

FERNANDA NERI DE SOUZA

**MÉTODOS INDIRETOS DE CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA DOS
MACIÇOS ROCHOSOS**

São Paulo

2008

FERNANDA NERI DE SOUZA

**MÉTODOS INDIRETOS DE CLASSIFICAÇÃO MECÂNICA DOS
MACIÇOS ROCHOSOS**

Trabalho de Formatura em Engenharia
de Minas do curso de graduação do
Departamento de Minas e de Petróleo da
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Lineu Azuaga
Ayres da Silva

São Paulo

2008

EPMI
TF.2008
S089m
Syneo 1735533

M2008j.

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700004214

FICHA CATALOGRÁFICA

Souza, Fernanda Neri de

Métodos indiretos de classificação mecânica dos maciços
rochosos / F.N. de Souza. -- São Paulo, 2008.
p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de
Petróleo.

1.Mecânica de rochas 2.Escavação subterrânea 3.Ensaio de
rochas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Lineu Azuaga Ayres da Silva, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

Aos amigos, aos pais e a todos que se sentirem de alguma forma colaboradores na execução desse trabalho.

Ao Ricardo, da Jacobina Mineração pela ajuda e paciência.

RESUMO

Não é raro, na atividade da mineração subterrânea, o engenheiro se deparar com problemas relativos ao suporte de feições minerais inesperadas que podem ocorrer durante a escavação. Nesses casos, a classificação mecânica do maciço rochoso deve ser feita para que se possa fazer uma escolha adequada do suporte. Essa é uma atividade muito dispendiosa em termos de tempo, custo e trabalho, pois os métodos mais comuns de classificação dos maciços, propostos por Terzaghi, Bieniawski e Barton requerem características que, classicamente, são obtidas por ensaios laboratoriais de difícil execução, como a resistência à compressão uniaxial e o RQD (Rock Quality Designation), que necessitam, respectivamente, de um corpo de prova intacto e uma prensa mecânica e de uma sondagem. Esse trabalho tem por objetivo principal associar a essas características medidas de mais fácil obtenção, como a resistência à carga pontual (ensaio de Martelo Schmidt) e o índice volumétrico de fraturas (J_v) da rocha, propiciando, assim, mais agilidade e facilidade à classificação dos maciços, já que a rapidez na execução dos suportes é de vital importância.

Palavras chave: mecânica de rochas, ensaios de rocha, classificação dos maciços

ABSTRACT

It is not uncommon in the underground mining activity, the engineer if you encounter problems with the backing of unexpected minerals features that may occur during the excavation. In such cases, the mechanics of rock mass classification must be made so that They can make an appropriate choice of support. This is an activity very costly in terms of time, cost and labor, because the most common methods of mass classifications, proposed by Terzaghi , Bieniawski and Barton features that require, perhaps, are obtained by laboratory tests difficult to implement, such as uniaxial compression strength and RQD (Rock Quality Designation), which require, respectively, of a body of evidence intact and a mechanical press and a poll. This work aims to link the main measures of these features more easily accessible, such as resistance to point load test and the index of fractures (J_v) of the rock, so giving more agility and ease the mass classification, since the speed in implementing the media is of vital importance.

Keywords: rock mechanics, rock testing, mass classification.

Conteúdo

Métodos indiretos de classificação mecânica dos maciços rochosos	3
Objetivos	3
1. Sobre a importância da agilidade na classificação dos maciços e na escolha do suporte adequado para a sustentação das escavações subterrâneas.	3
2. Classificação de maciços rochosos	4
2.1. Aplicação.....	5
2.2. Tipos de classificação	5
2.2.1. Terzaghi	6
2.2.2. RSR.....	8
2.2.3. Bieniawski (RMR)	11
2.2.4. Barton (Q system)	14
2.3. A relação entre os diferentes métodos de classificação dos maciços	18
3. Métodos indiretos.....	19
3.1. Os parâmetros.....	20
3.1.1. RQD.....	20
3.1.2. J_v	23
3.1.3 Resistência à Compressão Uniaxial	25
3.1.4. Point Load test	26
3.1.5. Outros ensaios para caracterizar a resistência à compressão uniaxial.....	28
3.2. Correlação entre os parâmetros	29
3.2.1. J_v versus RQD	29
3.2.2. Resistência à Compressão Uniaxial versus Point Load test	30
3.2.3. Resistência à Compressão Uniaxial versus Martelo Schmidt.....	32
3.2.4. Resistência à Compressão Uniaxial versus Velocidade de onda P	33
4. Conclusão.....	34
Bibliografia.....	35

Índice de figuras

Figura 1: Zona de alteração da rocha pelo desmonte.....	7
Figura 2: Direção do mergulho versus direção da galeria.....	9
Figura 3: Sistema RMR: Cálculo de RMR.....	11
Figura 4: Sistema Q: Cálculo de Q	14
Figura 5: Equipamento de sondagem em rochas	21
Figura 6: Exemplo de cálculo do RQD	22
Figura 7: Diversas famílias de descontinuidades num bloco	23
Figura 8: Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão uniaxial	25
Figura 9: Equipamento utilizado no ensaio do Point Load Test.....	27
Figura 10: Equipamento utilizado no ensaio de Velocidade de onda P.....	28
Figura 11: Equipamento utilizado no ensaio de Martelo Schmidt.....	29
Figura 12: Correlação entre J_v e RQD	30
Figura 13: Exemplo de correlação entre UCS e PLT.....	32
Figura 14: Correlação entre UCS e Martelo Schmidt.....	33
Figura 15: Correlação entre UCS e Velocidade de onda P	33

Índice de tabelas

Tabela 1: Classificação de Terzaghi - Recomendações	8
Tabela 2: Sistema RSR: Parâmetro A	10
Tabela 3: Sistema RSR: Parâmetro B	10
Tabela 4: Sistema RSR: Parâmetro C	10
Tabela 5: Sistema RMR: Parâmetros Considerados	12
Tabela 6: Sistema RMR: Ajuste relativo à direção das descontinuidades	12
Tabela 7: Sistema RSR: Classificação	13
Tabela 8: Classificação de Bieniawski - Recomendações.....	13
Tabela 9: Sistema Q: Parâmetros RQD, J_n e J_r	15
Tabela 10: Sistema Q: Parâmetros J_a e J_w	16
Tabela 11: Sistema Q: Parâmetro SRF.....	17
Tabela 12: Comparação entre os sistemas.....	18
Tabela 13: Classificação das rochas segundo RQD.....	22
Tabela 14: Algumas classificações segundo índice de fraturamento.....	24
Tabela 15: Classificação das rochas segundo resistência à compressão uniaxial	26
Tabela 16: Diversas correlações entre UCS e PLT propostas por diversos autores	31

Métodos indiretos de classificação mecânica dos maciços rochosos

Objetivos

Esse trabalho tem por objetivo principal associar a os resultados obtidos por ensaios de rocha clássicos, realizados diante da necessidade de uma classificação geomecânica do maciço rochoso, como o RQD e a resistência à compressão uniaxial a medidas de mais fácil obtenção, como a resistência à carga pontual e o índice volumétrico de fraturas (J_v), propiciando, assim, mais agilidade e facilidade à classificação dos maciços, já que, além da rapidez na execução desses testes, chamados de indiretos e/ou expeditos acrescenta-se ao rol das vantagens uma grande simplicidade na realização e um custo relativamente menor. Tal associação será feita através de uma revisão bibliográfica e resultados de ensaios de correlação já realizados por outros autores.

1. Sobre a importância da agilidade na classificação dos maciços e na escolha do suporte adequado para a sustentação das escavações subterrâneas.

Uma das maiores preocupações nas atividades de escavação subterrânea diz respeito à segurança. Os riscos atrelados a uma escavação subterrânea são muito maiores do que os de um trabalho a céu aberto: existem os riscos das detonações, poeiras, ruídos, temperaturas e também os riscos de desabamentos. Para compensar (ou reduzir) os riscos de desabamento utilizam-se diversos métodos de suporte, entre eles o emalheamento, a colocação de diversos tipos de parafusos de rochas, o atirantamento com cabos de aço, a instalação de arcos ou vigas de aço e a projeção de cimento com ou sem reforço de fibras metálicas.

Existem diversas maneiras de escolher e dimensionar o suporte mais adequado em uma escavação subterrânea, e geralmente, na mineração, isto é feito na fase de projeto da mina. Há diversos casos, entretanto, em que novas feições estruturais do minério e das encaixantes, são descobertas durante a fase de escavação, e então novas medidas devem ser tomadas em relação ao suporte. Nesse caso, nos deparamos com uma situação de alto risco, pois se trata de um trecho de galeria desconhecido e sem o suporte adequado. É necessário, portanto, tomar medidas rápidas e acertadas, que sanarão o eventual risco de desabamento do trecho.

Para a escolha do suporte adequado da escavação, são necessárias várias medidas que caracterizarão o maciço, sendo possível, assim, classificá-lo e, através dessa classificação,

fazer a escolha do melhor tipo de suporte. Existem diversas propostas de classificação feitas por diversos autores, cada uma com a sua peculiaridade, e essas medidas variam de acordo com a classificação que tratamos, como veremos mais tarde. De uma maneira geral, o RQD, a resistência à compressão uniaxial, a presença de água, o grau de fraturamento (representado pelas descontinuidades e suas famílias) e o estado de alteração da rocha estão sempre presentes nas atividades de classificação mecânica dos maciços, seja qual for a proposta em questão.

O tipo de suporte é escolhido, quase sempre, tendo como base a classificação mecânica do maciço, e a obtenção das características necessárias podem demandar muito tempo e dinheiro; tempo esse que não se pode esperar, tendo em vista uma situação de alto risco como um trecho de galeria sem suporte, e dinheiro tal que sempre que possível é de bom grado economizar.

