



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



DÉBORA MAGALHÃES CHÁCARA

CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DO CRITÉRIO DE RUPTURA DE
MOHR-COULOMB E O CRITÉRIO GENERALIZADO DE HOEK-BROWN

OURO PRETO
2017

DÉBORA MAGALHÃES CHÁCARA

CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DO CRITÉRIO DE RUPTURA DE
MOHR-COULOMB E O CRITÉRIO GENERALIZADO DE HOEK-BROWN

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Engenharia de Minas da
Universidade Federal de Ouro Preto, como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Minas

Orientador (a): Christianne de Lyra Nogueira

OURO PRETO

2017

C431c

Chácara, Débora.

Correlação entre os parâmetros do critério de ruptura de Mohr-Coulomb e o critério generalizado de Hoek-Brown [manuscrito] / Débora Chácara. - 2017.

34f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Profa. Dra. Christianne de Lyra Nogueira.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Mecânica das rochas. 2. Geotecnia - Critério de ruptura. 3. Estabilidade. I. Nogueira, Christianne de Lyra. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.121

Catlogação: ficha@sisbin.ufop.br



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 25 dias do mês de agosto de 2017, às 10h30min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“CORRELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DO CRITÉRIO DE RUPTURA DE MOHR-COULOMB E O CRITÉRIO GENERALIZADO DE HOEK-BROWN”**, pela aluna **Débora Magalhães Chácara**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof.ª. Dr.ª. Christianne de Lyra Nogueira (orientadora)**, **Prof. Dr. José Margarida da Silva M.Sc. Livia Maria Vasconcelos Pimenta**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela **APROVAÇÃO** da candidata, com a nota **9,0**, concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 25 de agosto de 2017.

Prof.ª. Dr.ª. Christianne de Lyra Nogueira
Presidente da Comissão Avaliadora e Professora Orientadora

Prof. Dr. José Margarida da Silva
Membro da Comissão Avaliadora

M.Sc. Livia Maria Vasconcelos Pimenta
Membro da Comissão Avaliadora

Débora Magalhães Chácara
Débora Magalhães Chácara

Prof. Ms.C. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar a dádiva da vida e por guiar os meus passos até aqui.

À minha mãe, Clara, por sempre me apoiar, por acreditar em mim e me incentivar a seguir todos os meus sonhos. Muito obrigada por toda a sua dedicação e pelo seu amor incondicional.

À minha orientadora, Christianne, pelo tempo, paciência, ensinamentos, dedicação e por sempre estar disposta a me ajudar.

Ao meu namorado, Geraldo, pelo carinho, apoio e por estar comigo em todos os momentos.

Aos meus amigos, pela motivação, companheirismo e cumplicidade.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

A mecânica das rochas insere-se no contexto da geomecânica e seu estudo é fundamental para definição do método de lavra e toda a geometria de uma mina. Quando se escava um maciço, suas tensões *in situ* são modificadas e sua redistribuição pode ocasionar situações de risco de rupturas de taludes ou aberturas subterrâneas. A avaliação do risco de ruptura pode ser definida a partir da determinação de um fator de segurança que por sua vez depende do critério de resistência adotado. Os critérios de resistência mais utilizados na atualidade são os critérios de Mohr-Coulomb e generalizado de Hoek-Brown. Assim, este trabalho tem como objetivo a obtenção automática de uma correlação ótima entre os parâmetros de resistência destes dois critérios. Com o auxílio de uma planilha eletrônica, foi possível obter os valores médios de coesão e ângulo de atrito que conduzem a um erro mínimo quadrático obtido entre os valores de tensão principal maior definida pelos dois critérios, dentro de uma determinada faixa de tensão principal menor e a partir de um conjunto de parâmetros de resistência do critério de Hoek-Brown.

Palavras-chave: mecânica das rochas, critérios de ruptura, Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, estabilidade de escavações, estabilidade de taludes

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Critério de Mohr-Coulomb (Goodman, 1989 <i>apud</i> AZEVEDO e MARQUES, 2002, P. 91).....	15
Figura 2 - Critério de ruptura de Mohr-Coulomb em função de σ_1 e σ_3 (Azevedo e Marques, 2002).....	17
Figura 3 - Diferença entre o critério de Hoek-Brown e o critério de Mohr-Coulomb (Eberhardt, 2012 <i>apud</i> BATALHA, 2016, P.22).....	19
Figura 4 - Valores de GSI para maciços rochosos em geral (Marinos e Hoek, 2000).....	23
Figura 5 - Valores de GSI para maciços rochosos heterogêneos (Marinos e Hoek, 2000).....	24
Figura 6 - Relação entre tensão principal maior e menor para o critério de Hoek-Brown e critério de Mohr-Coulomb equivalente (Hoek et al., 2002).....	26
Figura 7 - Modelo da planilha e parâmetros do Solver.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de resistência de rochas (Azevedo e Marques, 2002)..	16
Tabela 2 - Valores da constante m_i para rocha intacta, por grupo de rocha (Marinos & Hoek, 2000).....	18
Tabela 3 - Classificação da resistência à compressão (Notas de aula).....	20
Tabela 4 - Avaliação do RQD (Azevedo e Marques, 2002).....	21
Tabela 5 - Atribuição de pesos de acordo com o espaçamento das descontinuidades (Notas de aula, Nogueira, 2015).....	21
Tabela 6 - Atribuição de pesos de acordo com as condições das descontinuidades (Notas de aula, Nogueira, 2015).....	21
Tabela 7 - Avaliação segundo à influência da água (Notas de aula, Nogueira, 2015).....	22
Tabela 8 - Dados para cálculo dos parâmetros de resistência.....	30
Tabela 9 - Influência do número de pontos adotados ($\sigma_{3max}=50$ MPa).....	31
Tabela 10 - Influência do número de pontos adotados ($\sigma_{3max}=100$ MPa).....	31
Tabela 11 - Influência do número de pontos adotados ($\sigma_{3max}=200$ MPa).....	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. Critérios de ruptura	14
3.1.1. Critério de ruptura de Mohr-Coulomb	14
3.1.2. Critério de ruptura de Hoek-Brown	17
3.2. Determinação dos parâmetros de Mohr-Coulomb a partir do critério de ruptura generalizado de Hoek-Brown	25
4. MATERIAL E MÉTODOS	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
6. CONCLUSÃO	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1. INTRODUÇÃO

A mecânica do maciço rochoso é a área da engenharia que tem como finalidade o estudo das propriedades e o comportamento dos maciços rochosos. Ela é de extrema importância para a mineração, pois influi diretamente sobre os métodos de lavra, na geometria e dimensões das escavações e, conseqüentemente, na economicidade de uma mina. Através do estudo da mecânica do maciço rochoso torna-se possível identificar os riscos de rupturas de taludes, regiões de instabilidade em escavações, entre outras situações de risco, de forma que podem ser encontradas soluções para estes problemas, evitando acidentes e permitindo que as atividades sejam realizadas de maneira segura.

