemente de outras cargas externas que lhe são aplicadas. O que ocorrerá será uma redistribuição das tensões atuantes, decorrentes da particular estrutura superficial ou subterrânea construída na rocha. Na natureza é muito raro se encontrar massa de rocha com propriedades mecânicas uniformes, normalmente, as condições dos maciços rochosos variam de local a local. A estrutura mecânica da rocha apresenta várias aparências diferentes, de acordo com a escala, suas propriedades dependem de todas as feições estruturais. Contudo, aspectos individuais têm variados graus de importância em diferentes circunstâncias. Muitas vezes é necessário se atribuírem valores numéricos para as propriedades, sendo estes dados obtidos em testes de laboratório. Os projetos de escavações para mineração em rocha são frequentemente desenvolvidos levando-se em consideração o regime de pós ruptura do maciço rochoso, haja visto ser essa a condição de campo que possibilita a viabilidade econômica da mina.

2. TENSÕES NOS MACIÇOS ROCHOSOS

Para avaliação do estado de tensão do maciço rochoso, deve-se considerar dois aspectos: o primeiro, antes da execução de uma obra em rocha existe um estado de tensão decorrente das condições naturais dos maciços; o segundo aspecto é que após a execução da escavação o estado de tensão preexistente sofrerá uma redistribuição em função da forma da escavação e sua disposição espacial. Na caracterização da resistência dos materiais são utilizados os critérios de ruptura ou escoamento, para materiais frágeis ou dúcteis, respectivamente. Os parâmetros geomecânicos são obtidos através de ensaios de laboratório e no campo, bem como da experiência dos profissionais envolvidos, que fornecem os dados de coesão, ângulo de atrito interno, módulo de deformabilidade do maciço, etc. O número e a diversidade de classificações geomecânicas de materiais, maciços e estruturas rochosas estão relacionados às diferenças existentes entre materiais e propriedades, além dos objetivos visados pela classificação e das dimensões da obra de engenharia a ser construída (Ojima,1982 & Pincus, 1988). Os resultados de uma classificação normalmente não são universalmente aplicáveis, restringindo-se, *a priori*, àqueles casos para os quais a classificação foi originalmente determinada (Ojima,1982 & Pincus,1988). A classificação geomecânica é uma ferramenta que pretende, a partir da aplicação de determinados critérios, zonar o maciço rochoso em regiões de comportamentos mecânicos semelhantes. Algumas são ditas universais, ou seja, classificam o maciço rochoso pelo maciço sem se importar com a

onde :

m, s = constantes que dependem do tipo e características geológicas-geotectônicas do maciço rochoso

Para estimar, por exemplo, a resistência a tração de maciço rochosos, faz-se $\sigma_1 = 0$ e $\sigma_3 = \sigma_t$ na equação (4.2) obtendo-se:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_c}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (4.2)$$

Os parâmetros m e s refletem a qualidade (ou classe) do maciço rochoso analisado, segundo a equação:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (4.3)$$

Os valores de m e s são tabelados para diversas classes de rocha. A curvatura da envoltória expressa pela equação (4.3), depende do valor de $m\sigma_c$, e sua distância em relação ao eixo σ_3 depende do valor de $s\sigma_c^2$. Obtém-se a resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso a partir da resistência de uma amostra de laboratório fazendo-se $\sigma_3 = 0$ na equação (4.3), acarretando: Para rocha intacta (quando $s = 1$), $\sigma_M = \sigma_c$. Por outro lado, para rocha fraturada, ($s < 1$) com pressão de confinamento zero, a resistência é dada pela equação (4.4), sendo σ_c a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta. Este valor é uma medida da contribuição da coesão da rocha para com a resistência total do maciço rochoso.

$$\sigma_M = \sqrt{s\sigma_c^2} = \sqrt{s}\sigma_c \quad (4.4)$$

Similarmente, obtém-se a resistência à tração fazendo-se $\sigma_1 = 0$ na equação (4.1), neste caso $\sigma_3 = \sigma_t$, ou seja: $\sigma_t + \sqrt{m\sigma_M\sigma_t + s\sigma_M^2} = 0$ ou $\sigma_t^2 - m\sigma_M\sigma_t - s\sigma_M^2 = 0$

O critério de Hoek-Brown é utilizado de forma mais conveniente para análise de estabilidade de taludes, seguindo a equação (4.4).

$$\sigma_t = \frac{\sigma_M}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (4.5)$$

$$\frac{\tau}{\sigma_c} = A \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} + \frac{\sigma_t}{\sigma} \right)^B \quad (4.6)$$

