

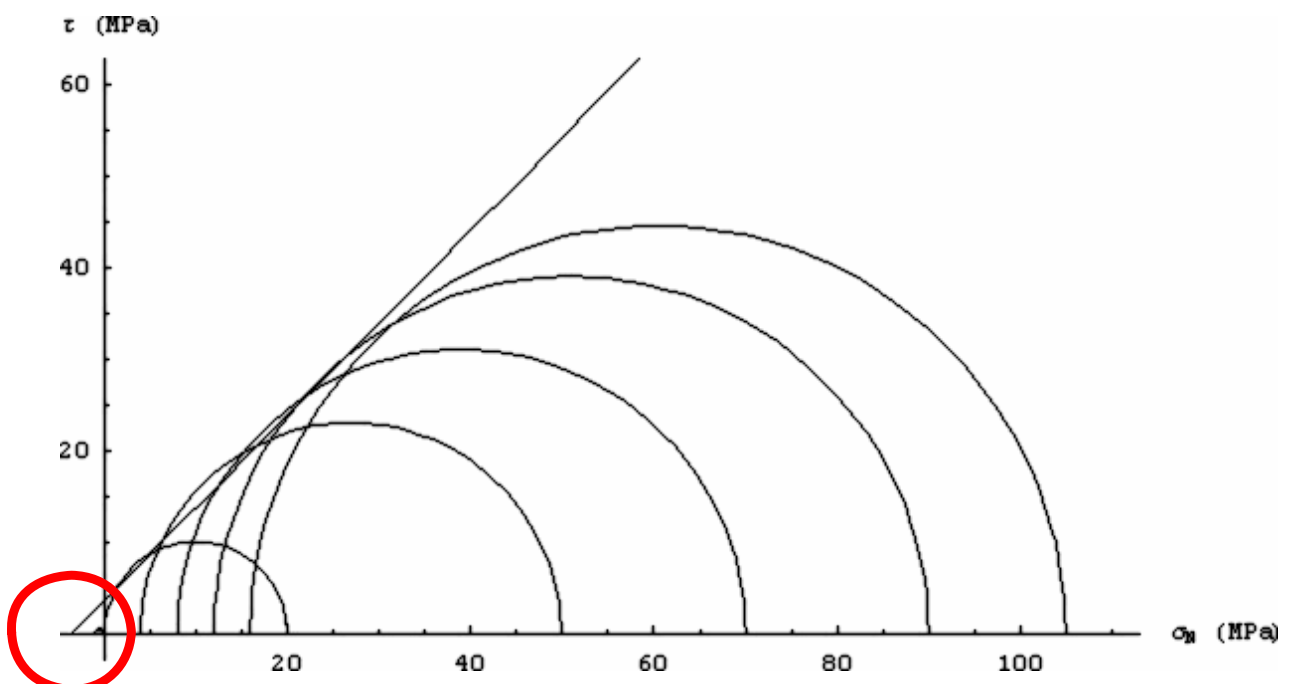


**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**

CRITÉRIOS DE RUPTURA PARTE 3

**PMI 3309 - Mecânica de Rochas Aplicada à Mineração II
Prof. Eduardo César Sansone**

CRITÉRIO DE RUPTURA DE MOHR-COULOMB



**Problemas com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb
na região de tensões negativas**



CRITÉRIO DE RUPTURA DE GRIFFITH

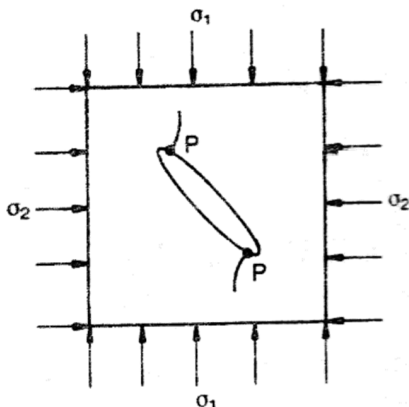
3

CRITÉRIO DE RUPTURA DE GRIFFITH

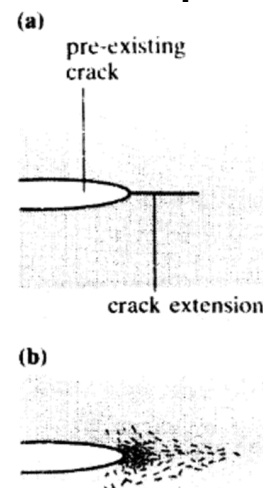


Segundo a hipótese de Griffith, a ruptura de materiais frágeis como as rochas, se inicia quando a resistência à tração do material é excedida pelas tensões geradas nas extremidades das fissuras microscópicas (pequenas fraturas ou contornos de grãos) presentes na rocha.