Os maciços rochosos são definidos como o conjunto de blocos de rochas e seu sistema de descontinuidades (planos de acamamento, xistosidades e juntas). É necessário o conhecimento das características destas descontinuidades, tais como orientação, persistência, espaçamento, entre outras, pois elas podem condicionar fortemente o comportamento geotécnico dos maciços, podendo diminuir a sua resistência mecânica. Muller (1963, *apud* Silva, 2017) revela que essa queda pode ser de até 30 vezes.

A resistência mecânica das rochas pode ser estimada pelos critérios de ruptura. O primeiro critério surgiu em 1773, proposto por Coulomb (1773), e leva em consideração apenas a força de atrito e a coesão do maciço rochoso. Com o decorrer dos anos, surgiram novos critérios empíricos, tais como os critérios de Tresca (1868), Hoek-Brown (1980) e Bieniawski (1989), que incorporaram outras características do maciço que também influenciam na sua resistência. A partir destes novos critérios, tornou-se possível refletir o comportamento do maciço com maior precisão e, conseqüentemente, possibilitou a determinação de fatores de segurança que representem melhor a realidade.

O critério de resistência de Mohr-Coulomb e o critério generalizado de Hoek-Brown (2002) são os mais utilizados na atualidade. O critério de Hoek-Brown leva em conta vários aspectos do maciço rochoso relacionados com a

presença de descontinuidades. Desta forma, tende a ser mais representativo do que o critério de Mohr-Coulomb.

2. OBJETIVO

Definir uma correlação entre os parâmetros de resistência do critério de ruptura de Mohr-Coulomb com os parâmetros de resistência do critério generalizado de Hoek-Brown.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Critérios de ruptura

O processo de ruptura da rocha é extremamente complexo e de difícil caracterização. Todavia, é importante conhecer as propriedades de ruptura para que seja possível prever quando ela ocorrerá (HUDSON e HARRISON, 2000).

Azevedo e Marques (2002) definem critérios de ruptura como funções de tensões relacionadas ao estado de ruptura de um material e é comum associá-lo às tensões correspondentes ao pico da curva tensão-deformação.

Na geomecânica são utilizados diversos critérios de ruptura. No âmbito da mecânica das rochas, os critérios de ruptura de Mohr-Coulomb e de Hoek-Brown são os mais comumente utilizados e, por isso, serão utilizados neste trabalho.

O critério de Mohr-Coulomb foi escrito, originalmente, em termos de uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal atuantes num determinado plano de um dado ponto do meio geológico. O critério de Hoek-Brown é um critério empírico escrito em termos das tensões principais (HUDSON e HARRISON, 2000).

Segundo Gerscovich (2010), independente do critério a ser utilizado, é comum trabalhar-se com o conceito de envoltória de ruptura (ou envoltória de resistência) a qual define o lugar geométrico dos estados de tensão na ruptura. Os estados de tensão inferiores aos da envoltória indicam estabilidade, enquanto estados de tensão acima da envoltória são estados de tensão impossíveis de ocorrer.

3.1.1. Critério de ruptura de Mohr-Coulomb

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb foi inicialmente proposto por Coulomb (1773), levando em conta que a resistência ao cisalhamento é composta por duas parcelas, uma devido à coesão e outra devido ao atrito.

Originalmente este critério foi escrito em termos da tensão de cisalhamento e da tensão normal que atuam no plano representado pelo ponto de tangência de um círculo de Mohr com a envoltória, ou seja:

$$\tau = S_i + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

onde σ é a tensão normal no plano de ruptura, ϕ é o ângulo de atrito e S_i é o intercepto coesivo ou simplesmente a coesão do material. O ângulo de atrito e a coesão são parâmetros do material que podem ser obtidos a partir de ensaios triaxiais com corpos de prova confeccionados com amostra de rocha intacta (AZEVEDO e MARQUES, 2002).

A envoltória de ruptura, no espaço das tensões normal e cisalhante, é traçada a partir dos círculos de Mohr que representam o estado de tensão principal no instante da ruptura de cada ensaio triaxial. No caso do critério de Mohr-Coulomb, a envoltória é definida como uma linha reta que tangencia os diversos círculos. O coeficiente linear desta reta é definida como a coesão (S_i) e o coeficiente angular está relacionado ao ângulo de atrito do material (ϕ) (Figura 1).

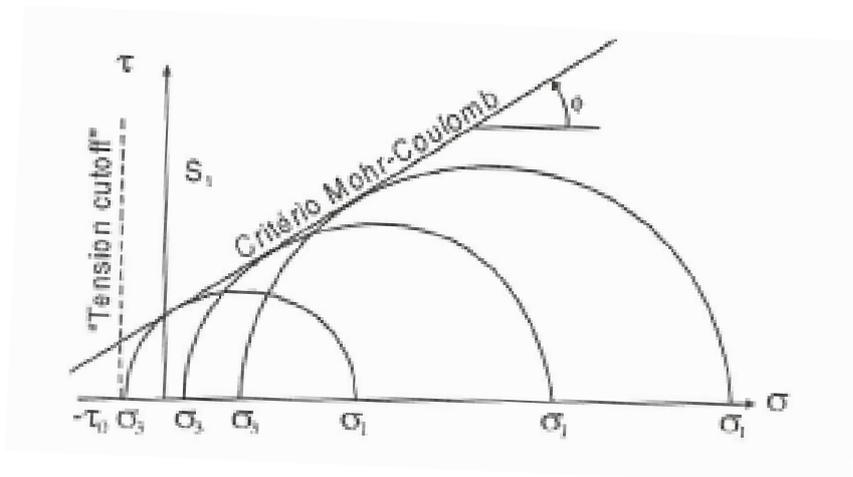


Figura 1: Critério de Mohr-Coulomb (Goodman, 1989 *apud* AZEVEDO e MARQUES, 2002, P.91)

A Equação 1 mostra que a ruptura por cisalhamento ocorre quando a tensão cisalhante atuando num determinado plano de um determinado ponto alcança a resistência ao cisalhamento neste plano que, por sua vez, depende da tensão normal que atua neste plano.