Por isso, neste trabalho, serão expostas duas alternativas rápidas e baratas de obtenção das duas principais características que se utiliza para a classificação mecânica dos maciços. São elas o RQD e a resistência à compressão uniaxial.

2. Classificação de maciços rochosos

A classificação de um objeto de estudo consiste em identificar, segundo critérios pré definidos, certas características de interesse e agrupar em classes aquelas que se apresentarem parecidas, separando as que forem diferentes em outras classes, para que se possa aplicar esses conceitos para um fim pré definido. A classificação dos maciços rochosos tem como proposta principal estabelecer a qualidade dos maciços rochosos, atribuindo valores para uma gama de parâmetros que devem condizer com o intuito final da classificação. Assim, devemos destacar, a princípio, dois tópicos de extrema importância: qual o intuito final da classificação e quais parâmetros devem ser utilizados para tal.

Segundo Bieniawski, em “Engineering Rock Mass Classifications”, os objetivos da classificação dos maciços rochosos são:

- Identificar os parâmetros mais significantes que influenciam seu comportamento geomecânico.
- Dividir os maciços em grupos com características similares, ou seja, classes de maciços rochosos de diferentes qualidades.
- Prover uma base que explique as características de cada classe de maciços.
- Relacionar a experiência obtida em uma rocha com determinadas condições a outra rocha com condições semelhantes.
- Fornecer dados quantitativos que sirvam de guia para o projeto da escavação.

- Prover uma base comum de dados que facilite a comunicação entre engenheiros e geólogos.

Com isso, além da facilidade de comunicação entre os profissionais, o problema da escolha do suporte em escavações subterrâneas deixou de ser algo embasado na experiência pessoal do profissional e passou a ter um amparo objetivo para sua solução. Foi, portanto, uma forma prática e precisa de formular um problema que anteriormente era tratado de forma subjetiva.

Diversos autores propuseram vários sistemas de classificação dos maciços rochosos para um mesmo fim: estabelecer a qualidade do maciço com o fim de fazer uma escolha adequada de suporte do mesmo no caso de uma escavação subterrânea. Para isso, a maior parte deles escolheu como parâmetros de relevância características mecânicas como o RQD, a resistência à compressão uniaxial, a presença ou não de água, a qualidade das descontinuidades e rugosidade. Diferentes sistemas de classificação dão ênfases diferentes aos diversos parâmetros, por isso é recomendável, para fins de projeto, que sejam consideradas pelo menos duas classificações do maciço.

As classificações geomecânicas de utilização mais divulgadas, sobretudo em túneis e galerias, são as de Terzaghi, Bieniawski e de Barton, que serão tratadas minuciosamente logo mais.

2.1. Aplicação

2.2. Tipos de classificação

“I often say that when you can measure what you are speaking about and express it in numbers you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind: it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of science, whatever the matter may be.” - (Bieniawski, 1989) Página 51

As classificações a seguir têm caráter empírico, pois, apesar de ser dotadas de características qualitativas e quantitativas, o uso final a que elas se propõem e as conclusões que se tiram delas tem embasamento puramente prático, ou seja, as informações que se tem ao classificar um maciço dessas maneiras foram obtidas no campo e traduzem as experiências de seus autores.

2.2.1. Terzaghi

As primeiras classificações se tratavam de descrições meramente qualitativas dos maciços, o que as tornava bastante subjetivas e dependentes do julgamento de quem as aplicava. Foi o caso da classificação geomecânica proposta por Terzaghi em 1946 para túneis, em que estabeleceu uma metodologia para determinação da carga transmitida pelo maciço aos suportes para diferentes condições de rocha (rochas intactas, estratificadas, moderadamente fraturadas, moderadamente e muito compartimentadas, esmagadas, compressíveis e expansivas). Com base nestas condições da rocha, foram definidas nove classes, estabelecendo, para cada classe, a carga transmitida pelo maciço ao suporte e indicações relativas aos suportes e pressões. Abaixo as classes com suas especificações qualitativas:

- Rocha dura e intacta: Não contém fraturas nem trincas capilares. Por isso, se ocorrer ruptura, isto acontecerá através do material rochoso. Provavelmente em consequência dos danos causados à rocha pela detonação, lascas podem cair do teto várias horas ou dias após o desmonte por explosivos. Denomina-se o fenômeno de condição de *lascamento* ou *esfoliamento* da rocha. Rochas intactas e duras (bem conhecidas hoje como rochas frágeis –N.A.) podem também ser encontradas na condição de *explosão de rocha* que corresponde a um estado de tensões muito elevado em que um desprendimento espontâneo e violento de fragmentos ou blocos de rocha pode ocorrer no teto ou nas paredes da escavação.
- Rocha estratificada: consiste de estratos individuais que apresentam resistência muito baixa ou nenhuma resistência à separação entre si, ao longo das superfícies que os delimitam. Além disso, os estratos podem ou não apresentar planos de fraqueza ou fraturas transversais ao seu acamamento. Nestas rochas a condição de *lascamento* é muito comum.
- Rocha moderadamente fraturada: contém fraturas ou fissuras capilares, mas os blocos entre fraturas são localmente justapostos ou tão intimamente intertravados que paredes verticais não requerem suporte lateral. Em rochas deste tipo, tanto a condição de *lascamento* quanto de *explosão de rocha* podem ser encontrados.
- Rocha blocada acamada ou filonar: consiste de fragmentos de rocha quimicamente intacta ou quase intacta que estão inteiramente separados uns dos outros e intertravados de forma imperfeita. Neste tipo de rocha, paredes verticais podem requerer suportes laterais.
- Rocha cisalhada, mas quimicamente intacta (equivalente a areia) tem o caráter de um material pulverizado. Se a maioria ou todos os fragmentos forem tão pequenos como grãos de areia fina e não apresentarem recimentação, a rocha moída abaixo do lençol freático exibe propriedades de areia movediça.
- Rocha compressível: rocha que escorrega levemente para dentro do túnel sem aumento perceptível de volume. Um pré-requisito para a compressibilidade é a

alta porcentagem de partículas microscópicas ou sub-microscópicas de minerais micáceos ou argilo-minerais com baixa capacidade de expansão.

- Rocha expansiva: a rocha avança dentro do túnel principalmente em função de sua expansão. A capacidade de expandir parece ser limitada àquelas rochas que contém argilo-minerais como a montmorilonita, com uma alta capacidade de expansão.

Com base nessas classes de maciços rochosos, Terzaghi elaborou um plano de sistemas de suporte para cada tipo de maciço, que leva em conta as dimensões da escavação, e sua profundidade, conforme indicadas na figura 1. Os valores, indicados na tabela 1, definem as cargas a serem consideradas sobre os suportes (em pés) como alturas de colunas de rocha correspondentes à pressão sobre os mesmos.

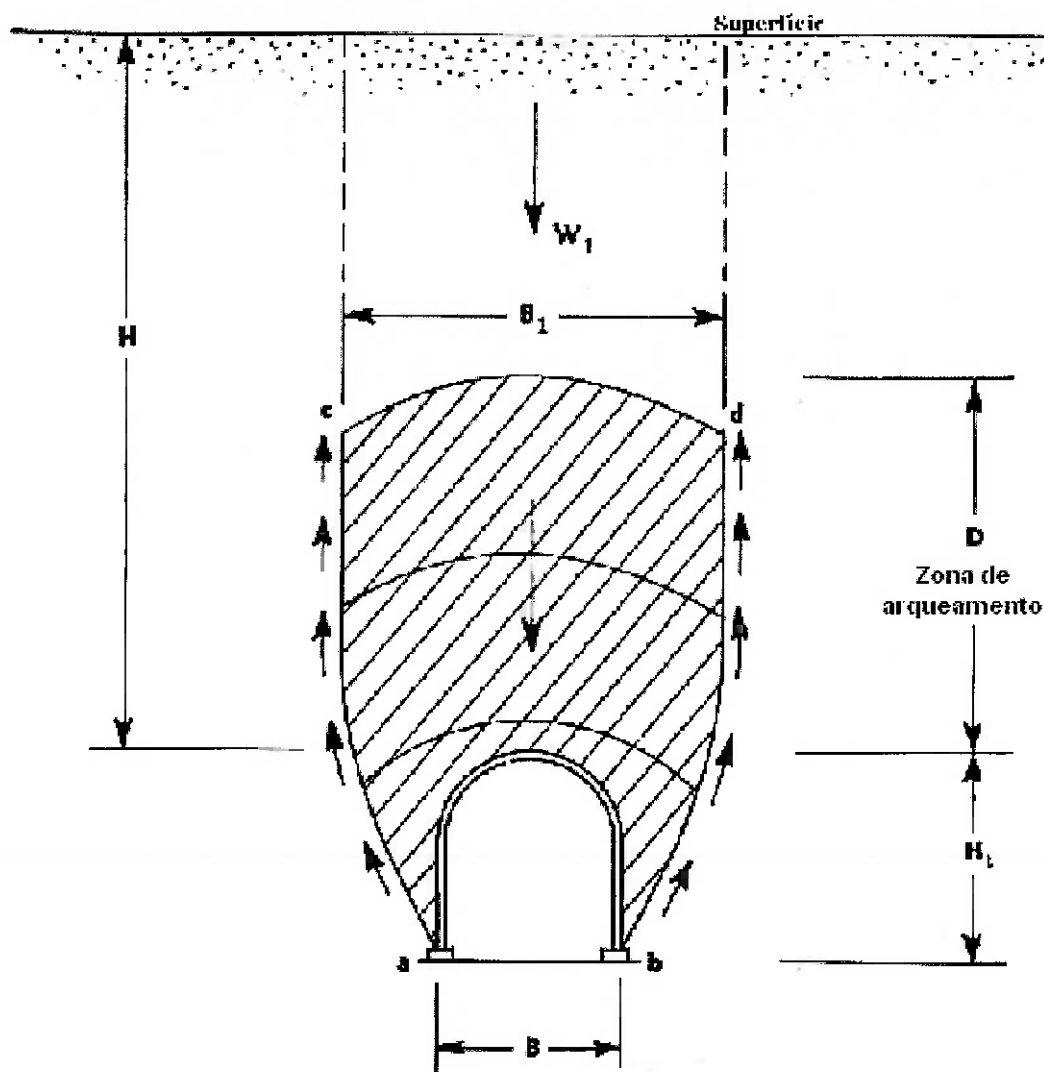


Figura 1: Zona de alteração da rocha pelo desmonte

Fonte: (Terzaghi, 1946)

Aplicação original de pressão de rocha de Terzaghi de 1946:

Onde: Carga de rocha (ft) no teto do túnel com largura B (ft) e profundidade maior que 1,5. (B+Ht).

