SERVIÇO PÚBLICO

FEDERAL UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESPECIALIZAÇÃO EM GEOLOGIA DE MINAS E TÉCNICAS DE LAVRA A CÉU ABERTO

HARLEM ENCKEL SOUZA CUNHA

CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS NO ÂMBITO DA MINERAÇÃO

Belém- PA

2016

HARLEM ENCKEL SOUZA CUNHA

CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS NO ÂMBITO DA MINERAÇÃO

Monografia apresentado ao Curso de Especialização *Lato Sensu* do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Geologia de Minas e Técnicas de Lavra a Céu Aberto.

Orientador: Prof. Joaquim Carlos Barbosa Queiroz

Belém-Pa

2016

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Cunha, Harlem Enckel Souza,1979

Classificação e caracterização de maciços rochosos no âmbito da mineração / Harlem Enckel Souza Cunha – 2016

119 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Joaquim Carlos Barbosa Queiroz

Monografia (especialização) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Programa de Pós-Graduação *Lato Sensu* à Distância em Geologia de Minas e Técnicas de Lavra a Céu Aberto Belém, 2016.

1. Geologia de engenharia. 2. Mecânica de rochas. I. Título.

CDD 22. ed.: 624.151

HARLEM ENCKEL SOUZA CUNHA

CLASSIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS NO ÂMBITO DA MINERAÇÃO

Monografia apresentado ao Curso de Especialização *Lato Sensu* do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Geologia de Minas e Técnicas de Lavra a Céu Aberto.

Data da Provação: ___/___/____

Conceito: _____

Banca Examinadora:

_____
Prof. Joaquim Carlos Barbosa Queiroz - Orientador
Doutor em Geociências e Meio Ambiente
Universidade Federal do Pará

_____
Prof. Milton Antônio da Silva Matta - Membro
Doutor em Geologia e Geoquímica
Universidade Federal do Pará

_____
Profa. Rosemery da Silva Nascimento - Membro
Doutora em Geociências
Universidade Federal do Pará

Dedico esse trabalho a minha querida e paciente esposa Macya Málie Druck Pliacekos que sempre me apoia diretamente e indiretamente a vencer as etapas vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus;
Agradeço minha esposa Macya Málie Druck Pliacekos pelo entendimento nas horas de ausência;
Agradeço ao meu orientador Joaquim Queiroz pela atenção e disposição;
Agradeço meus pais por ter me dado à oportunidade de uma educação de boa qualidade.
Agradeço a Universidade Federal do Pará, instituto de geociências por acolher e explicar quando era preciso.

‘ O estudo exige prática. ’ (Textos Judaicos)

RESUMO

Os sistemas de classificações de maciços rochosos são boas ferramentas para avaliar e quantificar a qualidade de um maciço rochoso e auxiliar nos projetos de engenharia em rocha, como escavações, abertura de galerias e túneis, estabilidade de encostas, e diversas outras intervenções que têm como material a rocha. Os principais sistemas de classificação já desenvolvidos como a classificação geomecânica, RMR (*Rock Mass Rating)* têm sua utilização difundida em todo o planeta, o que acaba por promover o desenvolvimento do próprio sistema de classificação e de outras ferramentas atreladas a ele, como o surgimento de fórmulas empíricas para a determinação de algumas propriedades mecânicas dos maciços rochosos. Dentro desse âmbito, este trabalho busca utilizar três sistemas de classificação, o RMR (*Rock Mass Rating)*, o sistema-Q (*Tunnelling Quality Index*) e o GSI (Geological Strength Index), para classificação de maciços rochosos e a relação de análise de campo e as interpretações geológicas indicando a caracterização geomecânica. Os resultados dessas classificações e caracterizações, além de sugerir uma série de procedimentos de engenharia geológica, também podem ser utilizados para calcular algumas propriedades mecânicas dos maciços rochosos através de fórmulas empíricas desenvolvidas por alguns autores, baseadas muitas vezes, na correlação de um grande número de estudos práticos advindos da utilização desses parâmetros gerados tantos nas classificações e caracterizações de maciços rochosos. Baseado nesse estudo busca-se entender as várias relações entre as classificações e caracterização de maciços rochosos e suas propriedades mecânicas, assim como conclusões acerca da utilização de determinadas equações e métodos envolvidos nesses processos.

Palavras-chave: Classificações geomecânicas. Maciços rochosos. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Methods of classifications of rock masses are good tools to assess and quantify the quality of a rock mass and assist in engineering projects in rock, such as excavations, opening galleries and tunnels, slope stability, and various other interventions that have the stuff, the rock. These methods quantify or describe in terms of numbers several characteristics of the rock mass. The main classification systems already developed as classification geomechanics RMR (Rock Mass Rating) have widespread use around the world, which ultimately promote the development of own rating system and other tools linked to it, such as the emergence of empirical formulas for determining the mechanical properties of rock masses. This paper seeks to use three classification systems, the RMR (Rock Mass Rating), Q-system (Tunnelling Quality Index) and GSI (Geological Strength Index), for classification of rock masses and therelationship of field analysis and geological interpretations indicating the geomechanical characterisation.The results of these ratings and characterizations, as well as suggest a series of geological engineering procedures, can also be used to calculate some mechanical properties of rock masses by means of empirical formulas developed by some authors, often based on correlation of a large number of practical studies arising from the use of these parameters generated so many in the rankings and massive Rocky characterizations. Based on this study, we seek to understand the various relationships between ratings and characterization of rock masses and their mechanical properties, as well as conclusions on the use of certain equations and methods involved in these processes.