Griffith desenvolveu uma solução para a distribuição de tensões no entorno de fissuras de formato elíptico em um meio elástico-linear isotrópico.



Modelo de Griffith



a) Hipótese de Griffith
b) Real comportamento das rochas

4



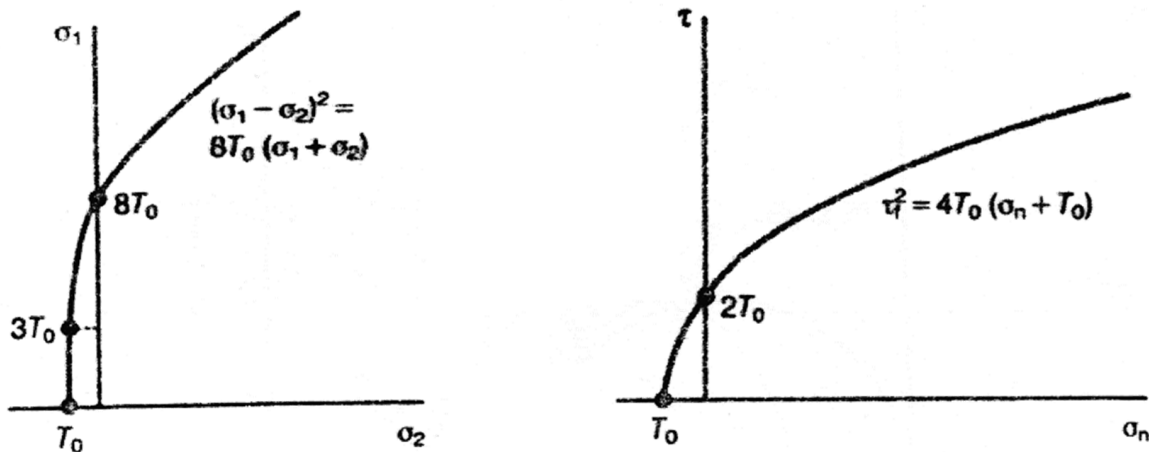
No estado plano de tensões o critério apresenta a seguinte expressão:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - 8T_0(\sigma_1 + \sigma_2) = 0$$

Ou em termos das tensões de cisalhamento e normal:

$$\tau^2 = 4T_0(\sigma + T_0)$$

Onde T_0 é a resistência à tração da rocha.