CONDIÇÃO DA ROCHA	PRESSÃO DA ROCHA	OBSERVAÇÕES
1. Dura e sã (Maciça)	Zero	(Maciça) revestimento se houver esfolheamento ou lançamento de lascas.
2. Dura, estratificada ou xistosa	$0 - 0,50.B$	Suporte leve, principalmente para proteção contra lascamento. A pressão de rocha pode mudar erráticamente de ponto para ponto.
3. Maciça, moderadamente fraturada	$0 - 0,25.B$	
4. Moderadamente fraturada (rocha em blocos)	$0,25.B - 0,35.(B+Ht)$	Não há pressão lateral.
5. Muito fraturada	$(0,35 - 1,1).(B+Ht)$	Pequena ou nenhuma há pressão lateral.
6. Completamente cisalhada	$1,10.(B+Ht)$	Considerável pressão lateral, suaves efeitos de 'seepage' na direção do eixo do túnel.
7. Rocha compressível	$(1,10 - 2,10).(B+Ht)$	Alta pressão lateral, necessário suporte inferior ('invert'). Recomendam-se suportes circulares.
8. Rocha compressível	$(2,10 - 4,50).(B+Ht)$	
9. Rocha expansiva	Acima de 250 ft, independente do valor de (B+Ht)	São necessários suportes circulares. Em casos extremos usar suportes flexíveis.

Tabela 1: Classificação de Terzaghi - Recomendações

Fonte: (Terzaghi, 1946)

2.2.2. RSR

Com o aumento progressivo do uso do espaço subterrâneo e dadas as limitações das primeiras classificações, apareceram sistemas de classificação e de dimensionamento de suportes, de natureza empírica, que englobavam critérios quantificáveis e que englobavam valores e pesos para as características dos maciços.

O sistema de classificação RSR (Rock Structure Rating), sugerido por Wickham (1972) propôs um método quantitativo para descrever a qualidade do maciço rochoso e selecionar um suporte apropriado. A maioria dos casos históricos utilizados no

desenvolvimento desse sistema era constituída por túneis de pequeno porte, suportados por vigas de aço, apesar de, historicamente, ser conhecido por ter sido o primeiro a fazer referência a suportes por concreto projetado.

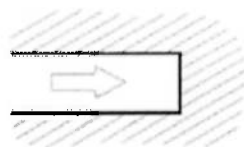
Assim, a principal significância do sistema RSR de classificação geomecânica é a introdução do conceito de quantificar, atribuindo um valor numérico e um peso a cada característica, até obter um valor de $RSR = A + B + C$.

Os parâmetros que fazem parte do sistema RSR são:

- Parâmetro A, Geologia: Atribuição geral da estrutura geológica, baseado em tipo de rocha, competência da rocha e estrutura geológica.
- Parâmetro B, Geometria: Efeito do padrão de descontinuidades com respeito à direção de escavação, baseado no espaçamento e orientação das descontinuidades e direção da escavação. A figura 2 ilustra as duas situações possíveis de direção das escavações em relação às famílias de descontinuidades.



Mergulho das descontinuidades concordante com a direção da galeria



Mergulho das descontinuidades contrário à direção da galeria

Figura 2: Direção do mergulho versus direção da galeria

- Parâmetro C, Condições das descontinuidades e presença de água: Baseado na condição de alteração das descontinuidades e no fluxo de água.

As tabelas 2, 3 e 4 foram apresentadas pelo autor e podem ser utilizadas para a avaliação dos valores de cada um dos parâmetros para chegar ao valor do RSR (máximo RSR = 100).

Parâmetro A: Generalidades Geológicas								
	Tipo de Rocha Básica							
	Competente	Média	Branda	Decomposta				
Ígnea	1	2	3	4				
Metamórfica	1	2	3	4	Estrutura Geológica			
Sedimentar	2	2	3	4	Maciça	Levemente fraturada	Moderadamente fraturada	Intensamente fraturada
Tipo 1					30	22	15	9
Tipo 2					27	20	13	8
Tipo 3					24	18	12	7
Tipo 4					19	15	10	6

Tabela 2: Sistema RSR: Parâmetro A

Fonte: (Wickham, 1972)

Parâmetro B: Padrão e direção de fraturas								
	Perpendicular ao eixo					Paralelo ao eixo		
	Direção da escavação					Direção da escavação		
	Ambas	Com o mergulho		Contra o mergulho		Mesma direção		
	Mergulho das fraturas aparentes					Mergulho das fraturas aparentes		
Espaçamento entre fraturas	Horizontal	Inclinada	Vertical	Inclinada	Vertical	Horizontal	Inclinada	Vertical
Muito próximas < 2"	9	11	13	10	12	9	9	7
Próximas 2 - 6"	13	16	19	15	17	14	14	11
Moderadamente fraturado 6 - 12"	23	24	28	19	22	23	23	19
Quase em blocos 1 - 2'	30	32	36	25	28	30	28	24
Em blocos 2 - 4'	36	38	40	33	35	36	24	28
Maciço > 4'	40	43	45	37	40	40	38	34

Tabela 3: Sistema RSR: Parâmetro B

Fonte: (Wickham, 1972)

Parâmetro C: Fluxo de água						
Fluxo de água (litros/min.300m de túnel)	Soma dos Parâmetros A + B					
	20 a 45			46 a 80		
	Características das discontinuidades					
	Fechadas ou cimentadas	Pouco alteradas	Muito alteradas ou abertas	Fechadas ou cimentadas	Pouco alteradas	Muito alteradas ou abertas
Nulo	18	15	10	20	18	14
Pequeno (<800)	17	12	7	19	15	10
Médio (800 - 400)	12	9	6	18	12	8
Elevado (>400)	8	6	5	14	10	6

Tabela 4: Sistema RSR: Parâmetro C

Fonte: (Wickham, 1972)

2.2.3. Bieniawski (RMR)

Desenvolvido em 1973 por Bieniawski, o sistema RMR de classificação mecânica dos maciços foi primeiramente desenvolvido para túneis e posteriormente utilizado em fundações de barragens, taludes, entre outros.

O sistema RMR baseia-se na consideração de seis parâmetros geomecânicos, aos quais se atribuem pesos relativos obtendo-se um índice RMR que pode variar entre 0 e 100 e é obtido através da soma algébrica dos pesos referidos. O peso devido à orientação das descontinuidades foi introduzido por Bieniawski, baseado no RSR, como ajuste do somatório dos cinco pesos anteriores, para ter em conta o efeito favorável ou desfavorável dessa orientação. A aplicação desta correção não é fácil já que uma determinada orientação pode ser favorável ou desfavorável, dependendo das condições das águas subterrâneas e das próprias descontinuidades.

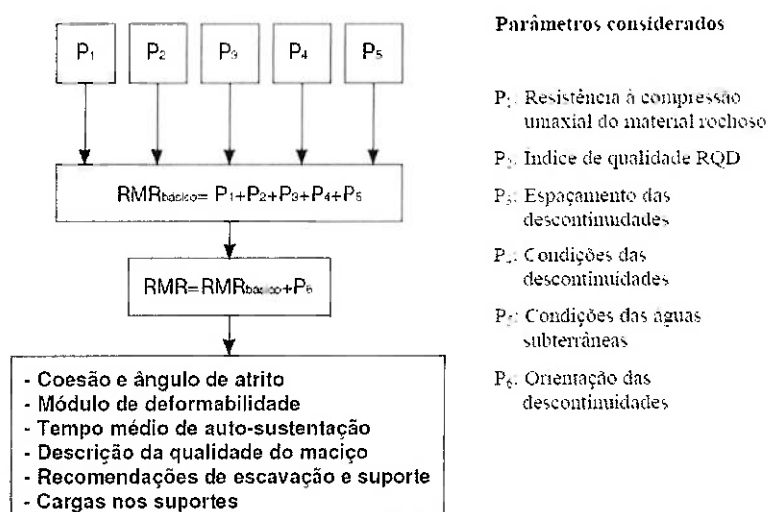


Figura 3: Sistema RMR: Cálculo de RMR

Os pesos são atribuídos de acordo com as tabelas 5 e 6, a tabela 7 apresenta um sistema de classes para cada valor RMR da rocha e a tabela 8 constitui recomendações sugeridas pelo autor para cada classe de rocha:

Parâmetros		Faixa de valores						
1	Resistência do material rochoso intacto	Point-Load test	>8 MPa	4-8 Mpa	2-4 Mpa	1-2 Mpa		
		Compressão Uniaxial	>200 MPa	100-200 Mpa	50-100 Mpa	25-50 Mpa	10-25 Mpa	3-10 Mpa
	Peso		15	12	7	4	2	1
2	RQD		90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50%	<25%	
	Peso		20	17	13	8	3	
3	Espaçamento entre descontinuidades		> 3m	1 - 3m	0,3 - 1m	50 - 300mm	<50mm	
	Peso		30	25	20	10	5	
4	Condição da descontinuidade		Superfície muito rugosa. Não contínua. Não separada. Fraturas bruscas na parede da rocha.	Superfície ligeiramente rugosa. Separação < 1 mm. Fraturas bruscas na parede da rocha.	Superfície ligeiramente rugosa. Separação < 1 mm. Fraturas amenas na parede da rocha.	Superfície escorregadia OU trincas < 5mm. Fraturas abertas 1 - 5mm. fraturas contínuas	Espaçamento entre trincas > 5mm OU espaçamento entre fraturas > 5mm. Fraturas contínuas	
	Peso		25	20	12	6	0	
5	Fluxo de água	Fluxo por 10m de túnel	Nenhum					
		Razão entre pressão de água na falha e tensão principal maior	0					
		Condições Gerais	Completamente seco	Úmido		Água com pressão moderada	Problemas severos de água	
	Peso		10	7		4	0	

Tabela 5: Sistema RMR: Parâmetros Considerados

Fonte: (Bieniawski, 1989)

A esses valores, acrescenta-se o ajuste relativo à direção da escavação em relação à direção das descontinuidades, vide tabela 6:

Orientação das fraturas	Muito favorável	Favorável	Fraca	Desfavorável	Muito desfavorável
Peso	0	-2	-5	-10	-12

Tabela 6: Sistema RMR: Ajuste relativo à direção das descontinuidades

Fonte: (Bieniawski, 1989)

E com a soma desses valores, chegamos ao valor do RMR do maciço, os quais se classificam segundo a tabela 7:

Valor RMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito boa	Boa	Fraca	Pobre	Muito pobre

Tabela 7: Sistema RSR: Classificação

Fonte: (Bieniawski, 1989)

E então temos as recomendações de suporte para cada classe de maciço, como na tabela 8:

Classe	Escavação	Suporte		
		Pregagens	Cimento Projetoado	Cambota
I	Seção total de 3m de avanço	Geralmente não requer suporte, com exceção de alguns pregos ocasionais		
II	Seção total de 1 - 1,5m de avanço. Suporte completo a 20m da frente	Pregagens de 3m de comprimento espaçadas de 2,5m, ocasionalmente com malhas em certas zonas.	50mm no teto quando necessário	Nenhum
III	Seção parcial (frente e rebaixo), avanço 1 - 3m. Início do suporte logo após o fogo. Suporte completo a 10m.	Pregagens sistemáticas com 4m de comprimento espaçadas de 2m nas paredes e teto, com malhas no teto	50 - 100mm no teto, 30mm nas paredes	Nenhum
IV	Seção parcial (frente e rebaixo), avanço 1 - 1,5m. Escavação comcomitante com a instalação do suporte	Pregagens sistemáticas com 4 - 5m de comprimento espaçadas de 1 - 1,5m com malhas no teto e nas paredes	100 - 150mm no teto, 100mm nas paredes	Leves a médios, espaçados de 1,5m
V	Seções múltiplas, avanço de 0,5 - 1,5m. Escavação comcomitante com a instalação do suporte. Cimento projetado logo após fogo.	Pregagens sistemáticas com 5 - 6m de comprimento espaçadas de 1 - 1,5m com malhas no teto e nas paredes. Pregos na soleira	150 - 200mm no teto, 150mm nas paredes e 50mm na face.	Médios a pesados, espaçados de 0,75m. Fechamento da soleira.

Tabela 8: Classificação de Bieniawski – Recomendações

Fonte: (Bieniawski, 1989)

2.2.4. Barton (Q system)

O Sistema Q foi desenvolvido por Barton em 1974, após a observação e análise de um grande número de túneis na Escandinávia. Esse sistema de classificação propõe um índice de qualidade Q para a classificação de maciços rochosos e em consequência, sugere os tipos e combinações de suportes necessários em função de seu uso e tempo de vida útil necessária. A obtenção deste índice faz-se como esquematizado a seguir:

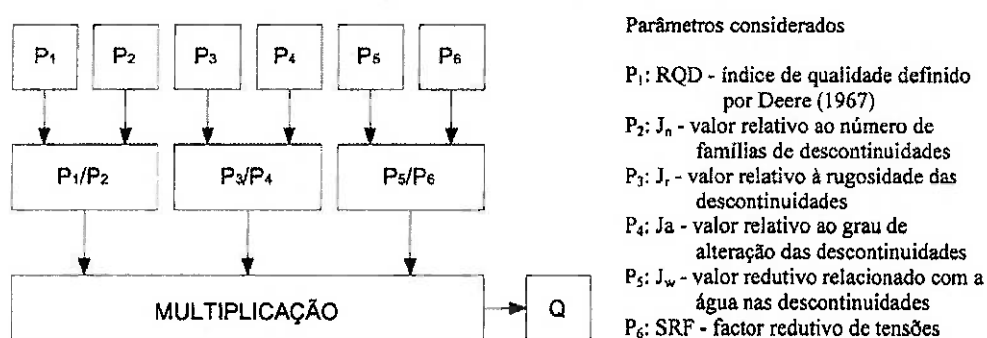


Figura 4: Sistema Q: Cálculo de Q

- RQD/J_n - Representa a compartimentação do maciço rochoso e é uma medida grosseira do tamanho dos blocos.
- J_r/J_a - Representa a resistência ao corte das descontinuidades (e do maciço rochoso).
- J_w/SRF - Representa um fator empírico denominado por “tensão ativa”.

Os pesos são atribuídos de acordo com as tabelas 9, 10 e 11:

Obtenção do valor do RQD	
Qualidade da Rocha	RQD (%)
Rocha de muito má qualidade	0 - 25
Rocha de má qualidade	25 - 50
Rocha de qualidade razoável	50 - 75
Rocha de boa qualidade	75 - 90
Rocha de excelente qualidade	90 - 100
Obtenção do valor de Jn	
Número de famílias de descontinuidade	Jn
Nenhuma ou poucas	0,5 - 1,0
Uma	2
Uma mais descontinuidades esparsas	3
Duas	4
Duas mais descontinuidades esparsas	6
Três	9
Três mais descontinuidades esparsas	12
Quatro ou mais, descontinuidades esparsas, maciços altamente fraturados	15
Rochas esmagadas, tipo terroso	20
Obtenção do valor de Jr	
Descrição da descontinuidade	Jr
Sem continuidade	4
Rugosa, irregulares, onduladas	3
Lisas, onduladas	2
Polidas, onduladas	1,5
Rugosas ou irregulares, planares	1,5
Lisas, planas	1
Polidas, planas	0,5
Zona contendo espessura de materiais argilosos suficiente para impedir o contato entre as paredes	1
Zonas esmagadas, arenosas ou cascalhentas com espessura suficiente para impedir o contato entre as paredes	1

Tabela 9: Sistema Q: Parâmetros RQD, Jn e Jr

Fonte: (Barton, 1974)

Obtenção do valor de J a		
Descrição	J a	Φ_r (o)
a) Há contato entre as paredes de rocha das descontinuidades		
Paredes duras e compactas	0,75	-
Paredes não alteradas, com leve descoloração	1	25 - 35
Paredes ligeiramente alteradas, minerais não brandos, partículas arenosas	2	25 - 30
Paredes com partículas silto-arenosas ou silto-argilosas, pequena fração argilosa (não branda)	3	20 - 25
Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo de atrito, e pequenas quantidades de argilas expansivas	4	8 - 16
b) Contato entre as paredes de rocha das descontinuidades antes de 10cm de escorregamento		
Paredes com partículas de areia e rochas desintregadas	4	25 - 30
Descontinuidades com preenchimento argiloso sobreconsolidado	6	16 - 24
Descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado	8	12 - 16
Descontinuidades com preenchimento argiloso expansivo	8 - 12	6 - 12
c) Não há contato entre as paredes de rocha		
Zonas ou bandas com rochas desintregadas ou esmagadas	6,8 ou 8 - 12	6 - 24
Zonas ou bandas silto-argilosas ou areno-argilosas com pequenas frações de argila	5	-
Zonas contínuas de argila	10; 13 ou 13 - 20	6 - 24
Obtenção de Jw		
Descrição	Jw	Pressão de água (Mpa)
Escavações secas ou fluxo de água < 5l/min localmente	1	< 0,1
Fluxo médio ou pressão que arraste ocasionalmente o preenchimento das descontinuidades	0,66	0,1 - 0,25
Fluxo elevado ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento	0,5	0,25 - 1
Fluxo elevado ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento	0,3	0,25 - 1
Fluxo muito elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo	0,2 - 0,1	> 1
Fluxo elevado com pressão contínua, sem decaimento	0,1 - 0,05	> 1

Tabela 10: Sistema Q: Parâmetros J a e Jw

Fonte: (Barton, 1974)