Keywords: Geomechanical classifications. Massive rock. Mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1 - Deformação homogênea a) e heterogênea (b). 26
Figura 2 - Dimensão da obra em relação ao espaçamento das descontinuidades.. 26
Figura 3 - Sonda de perfuração profunda método convencional..... 32
Figura 4 - Sonda de perfuração profunda método Wire Line 33
Quadro 1 - Grau de alteração para gnaisses, migmatitos, granitos e granitoides. 41
Quadro 2 - Grau de alteração.....42
Quadro 3 - Grau de alteração para basalto, metassedimentos e granito-gnaisse.....42
Quadro 4 - Grau de alteração para basalto. 43
Quadro 5 - Grau de alteração de rocha.....43
Quadro 6 - Grau de coerência para rochas brandas. 45
Quadro 7 - Grau de coerência para rochas. 46
Figura 5 - Representação esquemática de um sistema de 15 fraturas em um maciço rochoso. A) bloco diagrama com fraturas (a face frontal é a face exposta em uma galeria ou num talude). B) formato do bloco mínimo isolado pelo sistema de fraturas. C) diagrama de rosetas representando leituras estatisticas.....48
Figura 6 - Tamanho de uma descontinuidade num maciço de Granito. 51
Figura 7 - Ilustração exemplificando a persistência de famílias de descontinuidades. A até D ilustram a diminuição da persistência de muito grande para muito pequena ao longo de uma face exposta para medida. E e F também ilustram a persistênciaprquena a muito pequena..... 50
Figura 8 - Representação bidimensional da persistência 52
Figura 9 - Distância perpendicular entre as descontinuidades adjacente de espaçamento no maciço de Granito. 53
Quadro 8 - Parâmetros de rugosidade para classificação.....55
Figura 10 - Ilustração dos tipos de rugosidade segundo as classes. 56
Figura 11 - Perfil padrão de rugosidade para a superfície das descontinuidades tipo fraturas, para estimar o coeficiente de rugosidade (JRC) 56
Quadro 9 - Classificação qualitativa do grau de alteração de descontinuidades 58

Figura 1 - Ábaco de correlação para obtenção da resistência a compressão através do esclerômetro de Schmidt e do peso específico da rocha.....59
Figura 13 - Representação de um maciço rochoso mostrando a abertura entre paredes adjacentes da descontinuidade no maciço de Granito. 61
Quadro 10- Abertura de descontinuidades.....62
Quadro 11. Ensaios manuais para estimar a resistência ao cisalhamento não drenada de materiais de preenchimento coesivos 63
Quadro 12- Ensaios manuais para estimar a resistência de materiais rochosos. 64
Figura 14- Parâmetros de análise de um meio fraturado. 66
Figura 15- Ensaio de perda d'água. 66
Figura 16- Processo para medir e calcular o *RQD*.....73
Quadro 13- Relação entre o índice *RQD* e a qualidade da rocha para a engenharia. 74
Quadro 14- Qualidade do maciço rochoso baseado em valores do IQR 75
Quadro 15- Estimativa de Resistência à Compressão de Rochas 81
Figura 17- Método alfa-beta. 85
Figura 18- Figura A medição do ângulo alpha. A em B medição do ângulo beta.....86
Quadro 16- Classes de maciços 87
Quadro 17- Descrição do tamanho dos blocos em função do número de descontinuidades..... 90
Quadro 18. Classificação do parâmetro e RQD para o índice Q 91
Figura 19- Quantificação do GSI pela condição das descontinuidades e RQD..... 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação da Persistência.....52
Tabela 2- Classificação do espaçamento.....54
Tabela 3- Constante de correlação entre a resistência à compressão uniaxial e a carga puntiforme em função do diâmetro da amostra. 60
Tabela 4- Principais sistemas de classificação de maciços rochosos.....70
Tabela 5- Classificação geomecânica 77
Tabela 6- Classificação da condição das descontinuidades 78
Tabela 7- Efeito da orientação das descontinuidades 78
Tabela 8- Classificação do parâmetro *Jn* para o índice *Q.*.....93
Tabela 9- Classificação do parâmetro *Jr* para o índice *Q*. 94
Tabela 10. Classificação do parâmetro Ja para o índice Q..... 94
Tabela 11. Classificação do parâmetro Jw para o índice Q..... 96
Tabela 12- Classificação do parâmetro *SRF* para o índice *Q* 99
Tabela 13- Classes de maciços rochosos em função de *Q* 100
Tabela 14- Índice de suporte de escavação (*ESR*) apropriado para vários tipos de escavações subterrâneas.....101
Tabela 15- Sistema *Q* para classificação dos maciços rochosos e escolha do tipo de suporte 102
Tabela 16- Estimativa da resistência ao cisalhamento aparente 103

LISTA DE ABREVIATURAS

ϕ(f): Ângulo de atrito de pico

γd: Peso específico seco (KN/m³)

ϕr: Ângulo de atrito residual ou básico

δ_{ij} : Delta de Kronecker

a: Abertura das descontinuidades

ABGE: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental

AT: Área total

b: Espaçamento das descontinuidades

C: Constante

c: Resistência à compressão simples

CBMR: Comitê Brasileiro de Mecânica das Rochas

DCDMA: Diamond Core Drill Manufacturers Association

g: Aceleração da gravidade

GSI: Geological Strength Index

IAEG: Associação Internacional de Geologia de Engenharia

IQR: Índice de Qualidade da Rocha

Is: Índice de resistência ao carregamento puntiforme

ISRM: Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas

Ja: Índice de influência da alteração das paredes das descontinuidades

JCS: Resistência à compressão das paredes da descontinuidade

Jn: Índice de influência do número de famílias das descontinuidades

Jr: Índice de influência da rugosidade das paredes das descontinuidades

JRC: Coeficiente de rugosidade da descontinuidade

Jv: Número total de descontinuidades

Jw: Índice de influência da ação da água subterrânea

Kf: Permeabilidade das descontinuidades

Km: Permeabilidade do maciço rochoso

Kr: Permeabilidade da matriz rochosa

L: Trecho ensaiado em metros (m)

m: Metro

MDF: Método de Diferenças Finitas

MEC: Método dos Elementos de Contorno

MEF: Método dos elementos finitos

mm: Milímetro

MPa: Megapascal

N: Comprimento do trecho de fraturamento homogêneo.