Cr terio de ruptura de Griffith



CR TERIO DE RUPTURA DE HOEK & BROWN

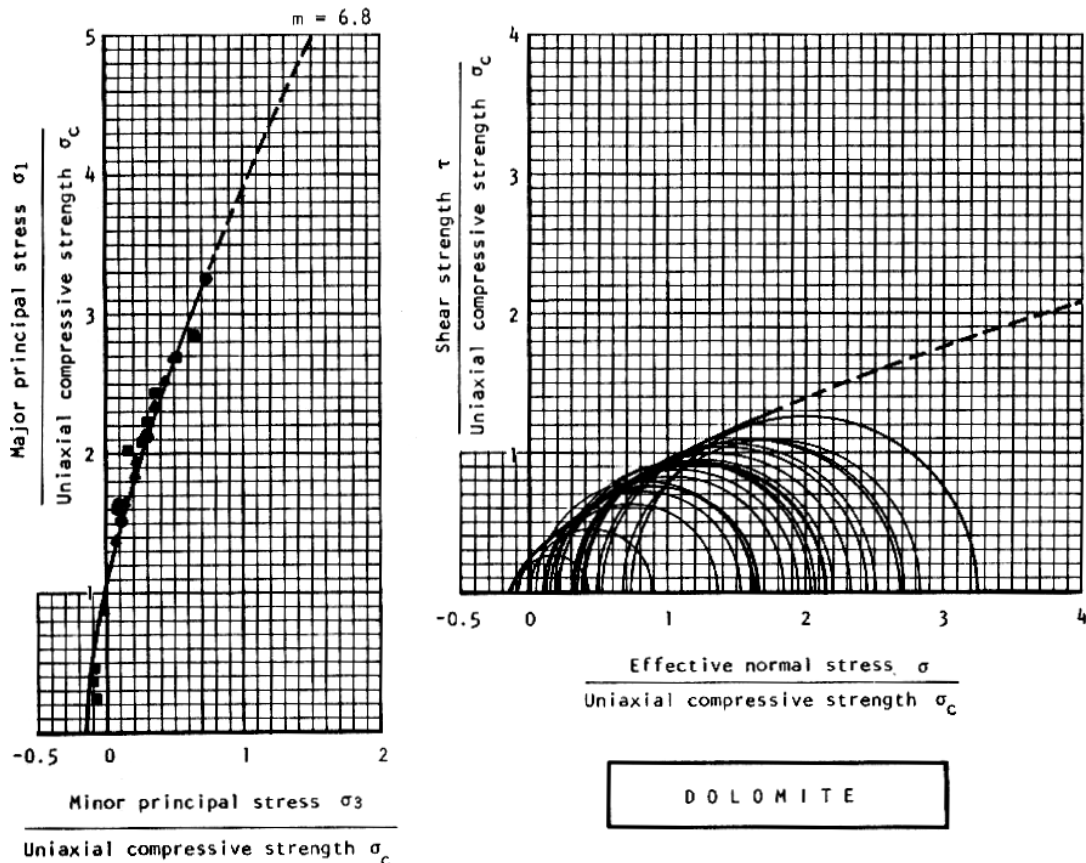


Hoek e Brown em 1980 propuseram um critério de ruptura empírico, baseado diretamente em resultados de ensaios em rocha (tração, compressão uniaxial e compressão triaxial).

Este critério é mais adequado à representação do comportamento das rochas, pois fornece uma melhor aderência na região de baixas tensões e tração, já que o critério de Mohr-Coulomb tende a superestimar a resistência à tração das rochas.

O desenvolvimento do critério se baseou na realização de um grande número de ensaios sobre vários tipos litológicos.

7



Alguns ensaios realizados por Hoek & Brown

8



O critério de ruptura de Hoek & Brown prevê uma envoltória curvilínea para os círculos de Mohr correspondentes aos ensaios realizados, com a relação $\sigma_3 \times \sigma_1$ assumindo a seguinte expressão:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2}$$

Onde:

σ_1 = tensão principal maior na ruptura

σ_3 = tensão principal menor na ruptura

σ_c = resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

m = constante característica do tipo litológico variando entre 0 e 25

s = constante característica do grau de alteração da rocha variando entre 0 e 1

9



A seguir podemos observar gráficos típicos para $\sigma_3 \times \sigma_1$ e $\sigma_N \times \tau$:

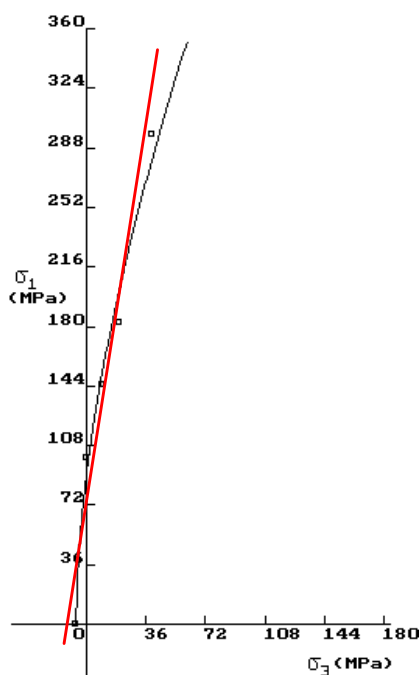


Gráfico $\sigma_3 \times \sigma_1$

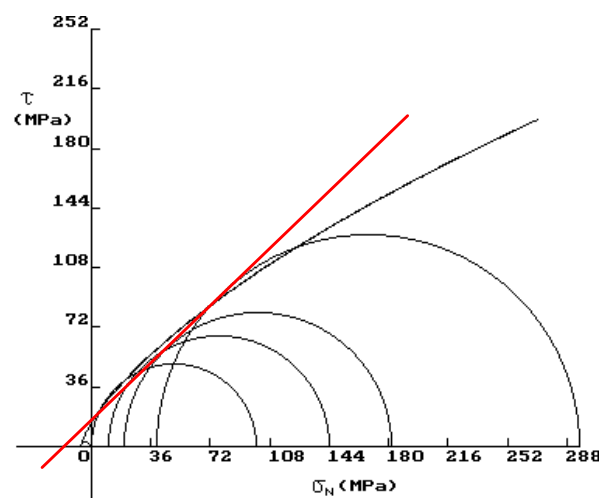


Gráfico $\sigma_N \times \tau$



Em 2002 Hoek, Torres e Corkum apresentaram uma **FORMA GENERALIZADA DO CRITÉRIO ORIGINAL**, adequando sua utilização para a representação tanto do comportamento de **ROCHA INTACTA**, como do comportamento de **MACIÇOS ROCHOSOS FRATURADOS** (o critério foi rediscutido em trabalho de 2018).

O critério de ruptura de Hoek & Brown generalizado prevê também uma envoltória curvilínea para os círculos de Mohr correspondentes aos ensaios realizados, com a relação $\sigma_3 \times \sigma_1$ assumindo a seguinte expressão:

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

Onde:

σ_1 = tensão principal maior na ruptura

σ_3 = tensão principal menor na ruptura

σ_{Ci} = resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

m_b, a e s = constantes características do tipo de maciço rochoso e da litologia



Para o caso de rocha intacta a equação assume a forma do critério de Hoek & Brown original:

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

Com:

$s = 1$

$a = 0,5$

Tem-se:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{Ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{Ci}} + 1 \right)^{0,5} \quad \left(\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c \sigma_3 + s\sigma_c^2} \right)$$



“ m_b ” é o valor corrigido da constante m_i característica da litologia:

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

Onde:

m_b = constante característica da litologia para o caso de maciço rochoso

m_i = constante característica da litologia para o caso de rocha intacta

GSI = Geological Strength Index

D = fator que caracteriza o distúrbio sofrido pelo maciço em razão da escavação e da relaxação das tensões

“s” e “a” são constantes características do maciço rochoso com expressões dadas por:

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

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







Rock type	Class	Group	Texture			
Sedimentary	Clastic		Coarse	Medium	Fine	Very fine
			Conglomerates 21 ± 3 Breccias 19 ± 5	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2 Greywackes 18 ± 3	Claystones 4 ± 2 Shales 6 ± 2 Marls 7 ± 2
			Non-Clastic	Evaporites	Gypsum 8 ± 2	Anhydrite 12 ± 2
		Carbonates	Crystalline Limestone 12 ± 3	Sparitic Limestones 10 ± 2	Micritic Limestones 9 ± 2	Dolomites 9 ± 3
		Organic	Coal ^a 8–21			Chalk 7 ± 2
	Metamorphic	Non foliated		Marble 9 ± 3	Hornfels 19 ± 4 Metasandstone 19 ± 3	Quartzites 20 ± 3
Slightly foliated			Migmatite 29 ± 3	Amphibolites 26 ± 6		
Foliated			Gneiss 28 ± 5	Schists 12 ± 3	Phyllites 7 ± 3	Slates 7 ± 4
Igneous	Plutonic	Light	Granite 32 ± 3	Diorite 25 ± 5		
			Granodiorite 29 ± 3			
		Dark	Gabbro 27 ± 3	Dolerite 16 ± 5		
			Norite 20 ± 5			
	Hypabyssal		Porphyries 20 ± 5		Diabase 15 ± 5	Peridotite 25 ± 5
	Volcanic	Lava		Rhyolite 25 ± 5 Andesite 25 ± 5	Dacite 25 ± 3 Basalt 25 ± 5	Obsidian 19 ± 3
Pyroclastic			Agglomerate 19 ± 3	Breccia 19 ± 5	Tuff 13 ± 5	