Obtenção do valor de SRF			
a) Zonas de fraqueza intersectando a escavação, o que pode causar perdas no maciço rochoso quando o túnel for escavado			
Descrição			SRF
Ocorências de zonas alteradas múltiplas contendo argilas ou rochas quimicamente desintegradas em torno da cavidade (profundidades < 50m)			10
Zonas de baixa resistência contendo argilas ou rochas quimicamente desintegradas (profundidades ≤ 50m)			5
Zonas de baixa resistência contendo argilas ou rochas quimicamente desintegradas (profundidades > 50m)			2,5
Zonas múltiplas de corte em rocha competente, sem argila, com rocha desintregada na vizinhança			7,5
Zonas múltiplas de corte em rocha competente, sem argila (profundidade ≤ 50m)			5
Zonas singulares de corte em rocha competente, sem argila (profundidade > 50m)			2,5
Descontinuidades abertas, fraturas muito intensas			5
b) Rocha competente, problemas de tensões na rocha			
Descrição	σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	SRF
Tensões baixas, próximo da superfície	> 200	< 0,01	2,5
Tensões médias, condições de tensão favoráveis	200- 10	0,01 - 0,3	1
Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada	10 - 5	0,3 - 0,4	0,5 - 0,2
Explosões moderadas de rochas maciças depois de 1 hora	5 - 3	0,33 - 0,16	5/out
Explosões moderadas de rochas maciças em poucos minutos	3 - 2	0,65 - 1	50 - 200
Explosões intensas de rochas maciças	< 2	> 1	200 - 400
c) Rocha esmagada: plastificação de rochas incompetentes sob a influência de altas pressões de rocha			
Descrição	σ_θ/σ_c	SRF	
Pressão moderada da rocha esmagada	1 - 5	5 - 10	
Pressão elevada da rocha esmagada	> 5	10 - 20	
d) Rochas expansivas: atividade química expansiva devido à água			
Descrição			SRF
Pressão de expansão moderada			5 - 10
Pressão de expansão elevada			10 - 15

Tabela II: Sistema Q: Parâmetro SRF

Fonte: (Barton, 1974)

2.3. A relação entre os diferentes métodos de classificação dos maciços

A classificação dos maciços rochosos baseia-se na quantificação de diversas características mecânicas que, segundo os respectivos autores, interferem na qualidade da rocha. Cada sistema leva em consideração características mecânicas diferentes, mas alguns aspectos mais importantes estão presentes em todos os sistemas de classificação.

Os dois métodos mais usados de classificação dos maciços rochosos são os de Bieniawski (RMR) e o de Barton (Q). O método de Terzaghi não possui muitos adeptos por exigir uma análise muito subjetiva e o método RSR constitui, em sua base, uma “prévia” do método de Bieniawski.

Os dois métodos RMR e Q incorporam características geológicas e geométricas que levam à obtenção de um valor da qualidade do maciço. As semelhanças entre eles passam por usar os mesmos parâmetros, ou parâmetros bem parecidos para calcular o valor da qualidade da rocha. As diferenças estão relacionadas aos diferentes pesos dados aos parâmetros e o uso de alguns parâmetros diferentes.

A tabela 12 apresenta uma comparação entre os sistemas de classificação apresentados acima e os parâmetros utilizados em cada um deles:

Parâmetro	RSR	RMR	Q
Compressão Uniaxial	x	x	x
RQD	x	x	x
Preenchimento da descontinuidade		x	x
Espaçamento entre descontinuidades	x	x	x
Rugosidade da descontinuidade	x	x	x
Geometria das descontinuidades			x
Orientação das descontinuidades	x	x	
Presença de água	x	x	x
Profundidade da escavação			x

Tabela 12: Comparação entre os sistemas

Como podemos perceber, existem parâmetros que estão presentes em todos os sistemas de classificação. Entre eles, alguns como o espaçamento e a presença de água são obtidos diretamente in situ, a partir de ensaios relativamente simples ou, até mesmo, observações. Outros são ensaios feitos em laboratório, como o RQD (que é um índice de fraturamento da rocha) e a resistência à compressão uniaxial que, classicamente, é obtida a partir de ensaios realizados em amostras muito difíceis de conseguir. Serão essas características o foco dos nossos estudos mais adiante.

3. Métodos indiretos

Alguns critérios sugeridos por diversos autores para a classificação dos maciços rochosos não são de fácil e expedita obtenção, e a determinação de tais parâmetros pode ser, além de difícil realização, extremamente trabalhosa e cara. Nesse sentido, os métodos indiretos apresentados a seguir têm por objetivo apontar critérios para uma expedita caracterização geotécnica dos maciços rochosos que reproduza a realidade do maciço, quer no que diz respeito à resistência à compressão uniaxial ou ao grau de fraturamento do maciço.

São bem conhecidos acidentes estruturais ocorridos, inesperadamente, nos maciços rochosos durante os trabalhos de escavação de obras subterrâneas de grande porte. Uma adequada caracterização geotécnica dos maciços rochosos que suportam tais obras teria prevenido, pelo menos, parte apreciável desses acidentes. Por vezes, não é feita uma conveniente caracterização geotécnica dos maciços rochosos em que são implantadas obras subterrâneas, porque se considera desnecessária, ou/e, porque se entende que o tempo gasto nessa caracterização representa um atraso na conclusão da obra, ou ainda, porque os custos com os estudos de caracterização não são considerados justificáveis. É importante lembrar que o tempo gasto numa adequada caracterização dos maciços rochosos, pode ser bastante inferior ao que é gasto em soluções para situações não previstas e que ocorrem, com alguma frequência, no decorrer das escavações, além de que os encargos financeiros resultantes de uma adequada caracterização do maciço rochoso para a implantação de uma grande obra subterrânea são insignificantes, quando comparados com o custo da obra, e que tais encargos serão sempre menores que os prejuízos, quer pessoais quer materiais, causados por eventuais acidentes estruturais.

A necessidade de caracterização de rochas de forma ágil com menor custo tem sido uma grande preocupação das pesquisas na área de mecânica de rochas e engenheiros freqüentemente se deparam com o problema de estimar o comportamento de solos e rochas sem dispor de resultados de ensaios geotécnicos. Visando a redução dos custos e do tempo despendido na caracterização dos maciços através de ensaios de laboratório e "in situ" convencionais, tem-se recorrido cada vez mais a correlações entre propriedades indiretas e clássicas e à realização de ensaios expeditos de laboratório e de campo. As principais vantagens desse tipo de prática são a simplicidade, rapidez de execução e baixo custo, quando comparada à metodologia que emprega ensaios e propriedades convencionais.

Apesar das limitações típicas inerentes às técnicas expeditas, estas quando bem planejadas e conduzidas, possibilitam a obtenção de informações representativas das condições geotécnicas dos locais de interesse, como será mostrado mais adiante.

Os objetivos específicos dos ensaios geotécnicos são medir propriedades que não possam ser determinadas de forma quantitativa pela simples observação. Os ensaios expeditos e a correlação com parâmetros indiretos auxiliam na classificação e caracterização de materiais, indicam a qualidade da rocha, sendo suplementados pelas observações visuais e são de realização simples e de baixo custo, daí a importância do estudo desses parâmetros e

sua correlação com as características clássicas utilizadas nos sistemas de classificação dos maciços.

3.1. Os parâmetros

Abaixo são apresentados os parâmetros foco desse estudo. São eles o RQD (Rock Quality Designation), que será, posteriormente, correlacionado com o índice J_v , a resistência à compressão uniaxial ou UCS (Uniaxial Compressive Strength), que pode ser correlacionada com o PLT (Point Load Test) ou com outros ensaios que serão apresentados mais adiante.

3.1.1. RQD

O índice RQD foi sugerido por Deere em 1964 para a descrição de testemunhos de sondagens de rocha, sendo definido como a soma dos comprimentos dos fragmentos maiores que 0,1 m expressos em porcentagem do comprimento total sondado.

O RQD deve ser determinado em testemunhos de sondagem com diâmetro superior a 50 mm, recuperados com amostradores de parede dupla e perfurados com brocas incrustadas de diamante. Trata-se de um equipamento de difícil manuseio, caro e que não apresenta facilidades de portabilidade.

A figura 5 apresenta um equipamento de sondagem. Trata-se de uma máquina não portátil e de difícil manuseio, além de ser cara e requerer mão de obra especializada para a operação.