P: Pressão efetiva em kgf/cm²

P_i : Comprimento das peças de testemunhos

Q: Sistema de Barton

Q: Vazão em litros/minuto (L/min)

R: Valor médio

r: Valor obtido no esclerômetro

RMR: Rock Mass Rating

RQD: *Rock Quality Designation*

SRF: Índice de influência do estado de tensões no maciço (Stress Reduction Factor).

u: Pressão de água nas descontinuidades

v: Viscosidade cinemática da água.

Ld : Traço das descontinuidades

Lr : Ponte rochosa

k : Persistente

SUMÁRIO

1 **INTRODUÇÃO**.....18
1.1 **Objetivos**.....19
1.2 **Metodologia do trabalho**.....20
2 **ATUAÇÃO DA MECÂNICA DAS ROCHAS NA MINERAÇÃO**..... 22
2.1 **Projetos em maciço rochosos** 24
2.2 **Feições caraterísticas de maciços rochosos** 25
2.3 **Homogeneidade e heterogeneidade**.....26
2.4 **Isotropia e anisotropia**.....26
2.5 **Meio continuo ou descontinuidades** 27
2.6 **Efeito escala** 28
2.7 **Tensão e deformação**.....28
2.8 **Presença da água**.....28
2.9 **Alteração e alterabilidade**.....29
3 **TÉCNICAS DE PROSPECÇÃO**..... 30
3.1 **Prospecções por sondagem mecânica (ensaios diretos)**.....31
3.1.1 Método Convencional.....32
3.1.2 Método *Wire Line.* 32
3.2 **Prospecção por geofísica (ensaios indiretos)**.....33
3.2.1 Transmissão sísmica ascendente (*uphole shooting*).....35
3.2.2 Transmissão sísmica descendente (*downhole shooting*) 35
3.2.3 Transmissão sísmica entre furos (*crossohole transmission*) 35
3.2.4 Perfilagem acústica (*acousting borehole logging*) 36
4 **CARACTERIZAÇÕES DE MACIÇO ROCHOSO** 37
4.1 **Classificações geológicas**.....38
4.2 **Composições litológicas** 40
4.3 **Alteração**.....40
4.4 **Coerência**.....44
4.5 **Caracteres das descontinuidades** 46
4.5.1 Grau de fraturamento do maciço rochoso 47
4.5.2 Orientação espacial.....49

4.5.3 Persistência.....50
4.5.4 Espaçamento 53
4.5.5 Rugosidade 55
4.5.6 Resistência das paredes 57
4.5.7 Abertura.....60
4.5.8 Preenchimento 62
4.5.9 Percolação e fluxo de água em maciços rochosos 65
5 **CLASSIFICAÇÕES DE MACIÇOS ROCHOSOS** 69
5.1. **Índice de qualidade de rocha (RQD)**. 72
5.2 **Sistema de classificação *RMR*** 75
5.2.1 Diretrizes para descrição do sistema (*RMR*) 79
5.2.2 Diretrizes para estimativa da resistência à compressão 80
5.2.3 Diretrizes para medição de *RQD*.....82
5.2.4 Diretrizes para determinação do espaçamento médio entre descontinuidades. 83
5.2.5 Diretrizes para estimativa das condições das descontinuidades.....83
5.2.6 Condições de água no maciço rochoso.....84
5.2.7 Influência da direção e mergulho das descontinuidades. 84
5.3 **Aplicação de técnicas de krigagem para estimativa do *RMR*** 87
5.4 **Sistema de classificação geomecânica *Q***.....89
5.4.1 Diretrizes do índice de qualidade *Q*. 90
5.4.2 Rock quality designation (RQD). 90
5.4.3 Números de juntas (*Jn*) 93
5.4.4 Índice de rugosidade das juntas (*Jr*) 94
5.4.5 Índice de alteração e preenchimentos de juntas (*Ja*). 94
5.4.6 Fator de redução devido presença de água (*Jw*). 96
5.4.7 Fator referente à influência do estado de tensão maciço (*SRF*). 98
5.5 **Utilização do sistema *Q* de Barton** 100
5.5.1 Resistência ao cisalhamento.....103
5.5.2 Estimação do módulo de deformabilidade.....105
5.5.3 Correlações entre o *RMR* e o sistema-*Q*.....105

5.6 ***Geological Strength Index* (*GSI*)**. 106
5.6.1 Descrição geológica no quadro *GSI* 108
6 **CONCLUSÕES**.....111
REFERÊNCIAS 115

1 INTRODUÇÃO

Desde a remota antiguidade os minerais geológicos e metais sempre desempenhou um papel importante na vida do ser humano, cavernas serviram de abrigo, rochas eram instrumentos e armas, elevações eram escolhidas como local para construção de cidades mais protegidas de ataques, com o passar dos tempos à raça humana vem se multiplicando progressivamente e isso cresceu o aumento de insumo para produção de qualidade de vida, parte dessa matéria prima vem de camadas da crosta terrestre que fica abaixo do solo (subsolo) onde encontramos muitas riquezas minerais como ouro, prata, cobre, etc.