Na Tabela 1 são apresentados alguns valores dos parâmetros de resistência para alguns tipos de rochas, obtidos através de ensaios triaxiais, para os valores de pressão de confinamento indicados.

Tabela 1: Parâmetros de resistência de rochas (modificado de Azevedo e Marques, 2002)

Rocha	Porosidade	S_i (MPa)	ϕ (°)	Pressão confinante (MPa)
Ardosia Texas: carregada a 30° com a clivagem 90° com a clivagem	NI	26,2 70,3	21,0 26,9	34,5-276 34,5-276
Arenito Pottsville	14,0	14,9	45,2	0-68,9
Basalto Nevada	4,6	66,2	31,0	3,4-34,5
Dolomito Hasmark	3,5	22,8	35,5	0,8-5,9
Folhelho Muddy	4,7	38,4	14,4	0-200
Gnaisse xistoso 90° com a xistosidade 30° com a xistosidade	0,5 1,9	46,9 14,8	28,0 27,6	0-69 0-69
Granito Stone Mountain	0,2	55,1	51,0	0-68,9
Mármore Georgia	0,3	21,2	25,3	5,6-68,9
Quartzito Sioux	NI	70,6	48,0	0-203
Siltito Indiana	19,4	6,7	42,0	0-9,6
Siltito Repetto	5,6	34,7	32,1	0-200

NI – não informado

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb pode ser escrito em termos das tensões principais, maior (σ_1) e menor (σ_3), atuando num determinado ponto, tal como:

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

ou ainda, tal como:

$$\sigma_1 = q_u + \sigma_3 \tan \psi \quad (3)$$

em que q_u é a resistência à compressão uniaxial, definida como:

$$q_u = \frac{2S_i \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4a)$$

e

$$\tan \psi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4b)$$

A Figura 2 representa o critério de ruptura de Mohr-Coulomb em função de σ_1 e σ_3 , onde $(-T_0)$ é a resistência à tração uniaxial.

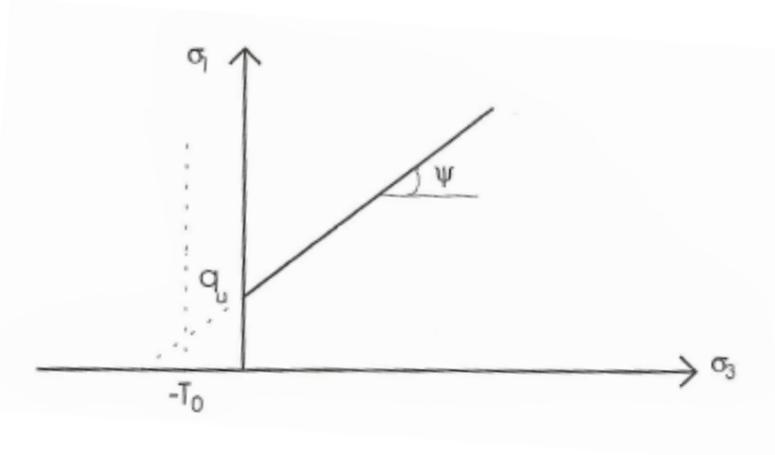


Figura 2: Critério de ruptura de Mohr-Coulomb em função de σ_1 e σ_3 (Azevedo e Marques, 2002)

3.1.2. Critério de ruptura de Hoek-Brown

O critério de ruptura de Hoek-Brown foi desenvolvido na década de 1980 com base em resultados de ensaios experimentais realizados com rochas duras. No espaço das tensões principais, o critério descreve uma relação não linear, que pode ser traduzida pela seguinte expressão:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s} \quad (5)$$

em que m_i é uma constante petrográfica, σ_{ci} resistência à compressão uniaxial da rocha intacta e s é um parâmetro ajustável que é obtido a partir de ensaios triaxiais realizados em amostras de rochas intactas. A constante petrográfica (m_i) varia em torno de 15 a 25 para rochas frágeis, e, em torno de 3 a 5 para rochas dúcteis. O parâmetro ajustável (s) varia de 0 a 1, sendo 0 para rochas muito fraturadas e 1 para rochas intactas (AZEVEDO e MARQUES, 2002). A constante petrográfica possui valores tabelados para diversas classes de rocha tal como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2: Valores da constante m_i para rocha intacta, por grupo de rocha (Marinos & Hoek, 2000)

Tipo de rocha	Classe	Grupo	Textura			
			Grosseira	Média	Fina	Muito fina
Sedimentar	Clástica		Conglomerado (*)	Arenito 17±4	Siltito 7±2	Argilito 4±2
			Brecha (*)		Grauvaca 18±3	Folhelho 6±2
						Marga 7±2
	Não clástica	Carbonatado	Calacério Cristalina 12±3		Calcário 9±2	Dolomita 9±3
		Químico		Gesso 8±2	Anidrita 12±2	
Orgânico					Giz 7±2	
Metamórfica	Não foliada		Mármore 9±3	Corneana 19±4	Quartzito 20±3	
	Levemente foliada		Migmatito 29±3	Anfibolito 26±6	Gnaiss 28±5	
	Foliada (**)			Xisto 12±3	Filito 7±3	Ardósia 7±4
Ígnea	Plutônica	Claras	Granito 32±2	Diorito 25±5		
			Granodiorito 29±3			
		Escuras	Gabro 27±3	Dolorito 16±5		
			Norito 20±5			
	Hipobissais		Pórfiro 20±5		Diabásio 15±5	Peridotito 25±5
	Vulcânica	Lava	Riolito 20±5		Dacito 25±3	
			Andesito 25±5		Basalto 25±5	
Piroclástica extrusiva		Aglomerado 19±3	Brecha 19±5	Turfa 13±5		

Nota: (*) Brechas e conglomerados podem apresentar ampla faixa de valores de m_i dependendo do grau de cimentação e natureza do cimentante.