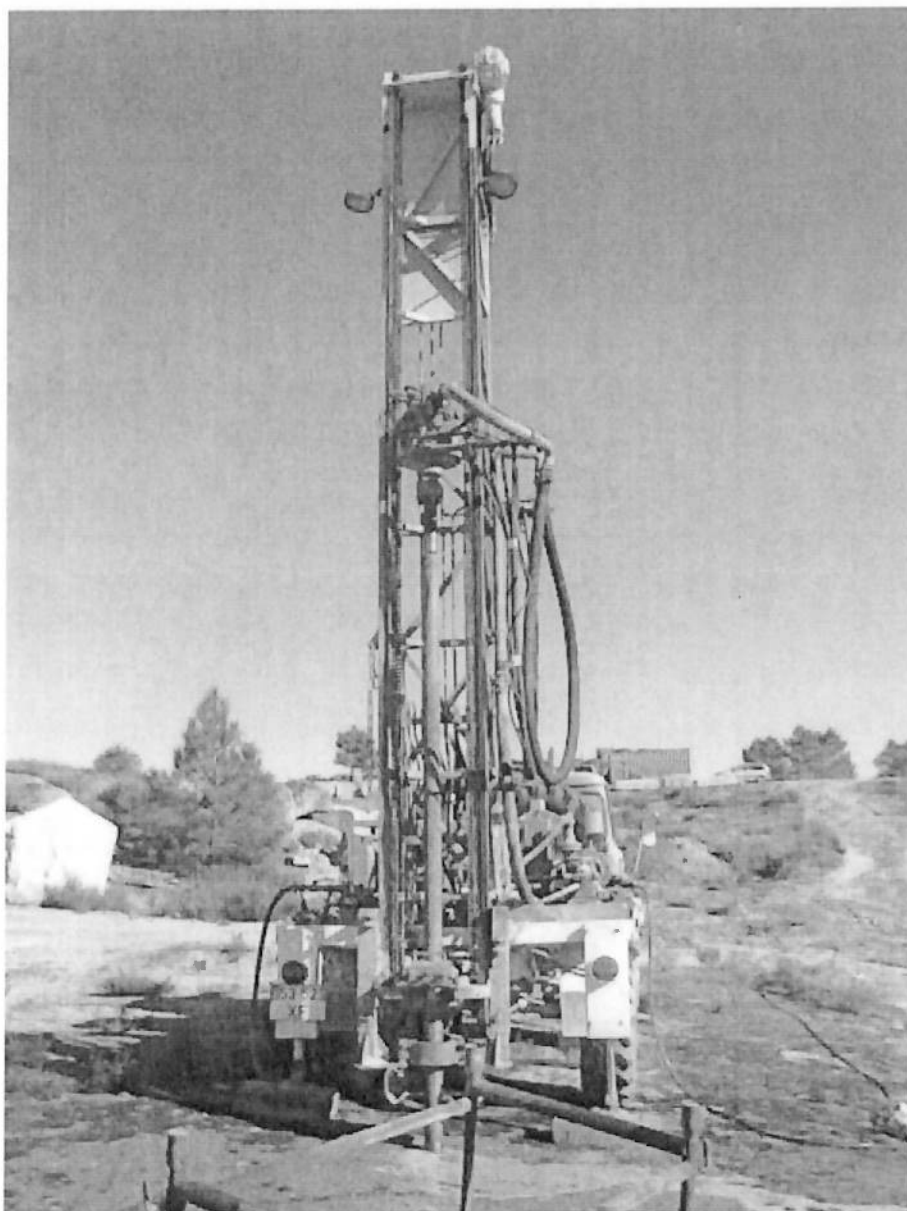


Figura 5: Equipamento de sondagem em rochas

Quanto ao comprimento de cada intervalo para o cálculo do RQD, este deve ser de aproximadamente 2,0 m. O cálculo do RQD se faz da maneira descrita a seguir, e ilustrada pela figura 6.

$$RQD = 100.(\sum Li)/L$$

Onde:

$\sum L_i > 0,10 \text{ m}$ = (Soma dos comprimentos dos fragmentos maiores que 0,10 m)

$L \approx 2,0 \text{ m}$ (Comprimento total da amostra do furo de sondagem aproximadamente 2,0 m)

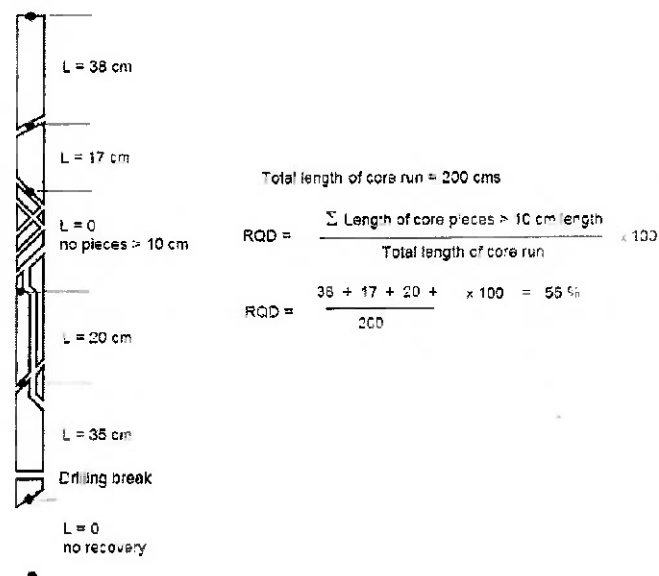


Figura 6: Exemplo de cálculo do RQD

Este índice quantitativo é amplamente aceito e muito utilizado na classificação de maciços rochosos. O índice de qualidade da rocha é apresentado por faixas de variação do valor de RQD, conforme mostrado na tabela 13:

Descrição	RQD (%)
Muito ruim	0 - 25
Ruim	25 - 50
Regular	50 - 75
Bom	75 - 90
Excelente	90 - 100

Tabela 13: Classificação das rochas segundo RQD

O valor do RQD é afetado pela resistência da rocha, pois os materiais mais fracos são facilmente quebrados ou lavados no processo da sondagem, assim como pelo espaçamento das descontinuidades que está intimamente relacionado ao tamanho dos blocos. A principal desvantagem do RQD é em relação ao tamanho dos blocos, sendo que a área abrangida por este método é limitada somente ao testemunho de sondagem. No entanto, existem blocos que abrangem desde milímetros até vários metros de comprimento, além de serem facilmente

visualizados no campo, fornecendo um significado físico direto. Ainda assim, na classificação de maciços rochosos, o RQD é um dos parâmetros mais importantes a ser considerado.

Usado sozinho, o RQD não define adequadamente a qualidade do maciço rochoso, pois não leva em consideração a orientação das descontinuidades, a distância entre fraturas e a continuidade das mesmas. Além do mais, o RQD é sensível à orientação das descontinuidades, ou seja, uma descontinuidade que seja paralela à sondagem não constará no valor do RQD, enquanto que uma família de descontinuidade que seja perpendicular ao furo terá um espaçamento igual ao espaçamento real entre as descontinuidades e no caso de descontinuidades com orientações intermediárias, o RQD estará diretamente ligado ao ângulo entre eles.

Há de se considerar também que o resultado obtido nesse ensaio depende da competência do técnico e das condições do equipamento.

3.1.2. Jv

O índice volumétrico de fraturas é uma medida simples do grau de fraturamento. Ele leva em conta todas as ocorrências de trincas e fraturas e, em relação aos métodos clássicos de descrição de fraturas, é de muito mais fácil execução.

Uma das maiores dificuldades de caracterizar um sistema de falhas é a sua estrutura tridimensional. O RQD é uma característica que apresenta diferentes resultados de acordo com a direção da perfuração, se esta for feita perpendicularmente à família principal de descontinuidades, o resultado tem uma enorme variação em relação à medida feita na mesma direção desta família de fraturas.

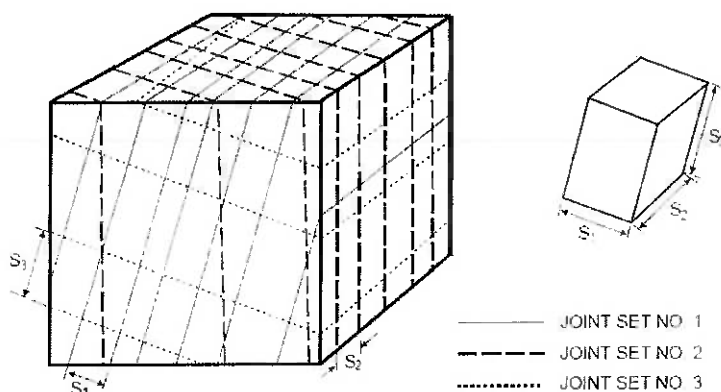


Figura 7: Diversas famílias de descontinuidades num bloco

Fonte: (Palmstrom, 1982)

A figura 7 mostra um bloco com três famílias de descontinuidades. Neste caso, a frequência de fraturas (números de fraturas por unidade de comprimento) para cada família será $\frac{1}{s_1}$, $\frac{1}{s_2}$ e $\frac{1}{s_3}$ respectivamente. Assim, para a família número 1 a frequência de fraturas seria $\frac{1}{s_1}$ ou uma aproximação ajustada, se as outras duas famílias forem levadas em consideração.

O número de fraturas que intercepta uma unidade de volume do maciço rochoso é definido como índice volumétrico, que se dará por:

$$J_v = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_3}$$

Esta definição de grau de fraturamento leva em consideração todas as famílias de descontinuidades, sendo assim uma maneira apropriada de contagem das mesmas no maciço.

A partir de observações comuns, o índice volumétrico de fraturas é de fácil cálculo, pois é baseado em observações normais do espaçamento entre elas. Em alguns casos onde a ocorrência das descontinuidades não obedece a uma seqüência de famílias, o J_v pode ser calculado levando em conta todas as ocorrências de fraturas de uma área conhecida. Por outro lado, assumindo que as fraturas tenham um espaçamento uniformizado, o J_v pode ser calculado pelo seu número por unidade de área multiplicado pelo fator K. O fator K varia de acordo com a distribuição das descontinuidades. Para uma configuração uniforme nas três direções, K ficará entre 1,15 – 1,5. Para distribuições desiguais, o K terá variações maiores. Sob condições normais, encontra-se um fator K entre 1,25 – 1,35 geralmente. Desta maneira, uma contagem em duas dimensões é convertida em três dimensões.

Diversas classificações são feitas em relação ao índice de fraturamento, como se pode observar na tabela 14:

Frequência de fraturas	50	20	10	5	2	1	0,5	0,2
Coates (1965)	Muito fraturado		Fraturado			Blocado		Maciço
Deere (1963)	Muito próximo		Próximo		Moderadamente próximo	Ampla		Muito ampla
Franklin (1971)	Extremamente baixa	Baixa	Média		Alta	Muito alta		Extremamente alta
Espaçamento entre as fraturas (m)	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1	2	5

Tabela 14: Algumas classificações segundo índice de fraturamento

Fonte: (Palmstrom, 1982)

3.1.3 Resistência à Compressão Uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial visa determinar qual a tensão que provoca a ruptura da rocha, quando submetida a esforços compressivos.

Este ensaio é executado em corpos de prova de dimensão cúbica, com arestas de 7 cm, ou sobre corpos de prova cilíndricos, com relação altura/diâmetro de 2,5. Como os diâmetros de sondagens mais comuns estão em torno de 2" (duas polegadas), sistematizou-se esse diâmetro – 5 cm, para os CPs cilíndricos que devem ter, portanto, uma altura de 12,5 cm. Para uma bateria utilizam-se cinco corpos de prova (no estado seco), os quais são submetidos a esforços compressivos (taxa de carregamento de 600 kpa/s), em uma prensa hidráulica.

A figura 8 representa uma prensa hidráulica utilizada nos ensaios de compressão uniaxial.