Esse aumento de produtividade teve origens após a 2ª grande guerra com a introdução de novos explosivos, novas máquinas de perfuração, aumento da capacidade das máquinas de desmonte, melhoria dos processos de beneficiamento dos minerais e uso de máquinas elétricas de grande capacidade (máquinas auxiliares, de desmonte, carregamento e transporte).

Com essa aceleração de extração de material e o surgimento de cavas, poços, galeria subterrânea cada vez mais profunda, a mineração a céu aberto proporcionou um acréscimo de produtividade em relação à mineração em subsolo.

A presença de acidentes nesses ambientes levou a um incremento na investigação do comportamento dos maciços rochosos. As condições de estabilidade, exigidas para essas obras em mineração, diferem daquelas de outros aludes de obras civis, basicamente, pela dinâmica da escavação, pelo seu porte, atingindo alturas de centenas de metros e extensão de quilômetros e, ainda, pelas condições peculiares da mineração, tais como fatores de segurança menores, aceitação de rupturas localizadas, convivência com vibrações causadas por desmonte por explosivos, rebaixamento do nível d'água buscando taludes mais íngremes, possibilidade de experimentação de ângulos de talude à medida do avanço da lavra, etc. Com isso notou-se ser necessária uma melhor compressão do comportamento dos maciços rochosos para a execução de obras com padrões de segurança e economia aceitáveis.

Dentro de um projeto de mineração, como construção de taludes, galeria de mineração, barragens é necessário incluir um minucioso estudo das estruturas (falhas, dobras, fraturas, juntas, zonas de cisalhamentos) que classifique a geologia e a mecânica das rochas. Sendo que com a geologia é possível definir a extensão e

profundidade do corpo mineralizado e a mecânica das rochas definir com que inclinação um talude pode ser escavado ou uma galeria pode ser desenvolvida mais para isso é necessário conhecer as propriedades mecânicas do maciço rochoso, os mecanismos de ruptura geralmente controlados pelas descontinuidades geológicas estruturais e as condições da água subterrânea. A quantificação direta destas variáveis é complexa pela heterogeneidade e anisotropia dos meios rochosos.

A caracterização geológica e a classificação geomecânica de um maciço rochoso constituem-se do levantamento de “atributos” do meio rochoso que, isolada ou conjuntamente, condicionam o seu comportamento. A natureza de suas características varia de local para local, em função da história geológica da região estudada.

A mecânica das rochas vem desenvolvendo metodologias indiretas que avalie e quantifique as condições geológicas naturais mais relevantes no desempenho dos maciços rochosos, para serem utilizados nas análises de estabilidades.

A literatura geotécnica contém muitas referências em relação às influências das descontinuidades na resistência ou qualidade dos maciços rochosos. Adicionalmente, é amplamente aceito o fato de que o conhecimento das propriedades geotécnicas dos maciços rochosos é mais importante que o conhecimento das propriedades geotécnicas das rochas intactas.

Como consequência, muitas classificações permitem a estimação de propriedades físicas dos maciços rochosos e das descontinuidades.

A análise da estabilidade de maciços rochosos, visando o dimensionamento de escavações e minas a céu aberto, é a principal preocupação de muitas classificações modernas.

1.1. Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de entender a aplicação de alguns métodos de avaliação de maciços rochosos em mineração, e consequentemente uma comparação entre os métodos no que está relacionado a sua aplicabilidade na obtenção de propriedades dos maciços e suas descontinuidades com suas reologias. Nesse aspecto, os métodos que valorizam a resistência da rocha intacta, como o RMR será comparado ao sistema-Q de Barton, que apresenta uma abordagem baseada principalmente nas características das descontinuidades e no

estado de tensões atuantes no maciço rochoso. Já para fins de obtenção de parâmetros geomecânico de maciços rochosos onde se pode formar uma fusão dos sistemas RMR e Q é usado o GSI com entrada direta para a seleção de parâmetros para a previsão de força no maciço e sua deformabilidade.

Esses sistemas foram escolhidos porque seus parâmetros podem ser quantificados, ou qualificados, com maior facilidade através de testemunhos de sondagem e mapeamento. Isso é visto em uma vasta literatura já publicada sobre o assunto.

1.2. Metodologia do trabalho

A metodologia empregada nesse trabalho consiste nas principais técnicas de prospecção, caracterização e classificação de maciço rochosos em minerações assim como suas relações distintas. Seu conteúdo divide-se entre os capítulos descritos a seguir.

O presente capítulo é composto por uma introdução ao tema, seguido pelos objetivos que especificam e caracterizam a abordagem do assunto proposto e sua importância no estudo da mecânica das rochas e geotecnia.

O capítulo 2 é feito uma introdução sobre a mecânica das rochas na mineração com ênfase na descrição dos métodos aplicados no âmbito da mineração seguido por uma abordagem sobre relações diretas no comportamento do maciço rochoso.

O capítulo 3 é dedicado a fase de prospecção, técnicas geotécnicas, métodos e ensaios usados na mineração para compreender o comportamento dos maciços rochosos.

O capítulo 4 apresenta as etapas de caracterização de maciços rochosos, com sua caracterização adequadas, em termos físicos e mecânicos evidenciando informações pontuais onde se busca a identificação de zonas estruturalmente homogêneas para execução de obras na mineração.

O capítulo 5 traça a metodologia utilizada, descrevendo sequencialmente todos seus componentes, para o qual são usados os métodos empíricos mais usado na mineração que são o RQD (*Rock Quality Designation)*, RMR (Rock Mass Rating), Q-system (*Tunnelling Quality Index)* e o GSI (*Geological Strength Index*) permitindo

a caracterização dos maciços rochosos (resistência e deformabilidade) através de um conjunto de propriedades identificadas por observação direta e ensaios realizados in situ. Permito fazer previsões quanto ao comportamento do maciço e recomendações quanto ao suporte julgado mais adequado para as condições observadas.