(**) No caso de rochas foliadas, os valores de m_i se referem à direção normal dos planos de foliação. Na direção paralela à foliação, os valores podem ser diferentes.

O critério de Hoek-Brown, portanto, leva em conta tanto a informação da resistência da rocha intacta quanto do maciço rochoso (AZEVEDO e MARQUES, 2002). Isso é considerado uma grande diferença entre os modelos de Hoek-Brown e os demais encontrados na literatura, como o critério de Mohr-Coulomb.

A Figura 3 ilustra os critérios de Hoek-Brown e Mohr-Coulomb no espaço das tensões normal e cisalhante (BATALHA, 2016).

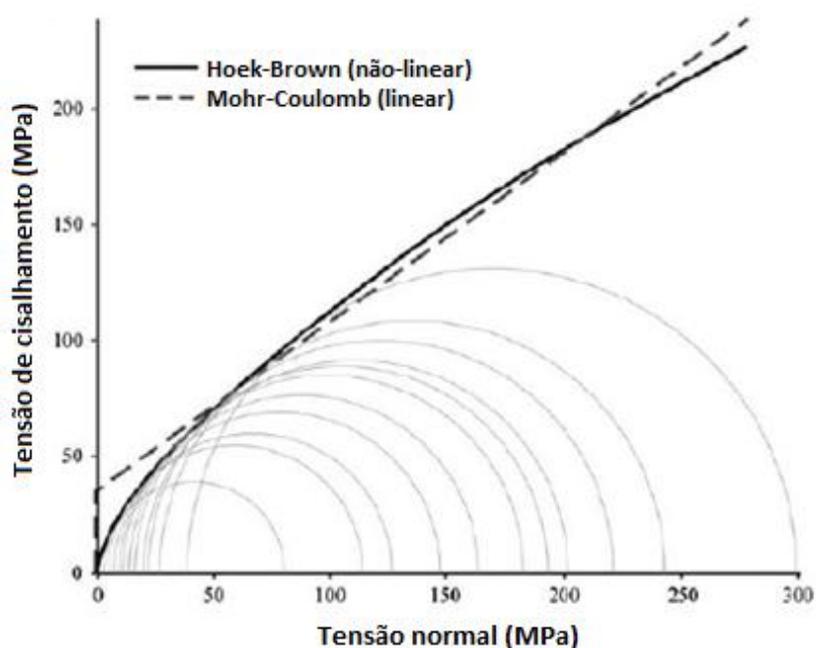


Figura 3 - Diferença entre o critério de Hoek-Brown e o critério de Mohr-Coulomb (Modificado de Eberhardt, 2012 *apud* BATALHA, 2016, P.22)

Em 1988, Hoek e Brown (Hoek e Brown, 1988) propuseram atualizações no critério, de forma a se levar em consideração a qualidade da rocha utilizando o conceito do RMR (Rock Mass Rating), que foi proposto por Bieniawski (1976) para classificação geomecânica de maciços rochosos.

Segundo Azevedo e Marques (2002), Bieniawski (1973) apresentou um sistema de classificação para os maciços rochosos fraturados de modo a dividi-los em grupos de comportamentos semelhantes. Este sistema de classificação fornece uma base para o entendimento das características do maciço, facilita o projeto de estruturas em rochas por meio de dados quantitativos e fornece uma

base para a comunicação entre as pessoas envolvidas no problema geomecânico.

O RMR (Rock Mass Rating) é um sistema de classificação que se baseia na atribuição de pesos a parâmetros que influenciam o comportamento do maciço rochoso. Esses pesos são somados, constituindo um índice (RMR) que pode variar de 0 a 100. Para cada faixa de RMR, tem-se uma classe de qualidade de maciços definida. Os parâmetros utilizados são:

1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

Bieniawski utilizou a classificação desenvolvida por Deere e Miller (1966), conforme a Tabela 3. Este parâmetro pode atingir um valor máximo de 15 pontos.

Tabela 3: Classificação da resistência à compressão (Notas de aula, Nogueira, 2015)

Descrição	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Exemplos de rocha
Resistência muito baixa	1-25	Sal
Resistência baixa	25-50	Carvão, siltito, xisto
Resistência média	50-100	Arenito, ardósia, folhelho
Resistência alta	100-200	Mármore, granito, gnaisse
Resistência muito alta	>200	Quartzito, gabro, basalto

2. RQD (“Rock Quality Designation”)

Este parâmetro foi proposto por Deere (1963) e pode atingir até 20 pontos, como mostra a Tabela 4. Ele é determinado através da análise da porcentagem de recuperação de testemunhos de sondagem definida como a relação entre o somatório dos fragmentos de rocha maiores ou iguais a 10 cm pelo comprimento total do testemunho de sondagem.

Tabela 4: Avaliação do RQD (Azevedo e Marques, 2002)

RQD (%)	Avaliação
90 - 100	20
75 – 90	17
50 – 75	13
25 – 50	8
< 25	3

3. Espaçamento das descontinuidades

Este parâmetro é avaliado de acordo com a Tabela 5, a partir do testemunho de sondagem.

Tabela 5: Atribuição de pesos de acordo com o espaçamento das descontinuidades (Notas de aula, Nogueira, 2015)

Espaçamento	Pesos
>2	20
0,6-2	15
0,2-0,6	10
0,06-0,2	8
<0,06	5

4. Condição das descontinuidades

Neste parâmetro, leva-se em conta a abertura, rugosidade, persistência, condição das paredes, a presença e o tipo de material de preenchimento das descontinuidades. Os pesos são atribuídos de acordo com a Tabela 6 a seguir.