Valores para m_i

CRITÉRIO DE RUPTURA DE HOEK & BROWN








GEOLOGICAL STRENGTH INDEX		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the letter codes describing the structure and surface conditions of the rock mass (from Table 4), pick the appropriate box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index (GSI) from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range of GSI from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI = 38.</p>		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Stickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	VERY POOR Stickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
		DECREASING SURFACE QUALITY ▾				
STRUCTURE		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ▾				
	BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets		60			
	BLOCKY/DISTURBED - folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets			40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces				30	
						20
						10

Valores para GSI

CRITÉRIO DE RUPTURA DE HOEK & BROWN



Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of <i>D</i>
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	$D = 0.8$
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	$D = 0.7$ Good blasting $D = 1.0$ Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	$D = 1.0$ Production blasting $D = 0.7$ Mechanical excavation

Valores para *D*



A resistência à compressão uniaxial do maciço σ_{cm} será dada por:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} S^a \quad (\text{onde } \sigma_{ci} \text{ é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta})$$

Fazendo $\sigma_3 = 0$ na expressão do critério:

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



A determinação experimental dos parâmetros característicos de cada litologia, m_i e σ_{ci} para o CASO DE ENSAIOS SOBRE ROCHA INTACTA pode ser feita através de uma análise de regressão sobre resultados de ensaios mecânicos em rocha sob diferentes condições de confinamento (diferentes estados σ_3 x σ_1):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0,5}$$

É possível realizar uma regressão linear fazendo uma mudança de variável sobre a expressão do critério:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = \sigma_{ci} m_i \sigma_3 + \sigma_{ci}^2$$

$$y = Ax + B \Rightarrow y = \sigma_{ci} m_i X + \sigma_{ci}^2$$

Assim:

$$\sigma_{ci} = \sqrt{B}$$

$$m_i = \frac{A}{\sqrt{B}}$$

Parâmetros para o Maciço Rochoso

$$\rightarrow \begin{cases} m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \\ s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \\ a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{GSI}{15}} - e^{\frac{20}{3}} \right) \end{cases}$$



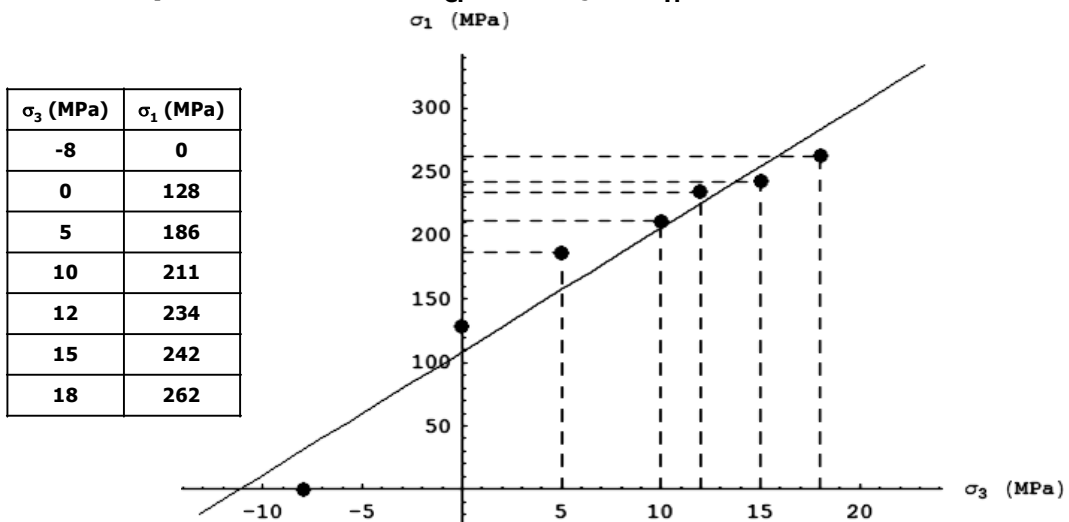
EXERCÍCIO 09-1

A equipe responsável pelo projeto de uma mina a céu aberto deseja analisar a condição de estabilidade dos taludes da cava. Para isso, coletou amostras e obteve os seguintes resultados para os ensaios realizados em amostras de rocha intacta:

σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)
-8	0
0	128
5	186
10	211
12	234
15	242
18	262



a) Determine o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e faça estimativas para as resistências a compressão uniaxial σ_{Ci} e a tração σ_{Ti} da rocha intacta.