Finalizando a monografia com o capítulo 6 é apresenta a conclusão do trabalho com as vantagem e desvantagem da caracterização e classificação dos maciços rochosos onde correlaciona os seus parâmetros entre si, levando em consideração a similaridades entre eles.

2 ATUAÇÃO DA MECÂNICA DAS ROCHAS NA MINERAÇÃO.

São inúmeras as situações em que esta ciência pode ser aplicada na mineração, sempre com o objetivo principal de garantir uma solução técnica viável, ou seja, com o menor custo possível, obedecendo ao quesito de segurança e a minimização de impactos ambientais. Destacando-se no projeto estrutural de minas a céu aberto (taludes), subterrâneas (túneis, poços) e barragens.

A mecânica das rochas estuda a reologia dos materiais geológicos, nomeadamente daqueles que na prática são considerados como rochas e não como solos. Para fins de Engenharia a distinção entre solo e rocha é realizada de forma não rigorosa. As rochas são materiais menos deformáveis e mais resistentes, não sendo questão de fundamental interesse definir uma fronteira clara entre um solo duro e uma rocha branda.

Rocha (1981) apresenta um critério de distinção entre solos e rochas segundo o qual "os solos são os terrenos constituídos por partículas soltas ou agregadas de tal modo que se podem separar facilmente mediante agitação dentro da água". É importante frisar o fato de que ao referido critério correspondem materiais que exibem propriedades muito diversas, em especial deformabilidade e resistência, que são as propriedades de maior interesse para as obras de engenharia na mineração.

Num sentido mais amplo, a mecânica das rochas estudar o comportamento mecânico dos maciços rochosos in situ, em relação às obras de engenharia.

Uma classificação técnica de maciços rochosos deve permitir identificar o material e sua estrutura. Esta classificação deve também refletir o comportamento do maciço em função da obra implantada e das solicitações mecânicas impostas pela mesma (LADEIRA,1981).

A presença de descontinuidades e uma das questões centrais no estudo de maciços rochosos. Isso exige o tratamento de materiais intactos de comportamento complexo, interceptado por descontinuidades que delimitam blocos isolados, isso no caso de descontinuidades extensas (quando comparadas a escala da obra), chamadas de descontinuidades persistentes. No caso de descontinuidades não persistentes, além dos comportamentos isolados do material e das descontinuidades, surge o problema de interação entre os dois.

As aplicações de mecânica das rochas dentro da mineração podendo ser divididas de forma didática em “Atividades de Superfície” e “Atividades em Profundidade”:

a) Atividade de Superfície (<100 m):

- Fundações de barragens
- Estrada, cortes em geral, mina a céu aberto;
- Túneis próximos à superfície

As fundações de estruturas de superfície normalmente não requerem estudos aprofundados das propriedades e comportamento das rochas, a menos que estas estruturas sejam muito grandes, por exemplo, grandes barragens, usina de beneficiamento etc. Os problemas associados a estas estruturas estão na determinação da capacidade de suporte e o recalque da rocha. No caso de pequenas construções deve-se preocupar apenas em verificar o potencial de expansibilidade da rocha de suporte, evitando desta forma problemas quanto à presença de água.

Outro aspecto a ser levada em conta sobre obras de superfície está no fato do rigoroso controle que se deve ter em detonações próximas a estruturas vizinhas, para evitar que estas não sejam abaladas pelas vibrações causadas pelas explosões.

A estrutura de superfície mais desafiadora no que diz respeito à mecânica das rochas são as grandes barragens, devido às elevadas tensões induzidas nas fundações atuando simultaneamente com a força e ação da água. Há, ainda, a possibilidade de existirem descontinuidades no maciço rochoso podendo levar a problemas de escorregamento ou fluxo excessivo pelas fundações. Neste tipo de obra a mecânica das rochas está também envolvida na escolha dos materiais (AZEVEDO; MARQUES, 2002).

b) Atividades em Profundidade (>100 m):

- Mina em profundidade

As rochas normalmente têm como principais problemas a investigação do perfil geológico, a determinação das propriedades mecânicas das rochas, o estabelecimento do perfil detalhado do fraturamento e suas propriedades, a determinação das tensões naturais e finalmente como estas tensões vão ser alteradas devido à obra de engenharia e como este material vai responder frente a esta mudança no estado de tensão inicial.

A resposta do maciço frente à mudança do estado de tensão natural é o problema dominante na análise da estabilidade das estruturas em profundidade.

Na mineração o dimensionamento das ferramentas de corte e perfuração e dos explosivos vai depender das propriedades e condições da rocha. A decisão principal a ser tomada na mineração, é se deve tentar deixar as cavidades abertas na extração do minério ou deixar a rocha deforma-se, ou seja, sem nenhum tratamento geotécnico. A decisão correta vai depender das condições da rocha e do estado de tensão a que está submetido.

2.1 Projetos em maciço rochosos.

Um projeto de engenharia pode ser definido como uma atividade socioeconômica, na qual, princípios científicos, de engenharia e comportamentais, em conjunto com informações técnicas e experimentais são aplicados, com habilidade, imaginação e senso crítico, na criação de dispositivos, processos e sistemas, economicamente viáveis, agradáveis esteticamente e ambientalmente aceitáveis, para o benefício da sociedade.0 processos de projetar engloba todas as atividades e eventos que podem ocorrer desde o reconhecimento da necessidade social ou oportunidade até sua especificação detalhada ou solução aceitável (BIENIAWSKI, 1989).