Tabela 6: Atribuição de pesos de acordo com as condições das descontinuidades (Notas de aula, Nogueira, 2015)

Descrição	Peso
Superfícies muito rugosas, não persistentes, fechadas, paredes sem alteração	30
Superfícies pouco rugosas, abertura < 1mm, paredes levemente alteradas	25
Superfícies pouco rugosas, abertura < 1mm, paredes muito alteradas	20
Superfícies estriadas, persistentes, preenchimento < 5mm ou abertura de 1-5mm	10
Preenchimento > 5mm ou abertura > 5mm, persistentes	0

5. Influência da água

Considera-se a velocidade do fluxo de água ou a razão entre a pressão de água e a tensão principal maior, ou, ainda, a observação qualitativa das condições de fluxo nas descontinuidades, conforme a Tabela 7.

Tabela 7: Avaliação segundo a influência da água (Notas de aula, Nogueira, 2015)

Vazão por 10m de túnel (litros por min)	Pressão neutra/ σ_1	Condições gerais	Peso
0	0	Seca	15
<10	<0,1	Umedecida	10
10-25	0,1-0,2	Úmida	7
25-125	0,2-0,5	Gotejando	4
>125	>0,5	Fluxo abundante	0

Na versão atualizada do critério de Hoek-Brown (1988) tem-se que:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s} \quad (6)$$

onde m_b é um valor reduzido da constante petrográfica (m_i) que depende do RMR de modo que, para um maciço não perturbado:

$$m_b = m_i \exp^{(RMR-100)/28} \quad (7)$$

$$s = \exp^{(RMR-100)/8} \quad (8)$$

e para um maciço perturbado:

$$m_b = m_i \exp^{(RMR-100)/14} \quad (9)$$

$$s = \exp^{(RMR-100)/6} \quad (10)$$

Posteriormente, em 1992, foi proposta mais uma modificação para aplicação em maciços rochosos muito fraturados ($s=0$) e que não possuíam resistência à tração. Para isso, foi introduzido um novo parâmetro (a) e o critério passou a ser escrito como:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} \right)^a \quad (11)$$

Além da modificação proposta acima, reconheceu-se que o RMR não era mais adequado para relacionar o critério de ruptura com observações geológicas feitas no campo, especialmente para maciços rochosos muito frágeis. Isso resultou na introdução do Geological Strength Index (GSI) (WYLLIE e MAH, 2004).

O GSI fornece um sistema para estimar a redução da resistência do maciço rochoso em diferentes condições geológicas. O GSI corresponde ao RMR desprezando a parcela devido ao ajuste da descontinuidade (SIMÃO, 2014).

As Figuras 4 e 5 a seguir apresentam valores de GSI para diferentes maciços rochosos.

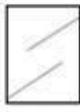
Rock Type: General	SURFACE CONDITIONS				
	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY →				
 INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
 BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
 VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60	50		
 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
 DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
 LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					10
	N/A	N/A			

Figura 4: Valores de GSI para maciços rochosos em geral (Marinos e Hoek, 2000)

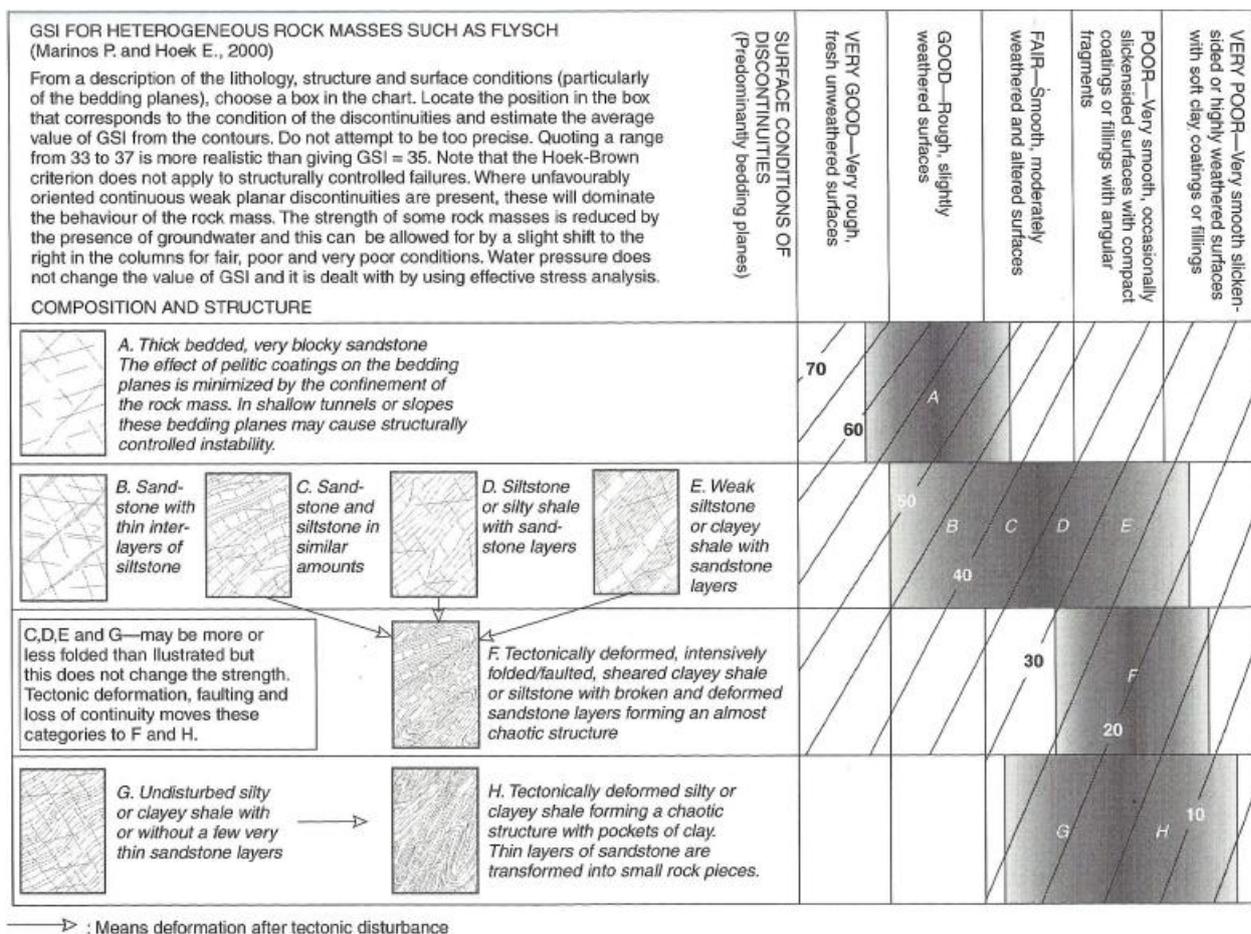


Figura 5: Valores de GSI para maciços rochosos heterogêneos (Marinos e Hoek, 2000)