$y = Ax + B$

$A = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$ e $B = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$

-Curva $\sigma_1 \times \sigma_3$:

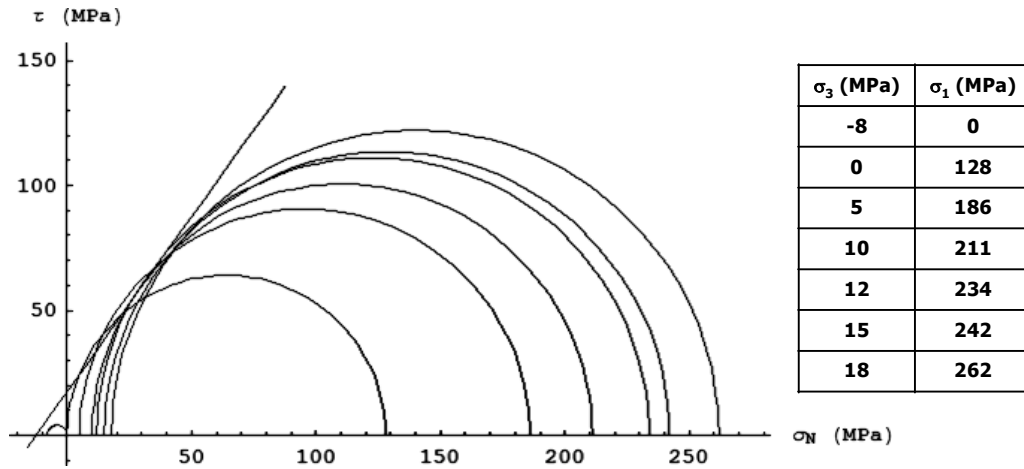
$\sigma_1 = 108.322 + 9.70663 \sigma_3$

$r^2 = 0.941953$

-Parâmetros da Rocha:

$\sigma_{Ci} = 108.322$ MPa

$\sigma_{Ti} = -11.1596$ MPa



$$\sigma_1 = A \sigma_3 + B \Rightarrow \tau = c + \sigma_N \tan \varphi$$

$$\varphi = \arcsin \frac{A-1}{A+1} \text{ e } c = \frac{B}{2\sqrt{A}}$$



-Envoltória de Ruptura:
 $\tau = 17.3841 + \tan(54.4098) \sigma_N$



b) Determine o critério de ruptura de Hoek & Brown para rocha intacta e faça estimativas para as resistências a compressão uniaxial σ_{Ci} e a tração σ_{Ti} .

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{Ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{Ci}} + 1 \right)^{0,5}$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = \sigma_{Ci}^2 m_i \sigma_3 + \sigma_{Ci}^2$$

$$y = Ax + B \Rightarrow y = \sigma_{Ci} m_i x + \sigma_{Ci}^2$$

$$\sigma_{Ci} = \sqrt{B}$$

$$m_i = \frac{A}{\sqrt{B}}$$

x		y
σ_3	σ_1	$(\sigma_1 - \sigma_3)^2$
-8	0	64
0	128	16.384
5	186	32.761
10	211	40.401
12	234	49.284
15	242	51.529
18	262	59.536

-Curva σ_1 x σ_3 :

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 18528.1 + 2312.73 \sigma_3$$