Os estágios no processo de um projeto de engenharia segundo Bieniawski (1989) pode ser dividido em reconhecimento de uma necessidade, estabelecimento do problema, identificação dos objetivos e lançamento do projeto, coleta de informações, formulação conceitual em acordo com os critérios de projeto, busca de um método, teoria, modelo ou hipóteses, análise dos componentes da solução, síntese para criação de soluções alterativas, valoração das ideias e da solução, otimização, comunicação, implementação.

Todos os estágios estão sujeitos a uma retroalimentação. Os métodos de projeto podem ser reunidos em três categorias, sendo usual aplicar os três tipos de métodos em uma mesma obra. As categorias de projetos são:

Métodos analíticos: o projeto e realizado baseado em resultados de técnicas de analises como as soluções analíticas fechadas, métodos numéricos, (método dos elementos finitos (MEF), método de Diferenças Finitas (MDF), Método dos

Elementos de Contorno (MEC), etc.), simulações analógicas (elétricas e fotoelásticas) e modelagem física.

Métodos observacionais: onde o comportamento da obra e inferido utilizando-se os resultados de instrumentação ou observação efetuados durante a construção. Embora considerado um método separado, e usado para verificar os resultados e as previsões dos outros métodos. Esta seria a abordagem do "projetar enquanto constrói".

Métodos empíricos: utilizam-se estudos de obras anteriores para prever o comportamento de obras posteriores. Um exemplo clássico, em Mecânica das Rochas, são as classificações geomecânica.

Existe uma nítida diferença entre o projeto de uma estrutura convencional (edifícios, pontes) e um projeto em rocha. Em um projeto convencional as cargas aplicadas são determinadas primeiras e o material e prescrito com as resistências e características de deformação apropriadas, seguindo a geometria estrutural selecionada. Na mecânica das rochas o projetista trabalha com maciços rochosos complexos, e as propriedades dos materiais não podem ser estabelecidas e muitas vezes só serão conhecidas em fases avançadas da construção, as cargas aplicadas às estruturas de suporte dependerão não só das tensões iniciais do maciço, mas também da geometria e sequência de escavação, das propriedades do material empregado para suporte, etc. A própria geometria da obra pode ser condicionada pelas características geológicas (BIENIAWSKI, 1989).

2.2 Feições caraterísticas de maciços rochosos

A dificuldade de realizar previsões da resposta da mecânica das rochas deriva em grande parte da presença de descontinuidades e sua variabilidade. A rocha tem seu comportamento individualizado em relação a outros materiais de engenharia, em grande parte, pela presença de descontinuidades (juntas, planos de acamamento, falhas, etc.). A resposta da própria rocha intacta e complexa e difícil de descrever teoricamente. Em uma escala microscópica e macro uma rocha pode ser constituída de um agregado de cristais de minerais que possuem propriedades físicas bastante diferentes, podendo conter microfissuras inter e intra granulares, podendo possuir características de anisotropia e resposta mecânica não linear (BROWN, 1995).

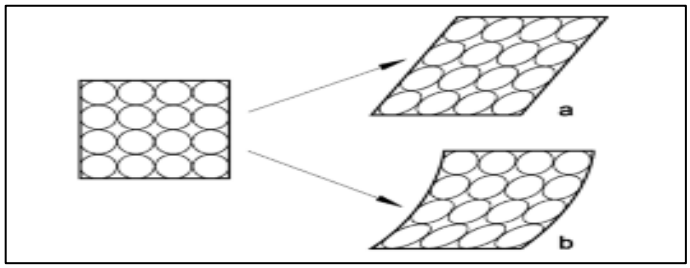
Alguns aspectos são reconhecidamente relevantes no comportamento dos maciços rochosos, muitos destes aspectos estão inter-relacionados, estando sua definição amarrada a definição de outros.

A seguir são descritas as relações diretas no comportamento do maciço rochoso.

2.3 Homogeneidade e heterogeneidade

Um maciço e dito heterogêneo se suas propriedades de interesse (permeabilidade, resistência, deformabilidade, etc.) ou os materiais constituintes variam com a posição no espaço. Em uma visão estrita todos os maciços apresentam alguma heterogeneidade de um ponto de vista prático diz-se que um maciço é homogêneo se a variação da propriedade de interesse não for relevante.

Figura 1 - Deformação homogênea a) e heterogênea (b).



Fonte: Do autor.

Numa deformação homogênea, retas permanecem retas e retas paralelas conservam o seu paralelismo. Isto não se verifica quando a deformação é heterogênea.

A heterogeneidade das propriedades da rocha pode apresentar ou não um padrão estatístico. Caso se identifique este padrão as técnicas de geoestatística podem ser muito úteis. A geoestatística permite a análise da variação das propriedades da rocha em função da sua localização no espaço.

2.4 Isotropia e anisotropia

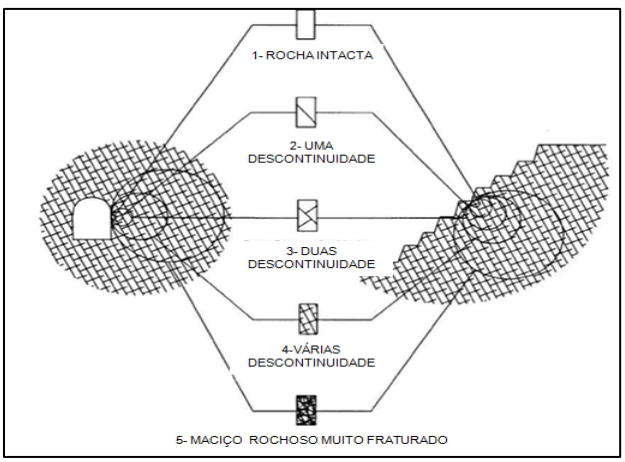
Uma rocha e dita isotrópica se, em qualquer direção analisada, suas propriedades não apresentam variação significativa. Caso se verifique a variação da

propriedade com a direção da rocha e dita anisotrópica. A característica de anisotropia está presente nas rochas principalmente por causa da orientação preferencial da sua estrutura ou microestrutura, ou pela presença de planos de acamamento, ou planos de clivagem. Algumas rochas, com alguns granitos, apesar de não aparentar claramente uma anisotropia, podem possuir um considerável grau de anisotropia em suas propriedades de deformabilidade. Nestas rochas, a resistência à compressão uniaxial pode variar de 5 a 10 vezes, em função da direção das tensões de carregamento (BROWN, 1995).