De uma forma geral, o critério de Hoek-Brown é escrito na forma geral independente do grau de fraturamento do maciço como:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (12)$$

Hoek et al (1995) propuseram a seguinte definição para os parâmetros do critério em função do GSI:

$$m_b = m_i \exp^{(GSI-100)/28} \quad (13)$$

E, para um maciço com $GSI > 25$:

$$s = \exp^{(GSI-100)/8} \quad (14)$$

$$a = 0,5 \quad (15)$$

e para um $GSI < 25$:

$$s = 0 \quad (16)$$

$$a = 0,65 - \frac{GSI}{200} \quad (17)$$

Recentemente, Hoek et al (2002) propuseram uma modificação no critério, incluindo um fator que depende do grau de perturbação ao qual o maciço rochoso foi submetido durante o desmonte e da relaxação das tensões. Desta forma, os parâmetros m_b , s e a foram modificados, de modo que:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (18)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (19)$$

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

O fator D varia de 0, para maciço rochoso nas condições naturais, e 1 para maciço muito perturbado (WYLLIE e MAH, 2004).

Através do critério de resistência de Hoek-Brown tornou-se possível estimar os parâmetros dos maciços rochosos através apenas de observações de campo e da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta. Devido a isto, ele tem sido largamente utilizado para determinar a deformação e a capacidade de suporte dos maciços rochosos (SIMÃO, 2014).

3.2. Determinação dos parâmetros de Mohr-Coulomb a partir do critério de ruptura generalizado de Hoek-Brown

Como a maioria dos softwares de geotecnia ainda são escritos em termos do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, é necessário determinar um ângulo de atrito e uma coesão equivalentes, utilizando os parâmetros do critério de Hoek-Brown.

Hoek et al. (2002) propuseram um processo de ajuste de curvas que envolve balancear as áreas acima e abaixo do gráfico de Mohr-Coulomb, tal como ilustrado na Figura 6. Este processo conduziu às seguintes equações para o ângulo de atrito e coesão:

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{(a-1)}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{(a-1)}} \right] \quad (21)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma'_{3n}] (s + m_b \sigma'_{3n})^{(a-1)}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{(a-1)}} / (1+a)(2+a)} \quad (22)$$

onde:

$$\sigma'_{3n} = \sigma'_{3\max} / \sigma'_{ci} \quad (23)$$

em que $\sigma'_{3\max}$ é a tensão principal máxima definido como um valor arbitrado de magnitude pertencente ao campo tensões de cada problema individual.

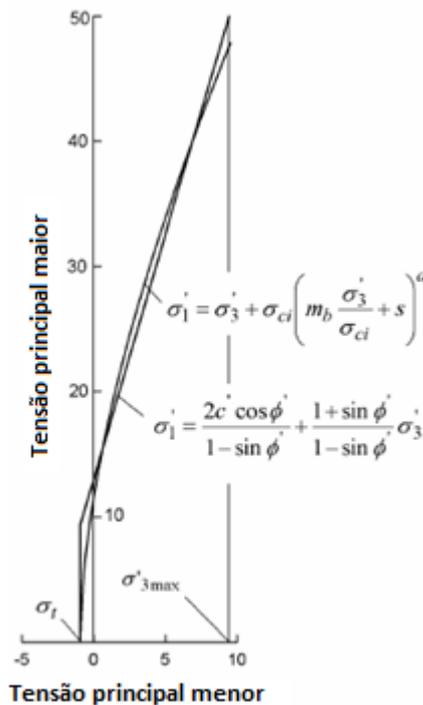


Figura 6: Relação entre tensão principal maior e menor para o critério de Hoek-Brown e critério de Mohr-Coulomb equivalente (Modificado de Hoek et al., 2002)

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho adota a técnica de otimização que utiliza os conceitos de programação matemática não linear com restrição de desigualdade para determinar os parâmetros de resistência do critério de Mohr-Coulomb que equivalem aos parâmetros de resistência de Hoek-Brown.

De uma forma geral, um problema de programação matemática pode ser escrito da seguinte forma:

Determinar \mathbf{p} , que

Minimiza $f(\mathbf{p})$

Sujeito às restrições $\mathbf{p}_l \leq \mathbf{p} \leq \mathbf{p}_u$

em que \mathbf{p} é um vetor que contém os parâmetros de cada modelo, \mathbf{p}_l e \mathbf{p}_u são os valores limites de \mathbf{p} e $f(\mathbf{p})$ é a função objetivo que representa o ajuste entre os valores observados e calculados.

Neste trabalho a função objetivo foi definida como o erro mínimo quadrático entre o valor da tensão principal maior obtida pelo critério de Hoek-Brown (σ_1^{HB} , Equação 12) e o valor da tensão principal maior obtida pelo critério de Mohr-Coulomb (σ_1^{MC} , Equação 3), ou seja:

$$fo(c, \phi) = \sum_{i=1}^n \left[\left(\sigma_{1,i}^{\text{HB}} - \sigma_{1,i}^{\text{MC}}(c, \phi) \right)^2 \right] \quad (24)$$

onde n representa o número de medidas.