5. CORRELAÇÃO ENTRE OS CRITÉRIOS DE MOHR-COULOMB E HOEK-BROWN

A importância de se correlacionarem diferentes critérios de ruptura advém da possibilidade de determinação dos parâmetros de um a partir dos parâmetros do outro, como ocorre entre os critérios clássicos de Mohr-Coulomb e Drucker-Prager (Owen & Hinton, 1980). Como a maioria das análises utilizadas em estabilidade de escavações subterrâneas ou para cálculo da estabilidade de taludes têm sido tradicionalmente formuladas

em função do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, uma questão relevante é como determinar valores equivalentes para o ângulo de fricção interna ϕ e a coesão c do critério de Mohr-Coulomb a partir da tangente à envoltória definida pelo critério de Hoek-Brown (Lima,1992). O ângulo que a tangente forma com a horizontal (ϕ') pode ser interpretado como o ângulo de atrito interno instantâneo ou aparente. Para determinarmos o ângulo β' deriva-se a equação (4.3) em relação a σ_3 , de onde se obtém:

$$\tan \beta' = 1 + \frac{\sigma_c}{2\sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2}} \quad (5.1)$$

Sendo assim, substituindo-se σ_c por σ_c' e β por β' , a equação da envoltória de Mohr-Coulomb assume a seguinte forma:

$$\sigma_1 = \sigma_c' + \sigma_3 \tan \beta' \quad (5.2)$$

Por outro lado, σ_1 deve satisfazer a equação (4.3). Portanto:

$$\sigma_c' = (1 - \tan \beta') \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (5.3)$$

Prosseguindo, de acordo com as equações (3.4) e (3.3), podemos calcular ϕ' e c' em função de $\tan \beta'$ e σ_c' , ou seja:

$$\phi' = 2[\arctan(\sqrt{\tan \beta'}) - 45^\circ] \quad (5.4)$$

$$c' = \sigma_c' \frac{1 - \sin \phi'}{2 \cos \phi'} \quad (5.5)$$

Onde $\tan \beta'$ e σ_c' são fornecidos pelas equações (5.1) e (5.3), que tem como variável apenas σ_3 . A partir daí concluímos que para cada valor de σ_3 a envoltória de Hoek-Brown possui valores diferentes para o ângulo de atrito interno e a coesão aparentes.

6. IMPLEMENTAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ESCOAMENTOS EM COMPUTADOR

A formulação mais adequada para implementação numérica dos critérios de escoamento em computador é através dos invariantes de tensões. Sua principal vantagem é permitir a codificação em computador da função de escoamento e da regra de fluxo, necessitando apenas as especificações de algumas constantes. A superfície de escoamento para um determinado sólido, referente a um critério de ruptura ou de escoamento, é obtida utilizando as três combinações de tensões principais. Para plotagem de uma superfície de escoamento deve-se conhecer a origem e uma seção genérica da mesma, gera-se então a superfície utilizando todas as combinações de tensões principais possíveis. Um *software* no ambiente MATLAB foi codificado para estabelecer o campo de distribuição das tensões principais e a evolução das superfícies de escoamento utilizando os dois critérios em análise.

6.1 Critério de Escoamento de Mohr-Coulomb

Este critério de escoamento é uma generalização da lei de ruptura por fricção de Coulomb, definida pela equação (3.1), pode-se também equacioná-lo em função das tensões

principais máximas e mínimas através da equação (3.2). Sua utilização em mecânica de rochas é mais adequada na sua abordagem tradicional.

$$\sigma_{max} = \sigma_c + \sigma_{min} \tan\beta \text{ ou } \sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \tan\beta \quad (6.1)$$

onde:

σ_c é a resistência à compressão axial do material, dada pela equação (3.3) e β obedece à equação (3.4). Portanto a equação (6.1) assume a seguinte forma:

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos\phi}{1 - \sin\phi} + \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \sigma_3 \quad (6.2)$$

onde:

σ_1 é a tensão principal máxima, responsável pela distorção; $\frac{2c \cos\phi}{1 - \sin\phi}$ é a constante de resistência do material; $\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}$ é o coeficiente de fricção interna do material e σ_3 é a tensão principal mínima, responsável pelo confinamento.

A superfície de escoamento para este critério é obtida considerando-se todas as combinações de tensões possíveis.

6.2 Critério de Escoamento de Hoek-Brown

O critério de escoamento de Hoek-Brown é definido pelas tensões principais máximas e mínimas e pela resistência à compressão. Sua superfície de escoamento é obtida de maneira similar ao de Mohr-Coulomb, considerando, também, as possíveis combinações de tensões.