2.5 Meio continuo ou descontinuidades

Os maciços rochosos apresentam descontinuidades que vão de escalas macro a microscópicas e até escalas quilométricas. A hipótese de considerar o maciço rochoso como um meio continuo ou como um meio descontinuo (fraturado) depende da relação entre as dimensões da obra e a espaçamento entre as descontinuidades. Uma ilustração disso para um problema mecânico é ilustrado na figura 2, onde pode ser observado que se a obra tiver dimensões representadas pela situação 1, onde o espaçamento entre as descontinuidades e maior que a dimensão de interesse, o maciço pode ser considerado continuo. Caso a obra tenha dimensões como as das situações 4 ou 5 pode-se trabalhar em termos de um "continue equivalente". Em situações intermediarias a consideração das descontinuidades individualmente é interessante ou impreterível.

Figura 2 - Dimensão da obra em relação ao espaçamento das descontinuidades



(HOEK et al., 1995).

2.6 Efeito escala

Uma das principais peculiaridades no estudo de maciço rochoso e o fato de que em muitos casos as propriedades medidas dependem da escala em que o ensaio e realizado, o chamado efeito escala. Quanto à resistência, por exemplo, invariavelmente quanto maior o tamanho da amostra menor será a resistência obtida, este inconveniente exige a realização de ensaios no laboratório e no campo, em diferentes escalas, e o desenvolvimento de modelos para sua interpretação e previsão do comportamento do maciço. A presença de descontinuidades e a variabilidade espacial são as principais causas do efeito escala em rocha.

2.7 Tensão e deformação

Na engenharia geotécnica clássica distinguiam-se os problemas de deformabilidade e problemas de estabilidade, os primeiros eram tratados através da elasticidade linear e os seguintes pela teoria da plasticidade (TERZAGHI, 1946). Assim a análise dos problemas era realizada considerando a relação tensão versus deformação do material elástico linear ou rígido plástico. Em parte, está divisão era definida pela limitação de ferramentas disponíveis na época. Atualmente com os programas computacionais é possível solucionar problemas com a consideração de relações constitutivas mais realísticas.

2.8 Presença da água

A água pode afetar o desempenho mecânico das rochas em duas formas distintas. O primeiro efeito refere-se à ação da água como agentes intempéricos, reduzindo a resistência e aumentando a deformabilidade. O segundo efeito refere-se à aplicação do princípio das tensões efetivas de Terzaghi. Segundo Brown (1995) evidencia experimental e argumentos teóricos sugerem que, para uma grande variedade de propriedade de materiais e condições de ensaio, a resposta da rocha depende não das tensões totais ou tensões aplicadas o $\sigma_{ij,}$ mas das tensões efetivas:

$$\sigma_{IJ=}\sigma_{IJ} - \alpha u \delta_{ij} \qquad (1)$$

Onde u é a pressão neutra (ou pressão de água nas descontinuidades), δ_{ij} é o delta de Kronecker (δ_{ij} = 1, quando i = j, δ_{ij} = 0, quando i ≠ j) e $\sigma \leq 1$ é uma constante para um dado caso. Para rochas altamente porosas como um arenito, o valor de α se aproxima da unidade, este é o valor para solos e descontinuidades. Para rochas com porosidade muito baixa, o valor de α se reduz consideravelmente abaixo da unidade. Seguramente a pressão da água nos poros ou nas juntas reduz a tensão efetiva e por consequência a resistência ao cisalhamento.

2.9 Alteração e alterabilidade

Alteração é a uma mudança física ou química da rocha por reações com o ar ou soluções aquosas. A alterabilidade e o potencial que uma rocha tem de se alterar. Trata-se de um processo análogo à corrosão comum em outros materiais de engenharia, A alteração pode afetar as características mecânicas da rocha intacta. Um material que possuía boas qualidades de resposta mecânica em subsuperficie pode tornar-se totalmente inadequado após algum tempo de exposição às condições atmosféricas ou de percolação de água. É importante, portanto, conhecer o comportamento de maciços rochosos, não só na sua condição in situ, mas também após algum tempo expostos as novas condições de trabalho.

3 TÉCNICAS DE PROSPECÇÃO

A fase de prospecção é, em termos de técnicas, de planificação e de localização, é consequência dos estudos e análises da fase de reconhecimento preliminares e consulta de elementos como a caracterização geológica à escala regional, interpretação foto geológica cartografia geológica de superfície e o estudo hidro geológico.

Os principais alvos da prospecção geotécnica e os métodos aplicados na sua detecção são: litologia (geofísica, sondagens) descontinuidades (geofísica, sondagens, ensaios em laboratório), propriedades mecânicas do maciço (sondagens (ensaios *in situ*), ensaios em laboratório) sendo possível observar a constante presença das sondagens e ensaios associados, revelando-se como o método mais interveniente na prospecção geotécnica.

Além da descrição das descontinuidades observadas nos afloramentos outros trabalhos são realizados para a caracterização do maciço rochoso. Podem ser abertos poços e valas para vistoria do maciço e consequente a obtenção de novos afloramentos. Dependendo das dimensões da obra, galerias subterrâneas podem também ser abertas.