Para isso, é necessário o valor da tensão principal menor máxima ($\sigma'_{3\text{max}}$). Ela é usada para definir o limite do nível de tensão de confinamento (σ'_3) no qual a análise deverá ser feita e é um valor arbitrado qualquer. Uma boa sugestão, é defini-la em função do valor do coeficiente de tensão horizontal (K). Para valores de K menores que a unidade, a tensão principal menor máxima será igual à tensão horizontal ($\sigma'_{3\text{max}} = \sigma_h$), definida como:

$$\sigma_h = K \sigma_v \quad (25)$$

onde

$$\sigma_v = \gamma h \quad (26)$$

Em que γ e h são o peso próprio do material e altura, respectivamente. Para valores de K maiores que a unidade a tensão principal menor será igual à tensão vertical ($\sigma'_{3\max} = \sigma_v$).

A partir dos valores inicialmente fornecidos para o critério de Hoek-Brown, quais sejam: σ_{ci} , m_i , D e GSI , são avaliados os parâmetros: m_b (Equação 18), s (Equação 19) e a (Equação 20). Variando-se a tensão principal menor de zero até o seu valor máximo, determinam-se os respectivos níveis de tensão principal maior aplicando a Equação 12.

Arbitrando-se aleatoriamente valores reais e positivos para a coesão e o ângulo de atrito, avaliam-se os níveis de tensão principal maior de acordo com o critério de Mohr-Coulomb (Equação 3).

A partir dos valores gerados inicialmente calcula-se o erro mínimo quadrático que por sua vez é alterado, alterando-se os valores de c e ϕ de acordo com o comando Solver, uma ferramenta do EXCEL.

O Solver resolve um problema de minimização com ou sem restrição, em que o usuário escreve a função objetivo e suas respectivas restrições. Este recurso é também chamado de ferramentas de análise hipotética.

Com o Solver pode-se localizar o valor ideal para uma fórmula em uma célula, denominada célula de destino, de uma planilha. Ele trabalha com um grupo de células relacionadas direta ou indiretamente com a fórmula na célula de destino, ajustando os valores nas células variáveis que devem ser especificadas (denominadas células ajustáveis) para produzir o resultado especificado na fórmula da célula de destino. Pode-se aplicar restrições para delimitar os valores que o Solver poderá usar no modelo e as restrições podem se referir a outras células que afetem a fórmula da célula de destino (Nascimento e Nogueira, 2010)

A Figura 7 ilustra a planilha adotada indicando as células com a função objetivo e as células ajustáveis (realçadas em amarelo), e mostra quais são os parâmetros do comando Solver.

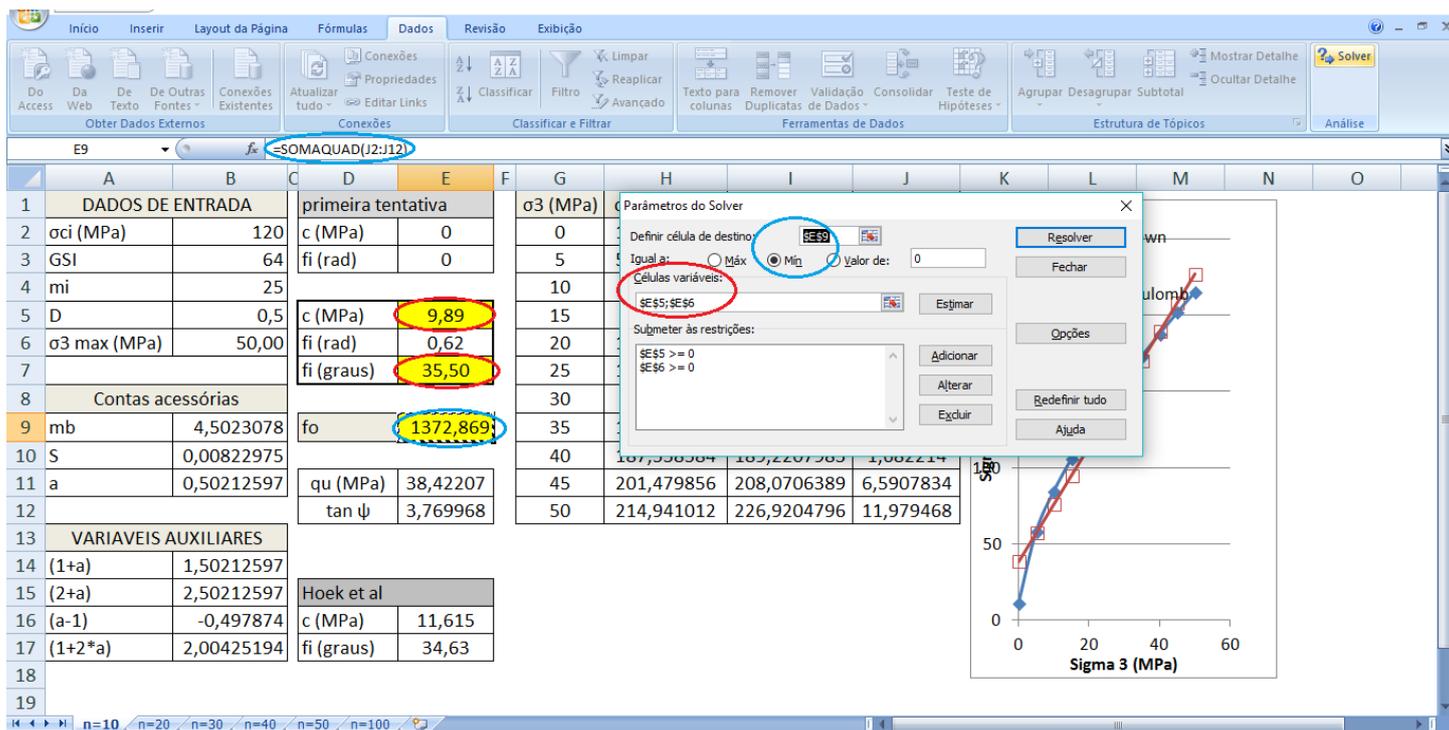


Figura 7: Modelo da planilha e parâmetros do Solver

Após utilizado o Solver, comparou-se os valores fornecidos pela planilha com os valores fornecidos através das Equações 21 e 22, propostas por Hoek et al. (2002).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados utilizados neste trabalho foram arbitrados e se encontram na Tabela 8.