Figura 8: Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão uniaxial

Fonte: (PMI)

A tensão de ruptura na compressão é determinada pela relação:

$$C = W / A$$

Onde:

C = tensão de ruptura (MPa)

W = força de ruptura (kN)

A = área de carga do corpo de prova (m²)

Os valores detectados fornecem uma indicação da resistência do material ao esforço mecânico compressivo, mostrando o valor máximo de tensão que a rocha suporta antes da ruptura. São funções da composição mineralógica, textura, estado de alteração e porosidade do material. Podemos classificar as rochas de acordo com a resistência à compressão uniaxial, conforme exemplificado na tabela 15:

Descrição	σ_c (Mpa)
Extremamente resistente	250
Muito resistente	100
Resistente	50
Medianamente Resistente	25
Branda	5
Muito branda	1

Tabela 15: Classificação das rochas segundo resistência à compressão uniaxial

A uniformidade da distribuição de tensões, num corpo de prova sob a ação de esforços compressivos deve ser garantida. Portanto, o corpo de prova deve apresentar geometria bem regular e os seus topos devem ser perfeitamente paralelos entre si.

Além de necessitar de uma morosa preparação das amostras, o ensaio de resistência à compressão uniaxial ainda requer equipamentos específicos (como, por exemplo, uma prensa hidráulica rígida, que é um equipamento de alto custo e extremamente complexo. Hoje são, normalmente, equipamentos servo-controlados, com elevados custos de operação e de manutenção). Tanto o fato de ter que se realizar uma sondagem até ter que mandar a amostra para um laboratório especializado faz com que a realização desse ensaio seja demorada e cara, além de bastante dispendiosa em termos de trabalho.

3.1.4. Point Load test

No Point Load Test, uma amostra de rocha é montada entre duas pontas e uma tensão é aplicada até que ocorra a ruptura. O pico de tensão é anotado e utilizado para o cálculo do Point Load Index.

O equipamento utilizado nesse ensaio é composto por um equipamento com um dispositivo que sustenta duas bases cônicas e uma prensa hidráulica manual, como na figura 9. Uma dessas pontas permanece imóvel enquanto a outra se move de acordo com a aplicação das tensões através de um pistão hidráulico. A amostra de rocha a ser testada é colocada entre as duas pontas e uma tensão de compressão é aplicada.



Figura 9: Equipamento utilizado no ensaio do Point Load Test

Fonte: (Tah, Azarim)

A força aplicada na rocha aumenta gradativamente até que cause uma fratura. O pico de pressão é indicado em um manômetro. A força aplicada pelo instrumento para quebrar a rocha (P) é convertida para um valor de tensão equivalente a 50 mm de rocha. Isto produz o chamado valor 50 ou Point Load Index corrigido.

A fórmula para converter a força dada na leitura no valor do Point Load Test corrigido ($I_s(50)$) é dada a seguir:

$$I_s(50) = \frac{FP}{D_e^2}$$

Onde:

F = Fator de correção de tamanho = $(D_e/50)^{0.45}$

P = Carga aplicada (MN)

$D_e = (4A/\pi)^{0.5}$

A = Área da menor seção da amostra (mm^2)

As unidades do Point Load Index são dadas em Mpa e isso pode ser convertido para tensão de compressão (C) por:

$$C = 24 I_{s(50)}$$

3.1.5. Outros ensaios para caracterizar a resistência à compressão uniaxial

Para obter a resistência à compressão uniaxial da rocha (UCS) podemos ainda fazer uso de outros métodos de ensaio, como por exemplo, o ensaio de impacto (Martelo Schmidt) e a velocidade da onda P. Todos esses ensaios são mais simples que o UCS, e por isso a importância do estudo de viabilidade de utilizá-los como método indireto de obtenção do primeiro parâmetro.

Para a obtenção da velocidade de onda P, dois furos de sonda são feitos paralelamente na rocha e um equipamento chamado PUNDIT (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester) mede o tempo que a onda percorre o maciço. Apesar de não se tratar de um equipamento de fácil manuseio, é um ensaio feito in situ, e o equipamento tem alta portabilidade, além de ser de rápida execução (vide figura 10).

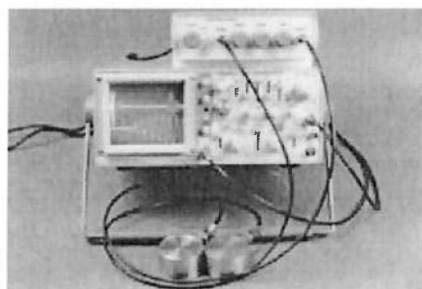


Figura 10: Equipamento utilizado no ensaio de Velocidade de onda P

Fonte: (mons)

O ensaio de Martelo Schmidt, ilustrado na figura 11, ou ensaio de impacto, foi inicialmente desenvolvido para a medição da resistência do concreto e depois começou a ser usado em rochas. Ele pode ser realizado tanto in situ como em amostras de formas irregulares. A rugosidade, presença de água e propriedades da superfície das rochas podem influenciar nos resultados desse ensaio, que consiste basicamente em um equipamento que “atira” uma ponta de metal na rocha e mede a energia elástica da mesma.



Figura 11: Equipamento utilizado no ensaio de Martelo Schmidt

Fonte: (proceq)

3.2. Correlação entre os parâmetros

3.2.1. J_v versus RQD

Palmström (1982) propôs que, quando não se tem furos de sonda, mas existem traços de descontinuidades expostos na superfície, o RQD pode ser estimado pelo número de descontinuidades por unidade de volume. A seguinte correlação pode ser utilizada para maciços rochosos:

$$RQD = 115 - 3.3 (J_v) \quad (RQD = 100 \text{ para } J_v < 4.5)$$

ou

$$J_v = 35 - RQD/3.3 \quad (RQD = 0 \text{ para } J_v > 35)$$

Como demonstrado na figura 12:

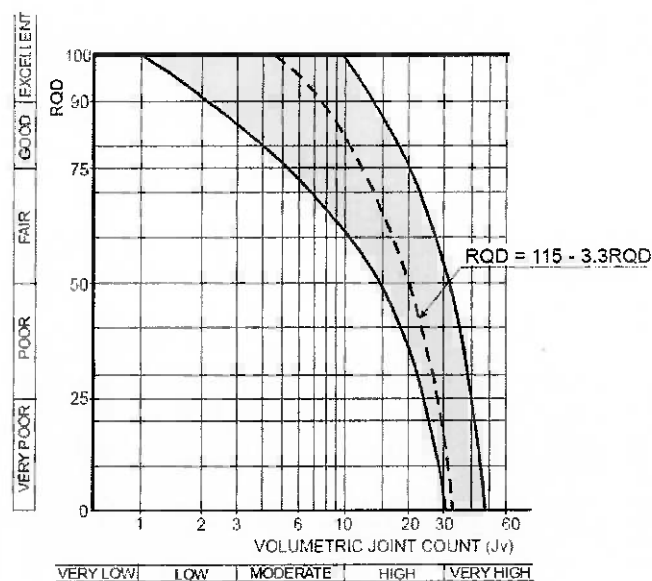


Figura 12: Correlação entre Jv e RQD

Fonte: (Palmström, 1982)

Onde Jv é a soma do número de descontinuidade por unidade de comprimento para cada família de descontinuidade conhecida no volume indicado.

Quando o índice volumétrico de fraturas proposto por Palmström é usado, as fraturas induzidas pela detonação não estão (nem podem estar) incluídas em Jv.

As limitações impostas pelo método RQD de obtenção dos níveis de fraturamento (por exemplo, o RQD=100 se as peças tiverem 9 cm e RQD=0 se as peças tiverem 11 cm) causam algum erro na correlação entre os dois parâmetros.

Segundo o autor, o índice volumétrico de fraturas tem sido usado por mais de 10 anos com boas aplicações principalmente nos sistemas de classificação de Barton e especialmente em mapeamentos de túneis, onde a aplicabilidade do Jv é importante, pois se caracteriza por um método rápido, simples e acurado de medição do grau de fraturamento.

3.2.2. Resistência à Compressão Uniaxial versus Point Load test

O Point Load Test permite a determinação de um Índice de força não corrigido (I_s). Ele precisa ser corrigido para o padrão equivalente de diâmetro (50 mm). Se o corpo de prova testado for “próximo” de 50 mm de diâmetro, a correção não é necessária. O procedimento para a correção de tamanho pode ser obtido graficamente ou matematicamente segundo sugestão da ISRM. O valor de I_{s50} é determinado pela seguinte equação:

$$I_{s50} = P/De^2$$

Onde:

P = Ponta de fratura em lbf (pressão x área do pistão)

De = Diâmetro equivalente do corpo de prova (in)

O PLT deve ser interpretado diferentemente de acordo com a resistência da rocha. A acurácia do PLT para a correlação com o teste de compressão uniaxial depende do raio entre o corpo de prova do UCS e a força de tensão. Para rochas muito quebradiças, o raio é de aproximadamente 10 in, enquanto que rochas mais plásticas devem ter um raio de perto de 5 in.

Em geral, a variação entre os resultados dos testes PLT e UCS podem ser atribuídos a três fatores:

- Erro na estimativa da verdadeira UCS obtida pelo próprio ensaio de UCS.
- Erro na estimativa do verdadeiro valor do PLT obtido pelo próprio PLT.
- Diferença real entre os dois valores verdadeiros.

A tabela 16 apresenta a correlação entre UCS e PLT proposta por diversos autores. Muitos dos estudos apresentados na tabela a seguir comparam uma série de valores obtidos pelo PLT a um único teste de UCS, dessa forma, muito dos erros de correlação pode ser atribuído a algum erro de medição no UCS.