Com raciocínio similar ao adotado para o critério de Mohr-Coulomb em relação à convenção de sinais (compressão positiva), e a partir da equação (4.1), obtém-se:

$$-\sigma_3 = -\sigma_1 + \sqrt{-m\sigma_c\sigma_1 + s\sigma_c^2} \quad \text{ou} \quad (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + m\sigma_c\sigma_1 - s\sigma_c^2 = 0 \quad (6.3)$$

logo, a função escoamento terá a seguinte forma:

$$F(\sigma_1, \sigma_3) = (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + m\sigma_c\sigma_1 - s\sigma_c^2 \quad (6.4)$$

7. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

A utilização de resultados baseados em soluções que assumem o comportamento puramente elástico do maciço rochoso é bastante generalizada para o dimensionamento de escavações subterrâneas. Observa-se entretanto que as escavações destinadas à extração de bens minerais geralmente exibem comportamento de pós-ruptura (modelo elastoplástico no presente estudo) em porções consideráveis do domínio de interesse. Uma comparação entre os fatores de segurança de soluções baseadas em modelo elástico e no modelo elastoplástico aqui proposto se torna oportuna para o critério de Hoek-Brown, haja vista que este critério tem sido extensivamente adotado nas implementações de programas comerciais para análise de tensões associadas a escavações em rocha. Vale ressaltar que fator de segurança igual a unidade sugere o estado limite de equilíbrio, quando menor que a unidade estado de ruptura e quando maior que a unidade sugere estabilidade. Quando for menor que a unidade o sistema

de sustentação nos pilares torna-se instável. Portanto, sugere-se fatores de segurança maior do que a unidade dentro de certo limite econômico. Nesta pesquisa concluímos que pode-se inferir as propriedades de resistência do maciço a partir da resistência da rocha intacta, calculada em laboratório, em conjunção com sistemas de classificação de maciço rochoso ou curva de efeito escala. Estabeleceu-se a correlação entre as propriedades c , ϕ , σ_c e β do critério de Mohr-Coulomb com s , m e σ_c do critério de Hoek-Brown, tendo sido constatada a sua exatidão numericamente através dos exemplos usando-se ambos os critérios. Observou-se ainda que através de exemplos baseados na solução aproximada pelo método tangente ao critério de Mohr-Coulomb, que a implementação elastoplástica do critério de Hoek-Brown está correta. A formulação aqui detalhada foi implementada numericamente em programa de elementos finitos (Owen & Hinton,1980), tendo sido obtidos resultados compatíveis com soluções empíricas para pilares em minas de carvão (Lima et alli,1997). Com isto fica demonstrada a utilidade de implementações com base teórica na soluções de problemas práticos. Por outro lado, para uma aplicação em túnel circular ficou evidente que o critério de Mohr-Coulomb super estima a resistência do maciço rochoso (Alcântara,1997)

8.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcântara, M. E., Implementação Elastoplástica do Critério de Ruptura de Hoek-Brown para Maciço Rochoso. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Paraíba - CCT-DEM-UFPB. Setembro de 1997
- Hoek, E. & Brown, E. T., 'The Hoek-Brown failure criterion' a 1988 update. Proc. 5th Can. Rock Mech. Symp, University of Toronto, pp. 31-38, 1988.
- Hoek, E. & Brown, E. T., 'Underground excavations in rock'. London, UK. The Institution of Mining & Metallurgy, 527p., 1980.
- Hoek, E., Technical Note. 'Estimating Mohr-Coulomb Friction and Cohesion Values from the Hoek-Brown Failure Criterion'. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Vol. 27, N°. 3, pp. 227-229, Great Britain, 1990.
- Hudson, J. A.; Arnold, P. N. & Tamai, A., 'Rock engineering mechanisms information technology (REMIT)', Part I - The basic method; Part II - Illustrative case examples. 7th. International Congress on Rock Mechanics. Aachen, Germany, ISRM, Vol. 2, pp., 1113-1119, 1991.
- Jaeger, J. C. & Cook, N. G. W., 'Fundamentals of rock mechanics', 2nd ed. Chapman and Hall, London, 1976.
- Lima, A. A. Gopinath, T. R. &Alcantara, M. E. Comparison of Pillar Strengths Using Empirical Equations and Finite Elements . 16th International Conference on Ground Control in Mining, pp.274-281, 1997
- Obert, L. & Duvall, W. I., 'Rock Mechanics and Design of Structures in Rock'. John Wiley, New York, 1967.
- Ojima, L. M., 'Metodologia de Classificação de Maciços Rochosos Aplicável a Túneis'. Síntese de Pós-Graduação N°. 1, ABGE, 1982.
- Owen, D. R. J. & Hinton, E., 'Finite Elements in Plasticity'. Pineridge Press, Swansea, 1980.
- Pincus, H. J., 'Opening remarks', in Engineering practice, Kirkaldie. L. (ed). Rock classification system for engineering purposes (STP 984). Philadelphia, USA, ASTM, pp. 01-03, 1988.