Tabela 8: Dados para cálculo dos parâmetros de resistência

σ_{ci} (MPa)	120
GSI	64
m_i	25
D	0,5

Arbitraram-se também, três valores para a tensão de confinamento máxima (σ'_{3max}), necessárias para o cálculo de σ'_{3n} (Equação 23). Os valores utilizados foram: 50 MPa, 100 MPa e 200 MPa.

Para cada nível de tensão, foram realizados seis testes, modificando o número de pontos (n) indicados na Equação (24). As Tabelas 9, 10 e 11, a seguir, mostram os valores obtidos por este trabalho e os valores obtidos através das Equações 21 e 22. Como pode ser observado, a metodologia adotada neste trabalho fornece valores muito próximos dos fornecidos por Hoek et al (2002).

Pode-se observar também que o erro relativo entre os valores obtidos por Hoek et al (2002) e os valores obtidos por este trabalho é influenciado pelo número de medidas adotado de modo que quanto maior o número de medidas, menor o erro relativo. O erro relativo cometido para as medidas de coesão não ultrapassou 1,5% e para as medidas de ângulo de atrito este erro relativo não ultrapassou 0,3%.

Tabela 9: Influência do número de pontos adotados ($\sigma_{3max}=50$ MPa)

Metodologia adotada (Solver Excel)					Hoek et al (2002)	
n	c(MPa)	erro 1 (%)	$\phi(^{\circ})$	erro 2 (%)	c^H (MPa)	$\phi^H(^{\circ})$
10	9,98	14,81	35,50	-2,5	11,62	34,63
20	10,86	6,54	35,01	-1,1		
30	11,18	3,70	34,84	-0,6		
40	11,35	2,30	34,75	-0,4		
50	11,45	1,46	34,70	-0,2		
100	11,64	-0,18	35,60	0,1		

erro 1= $(c^H-c)/c^H$ erro 2= $(\phi^H-\phi)/\phi^H$

Tabela 10: Influência do número de pontos adotados ($\sigma_{3max}=100$ MPa)

Metodologia adotada (Solver Excel)					Hoek et al (2002)	
n	c(MPa)	erro 1 (%)	$\phi(^{\circ})$	erro 2 (%)	c^H (MPa)	$\phi^H(^{\circ})$
10	15,20	17,27	29,87	-3,5	18,38	28,86
20	16,87	8,22	29,34	-1,7		
30	17,44	5,09	29,16	-1,0		
40	17,73	3,54	29,07	-0,7		
50	17,90	2,61	29,01	-0,5		
100	18,23	0,80	28,90	-0,1		

erro 1= $(c^H-c)/c^H$ erro 2= $(\phi^H-\phi)/\phi^H$

Tabela 11: Influência do número de pontos adotados ($\sigma_{3max}=200$ MPa)

Metodologia adotada (Solver Excel)					Hoek et al (2002)	
n	c(MPa)	erro 1 (%)	$\phi(^{\circ})$	erro 2 (%)	c^H (MPa)	$\phi^H(^{\circ})$
10	23,37	18,88	24,49	-4,4	28,81	23,45
20	26,14	9,27	23,97	-2,2		
30	27,10	5,94	23,78	-1,4		
40	27,57	4,28	23,69	-1,0		
50	27,86	3,29	23,64	-0,8		
100	28,42	1,35	23,53	-0,3		

erro 1= $(c^H-c)/c^H$ erro 2= $(\phi^H-\phi)/\phi^H$

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho mostrou que a técnica de minimização adotando a ferramenta Solver do Excel fornece valores de coesão e ângulo de atrito muito próximos dos valores fornecidos pelas equações de Hoek et al (2002). Os valores inicialmente fornecidos pelo usuário para a coesão e o ângulo de atrito são valores aleatórios podendo ser, inclusive, adotados como nulos. A ferramenta desenvolvida neste trabalho pode ser utilizada facilmente e fornecerá, com uma excelente aproximação e de forma automática, os valores de coesão e ângulo de atrito equivalentes aos parâmetros de resistência do critério generalizado de Hoek-Brown.

Para futuros trabalhos, deixo como sugestão que se estabeleça uma correlação entre o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e outros critérios, como, por exemplo, o de Tresca (1868) e Bieniawski (1989).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, I. C. D.; MARQUES, E. A. G. Introdução à Mecânica das Rochas. Viçosa: UFV, 2002.

BATALHA, A. F. N. Determinação da capacidade de carga de fundações superficiais em maciço rochoso. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto: 2016.

DAS, B. M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. Tradução da 6ª edição americana. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

GOMES, J; GARCIA, D. M; ROMANEL, C. Análise numérica 3D da estabilidade de taludes de grande altura em minas a céu aberto. CILAMCE, 2016.

HOEK, E.; CARRANZA-TORRES, C.; CORKUM, B.– Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition, Proc. Of the Fifith North American Rock Mechanics Symposium and Seventeenth Tuneling Association of Canada Conference, 2002.

HOEK, E; MARINOS, P. Predicting Tunnel Squeezing. *Tunnels and Tunnelling International*. 2000.

HUDSON, J.A.; HARRISON, J.P. Engineering rock mechanics, an introduction to the principles. 2ª edição. 2000.

MALHEIRO, D. J. Investigação sobre a carga última de fundações superficiais em solos granulares considerando o peso próprio. Universidade do Porto. Porto, Portugal. 2009.

MARINOS, P; HOEK, E. GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation. *Proc. GeoEng2000 Conference*, Melbourne. 2000.

NASCIMENTO, S.C. e NOGUEIRA, C. L. Determinação automática de parâmetros constitutivos de modelos para problemas de fluxo em meio poroso não saturado. Relatório Final PIP 2009-2010, 2010.

NOGUEIRA, C. L. Mecânica das Rochas - Notas de Aula. Departamento de Engenharia de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto.

SILVA, J.M. Tensões em Maciços Rochosos. Estabilidade de Escavações Subterrâneas. DEMIN. UFOP. 2017.

SIMÃO, J. T. Um modelo numérico para análise elastoplástica de maciços rochosos com base no critério de ruptura de Hoek-Brown. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2014.

WYLLIE, D. C; MAH, C. W. Rock Slope Engineering. 4ª edição. 2004.