Referência (autor)	Número de testes	Fator de Conversão	Comentário
Das	-	14,7	pedaços, amostras novas e amostras velhas
Vallejo	420 PLT - 21 UCS	17,4	Pedaços de amostra irregulares
Smith	-	8	UCS < 1000 psi
Broch e Franklin	-	23,7	11 tipos de rocha
Carter e Sneddon	1000 PLT - 68 UCS	21 - 22	3 tipos de rocha
O'Rourke	66	30	amostras de um furo
Hassani	1000	29	-
Singh e Singh	65	23,4	-
Read	-	20	-
Bieniawski	160	23,9	-
Rusnak	386	20	-
Jermy e Bell	-	14,1	maior parte de arenitos

Tabela 16: Diversas correlações entre UCS e PLT propostas por diversos autores

O gráfico na figura 13 ilustra uma das correlações supracitadas:

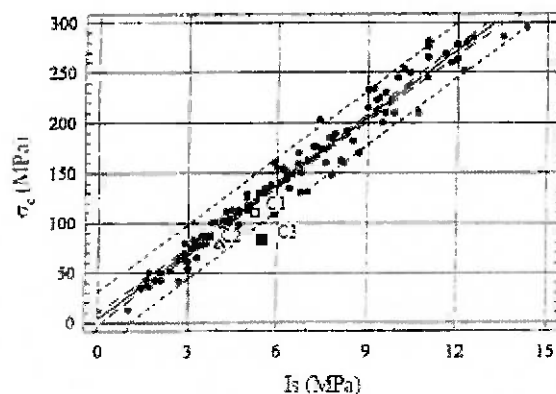


Figura 13: Exemplo de correlação entre UCS e PLT

Fonte: (Conde, M. Carmo, Denis da Gama; Lopes, M. G., 2004)

Podemos perceber que o Point Load Test pode ser tranquilamente utilizado na obtenção da resistência à compressão uniaxial.

A grande vantagem em utilizar o PLT para obter um valor de resistência à compressão uniaxial é que o primeiro ensaio pode ser de realização bastante mais simples que o segundo, além de não ser necessário ter cuidados relevantes na preparação dos corpos de prova, podendo mesmo ser ensaiados pedaços de rocha com forma irregular, diferentemente do UCS, que necessita de um corpo de prova cilíndrico com bases perfeitamente paralelas.

3.2.3. Resistência à Compressão Uniaxial versus Martelo Schmidt

Estudos comprovam a existência de correlação entre os resultados obtidos a partir da resistência à compressão uniaxial e o ensaio de martelo Schmidt. Segundo Dinçer (2004), essa correlação pode ser ilustrada pelo gráfico apresentado na figura 14, e pode ser utilizada para basaltos, tufo vulcânicos e andesitos. A prática desse ensaio em detrimento à resistência à compressão uniaxial acarreta muitas vantagens que vão desde a facilidade, já que o equipamento para o ensaio de martelo Schmidt é portátil e de fácil manuseio até o tempo em que se pode obter os resultados, que variam bastante, além, obviamente, do baixo custo desse último.

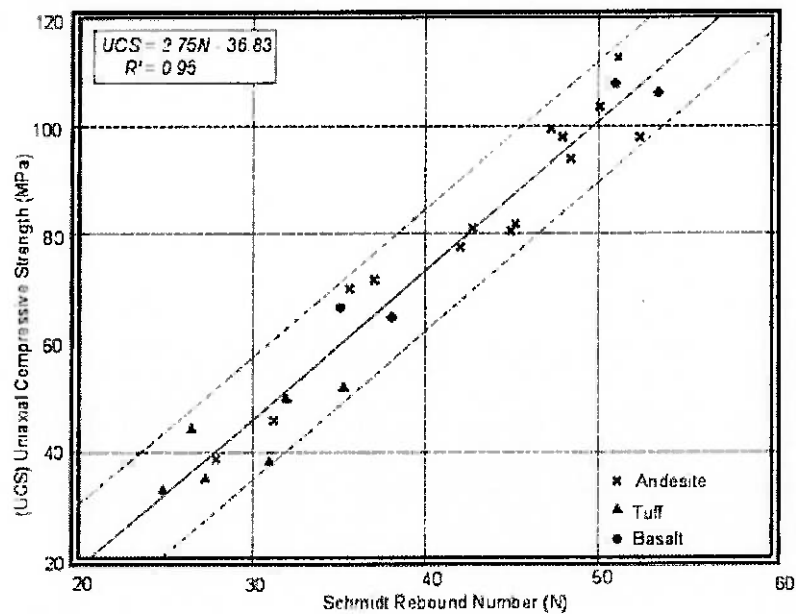


Figura 14: Correlação entre UCS e Martelo Schmidt

Fonte: (Dinger, 2003)

3.2.4. Resistência à Compressão Uniaxial versus Velocidade de onda P

Sharma (2007) sugeriu a correlação entre a velocidade de onda P e a compressão uniaxial ilustrada na figura 15:

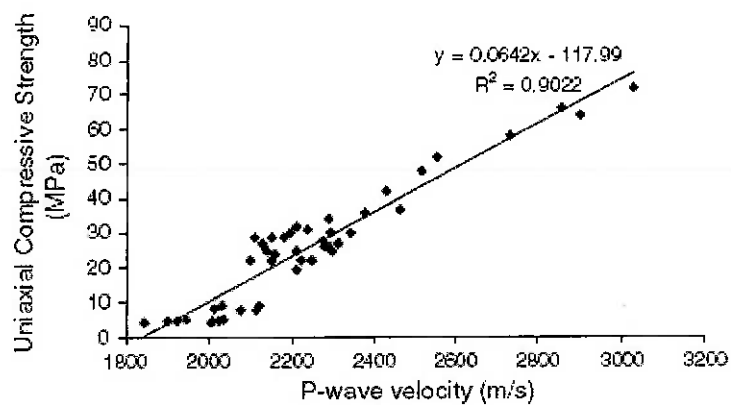


Figura 15: Correlação entre UCS e Velocidade de onda P

Fonte: (Sharma, 2007)

A análise estatística que levou a essa correlação foi feita com base em um intervalo de confiança de 95%, e levou em conta a comparação entre os resultados obtidos em rochas basálticas, carvões e arenitos.

4. Conclusão

A engenharia caminha no sentido de facilitar, baratear e otimizar os processos necessários ao progresso do homem, ou seja, torná-los mais acessíveis e precisos. Dessa forma, a utilização de métodos indiretos e expeditos de obtenção de parâmetros significa um passo à frente no desenvolvimento da engenharia. A economia de recursos e tempo nesse tipo de atividade acrescenta mais segurança e sustentabilidade nas atividades de mineração subterrânea.

Constatamos, com os apontamentos feitos no curso deste trabalho, que é possível trocar os ensaios ditos clássicos por outros ensaios mais simples nas atividades de caracterização e classificação dos maciços. Dessa forma, o uso do índice volumétrico de fraturas no lugar do RQD e a substituição da resistência à compressão uniaxial pelo point load test é aceitável.

No entanto, os métodos expeditos de obtenção de parâmetros são, como qualquer outro método, passíveis de erros e incertezas. Assim como a classificação de maciços, que deve ser feita não só por um sistema, mas sim pela comparação de diversos sistemas, os testes que determinam os parâmetros devem ser utilizados conjuntamente e comparados para que se tenha uma acurácia melhor na obtenção desses parâmetros. E mesmo tendo sido feita uma caracterização de alta qualidade, os sistemas empíricos não devem ser a única opção na determinação de um suporte. Além de um dimensionamento detalhado e rigoroso, é absolutamente necessária, durante a fase de construção, que se verifique a adequação do suporte escolhido e que a experiência pessoal do profissional seja levada em conta.

Além disso, com o uso desses métodos, a classificação de maciços passa a ser uma caracterização muito mais barata, rápida e simples de ser feita, o que permite ao engenheiro trabalhos mais minuciosos e específicos, aumentando o grau de certeza utilizado em projetos e, conseqüentemente, atingindo maior eficiência nos trabalhos.

Bibliografia

Bieniawski T. Z. Engineering Rock Mass Classification [Book]. - USA : Wiley Interscience, 1989.

Coates D.F. Rock Mechanics Principles [Book]. - Canadá : CANMET, 1981.

Conde, M. Carmo; Dinis da Gama; Lopes, M. G. Correlação entre o comportamento mecânico de agregados e das rochas originais [Article] // 9º Congresso Nacional de Geotecnia. - Aveiro : [s.n.], 2004.

Dinçer Ismail Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs [Journal] // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. - 2004.

Hudson Harrison & Engineering Rock Mechanics Part 2 [Book]. - University of London : Pergamon, 2000.

John Rusnak Christopher Mark Using the Point Load Test to determine the Uniaxial Compressive Strength of coal [Journal].

Mohammadi R. Rahmannedjad and H. Comparison of rock mass classifications systems [Article] // Journal of Mining Science. - 2007.

Núcleo de Rochas, Centro de Geotecnia IST Critérios para a caracterização geotécnica de maciços rochosos para obras subterrâneas [Conference] // Congresso dos Engenheiros. - Vidago : [s.n.], 2001.

Palmstrom Arild IV Congress international association of engineering geology volume 2 [Article] // The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. - 1982.

Sharma P. K. A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength [Journal] // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. - 2007.

Terzaghi Karl Rock tunneling with steel supports [Book]. - Youngstown : R. V. Proctor and T. L. White, 1946.

Working Group on Revision of the Point Load Test Method Suggested Method for Determining Point Load Strength [Journal] // ISRM. - 1985.

www.mecaroc.fpms.ac.be [Online].

www.pmi.usp.br [Online].

www.proceq.com [Online].

www.rocscience.com [Online].

www.taifazarin.com [Online].