$$r^2 = 0.990453$$

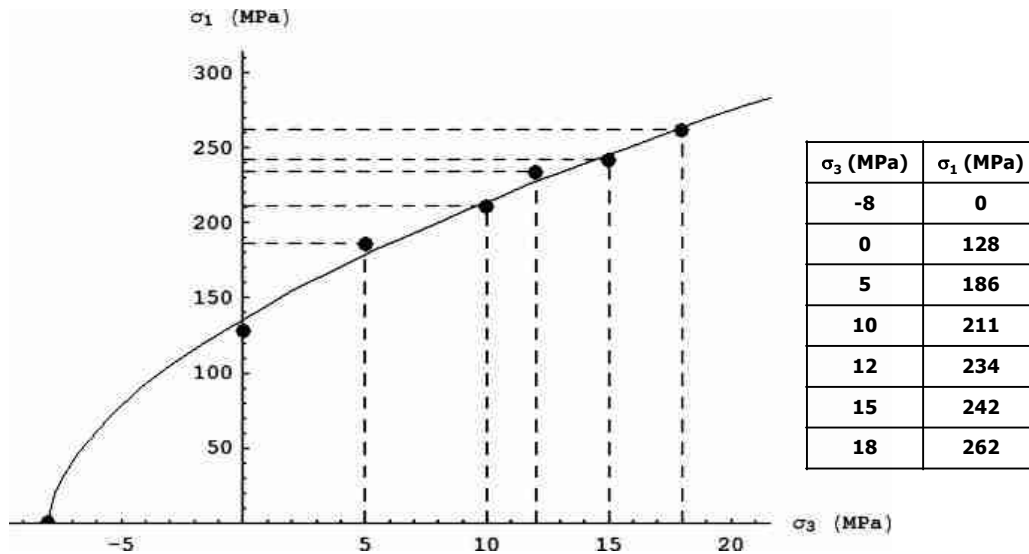


-Parâmetros para a Rocha Intacta:

$$\sigma_{Ci} = 136.118 \text{ MPa}$$

$$m_i = 16.9907$$

$$\sigma_{Ti} = -7.98378 \text{ MPa}$$



Cr terio de ruptura de Hoek & Brown para rocha intacta



c) Determine os parâmetros do critério de ruptura de Hoek & Brown para o caso de um maciço rochoso com fraturamento regular e blocos cúbicos bem definidos e onde   possível observar faces de descontinuidades muito rugosas e sem altera o, onde   escavado um talude de minera o de grandes dimensões por meio de desmonte por explosivos.

EXEMPLO - CRITÉRIO DE RUPTURA DE HOEK & BROWN



“Maciço rochoso com fraturamento regular e blocos cúbicos bem definidos e onde é possível observar faces de descontinuidades muito rugosas e sem alteração”

GSI = 75

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX		SURFACE CONDITIONS	
<p>From the letter codes describing the structure and surface conditions of the rock mass (from Table 4), pick the appropriate box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index (GSI) from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range of GSI from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI = 38.</p>		<p>VERY GOOD Very rough/fresh unweathered surfaces</p>	<p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p>
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY	DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES	
<p>BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets</p>	80	70	
<p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets</p>	60	50	
<p>BLOCKY/DISTURBED- folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets</p>	40	30	
<p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces</p>		20	10

Valores para GSI

EXEMPLO - CRITÉRIO DE RUPTURA DE HOEK & BROWN



“Talude de mineração de grandes dimensões por meio de desmonte por explosivos”

D = 1,0

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	D = 0
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	D = 0 D = 0.5 No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	D = 0.8
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	D = 0.7 Good blasting D = 1.0 Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	D = 1.0 Production blasting D = 0.7 Mechanical excavation

Valores para D



Fórmulas:

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

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

-Parâmetro para a Rocha Intacta:

$$m_i = 16.9907$$

-Parâmetros do Maciço Rochoso:

$$GSI = 75$$

$$D = 1$$

-Parâmetros do Critério de Hoek & Brown (2002):

$$m_b = 2.84895$$

$$s = 0.0155039$$

$$a = 0.500911$$

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

27



d) Determine a resistência à compressão uniaxial σ_{Cm} esperada para o maciço rochoso.

$$\sigma_{Cm} = \sigma_{Ci} s^a$$

$$\sigma_{Ci} = 136.118 \text{ MPa}$$

$$s = 0.0155039$$

$$a = 0.500911$$

- Resistência à Compressão Uniaxial do Maciço Rochoso:

$$\sigma_c = 16.8845 \text{ MPa}$$

Fator de Escala = 8

28



BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. Rock mechanics for underground mining. London, Chapman & Hall, 1994.

HOEK, E. Rock engineering - the application of modern techniques to underground design. São Paulo, CBMR, 1998.

GOODMAN, R. E. Introduction to rock mechanics. New York, Wiley, 1980.

PARRY, R. H. G. Mohr circles, stress paths and geotechnics. London, FN Spon, 1995.



OBRIGADO!

**Contato:
Prof. Eduardo César Sansone
esansone@usp.br**