Na caracterização e classificação de maciço rochoso as técnicas de prospecção se dividem em dois ensaios os diretos e indiretos.

Os ensaios diretos implicam em se obter amostras de material do maciço, para parti-la destas amostrar se realizar algum tipo de estudo como: Poços e trincheiras, sondagens à trado, sondagens à percussão, sondagens rotativas de recuperação, ensaio de palheta (*VANE TEST*), ensaios de perda de água sob pressão, ensaio tri axial, ensaio Brasileiro (tração), ensaio de resistência à compressão uniaxial.

O ensaio indireto usa meios indiretos para a delimitação e caracterização da unidade geológica ou material de estudo, bem como para obter propriedades referenciais, esses ensaios são: Interpretação de Imagens, métodos geofísicos (Métodos Sísmicos, Métodos Geoelétricos e perfilagem acústica).

As técnicas de prospecção de ensaios diretos mais usados com melhores resultados para caracterização e classificação do maciço rochoso, e sua utilização são os métodos de sondagens mecânica (ensaios diretos) e geofísica (ensaios indiretos).

3.1 Prospecções por sondagem mecânica (ensaios diretos)

Para compreender o comportamento dos maciços rochosos, são necessárias informações por meio de sondagens (amostragens e ensaios) que possibilitem a identificação dos diferentes tipos de rochas e suas características mineralógicas, estruturais, de resistência mecânica e de permeabilidade.

Em mineração é uma prática muito comum utilizar sondagens rotativas para definir corpos do mineral a profundidades variadas. Para poder caracterizar os testemunhos de rocha aproveitando as sondagens minerais com fins geotécnicos.

A sondagem rotativa é o método mais utilizado destinado à perfuração de maciços rochosos e obtenção de amostras de materiais rochosos com formato cilíndrico, chamado de testemunho, obedecendo aos padrões *Diamond Core Drill Manufacturers Association* (DCDMA). Esta técnica possui grandes vantagens, uma vez que liga diretamente com o local de execução da obra, possibilitando ainda a realização de ensaios no local e a recolhimento de amostras para ensaios posteriores. As desvantagens que se tratar de uma amostragem pontual, necessitando de interpretação cuidadosa na elaboração dos perfis geológico-geotécnicos.

A qualidade exigida da amostragem deve representar o maciço natural investigado, permitindo a obtenção das informações geológicas e geotécnicas essenciais para a classificação e caracterização dos maciços rochosos.

O Índice universalmente aceito na quantificação da chamada compartimentação dos maciços rochosos, sendo útil também para estimar os tamanhos de bloco o RQD (*Rock Quality Designation*), é um dos principais parâmetros para a classificação de Bieniawski ou sistema RMR (Rock Mass Rating) e o sistema Q de Barton, ele é definido a partir de testemunhos de sondagens realizados com recuperação continua de amostra. O índice RQD será apresentado nos capítulos seguintes.

A preocupação fundamental na execução de sondagens é a obtenção de testemunhos representativos de todas as camadas e descontinuidades atravessadas.

A amostragem deverá ser contínua e total, mesmo em materiais incoerentes ou muito fraturados, permitindo a obtenção das informações geológicas de interesse a caracterização e classificação do maciço. Os testemunhos não deverão se

apresentar fraturados ou roletados pela ação mecânica do equipamento de sondagem.

São empregados dois métodos operacionais, de acordo com as condições geológicas e estratigráficas encontradas o convencional e o “*Wire Line*”.

3.1.1 Método Convencional

Consiste na utilização de uma composição formada por coroa diamantada, calibrador ou luva, barrilete amostrador, hastes e demais acessórios. A cada coleta de amostra é necessária à retirada de todo o ferramental do interior do furo. É indicado para obter grandes volumes de material geológico, através de testemunhos de diâmetro variando de 92,80mm.

Figura 3 - Sonda de perfuração profunda método convencional.

Fonte: Do autor

3.1.2 Método *Wire Line.*

É um método de sondagem rotativa que, com vantagens produtivas comparativamente a sondagem convencional. Após cada manobra de corte do testemunho, somente o tubo interno do barrilete é alçado à superfície, por meio de cabo de aço tracionado por guincho, passando por dentro das hastes de perfuração. Neste sistema, não há necessidade da retirada do hasteamento do interior do furo, exceto para a troca de coroa ou verificação da composição de perfuração.

É uma sondagem altamente produtiva e segura, sendo indicados para execução furos profundos, podendo ser levada até extensões de 3.000 metros com testemunhagem contínua.

Figura 4 - Sonda de perfuração profunda método Wire Line.

Fonte: Do autor

A recuperação de testemunhos de sondagem rotativa pode fornecer importantes informações sobre as descontinuidades. Uma perfuração planejada e executada cuidadosamente, com obtenção de testemunho, seguida de uma descrição detalhada e da inspeção do furo, fornece informações aproximadas os parâmetros sugeridos pela ISRM para descrição das descontinuidades.

3.2 Prospecção por geofísica (ensaios indiretos)

A prospecção geofísica utiliza técnicas indiretas e interpretativas na detecção das anomalias verificadas nos maciços, existindo diversos métodos utilizados em geotecnia, com destaque para os métodos sísmicos, elétricos e eletromagnéticos e, esporadicamente, a gravimetria e a magnetometria (para detectar cavidades). Consoante o problema a investigar, assim se aplicam os métodos mais adequados, existindo a necessidade de avaliar as vantagens e as limitações de cada técnica e, assim, planejar o seu correto emprego em cada zona (WAHLSTROM, 1973).

Segundo Orellana (1972) geofísica é a “ciência que se ocupa do estudo das estruturas do interior da Terra e da localização de materiais delimitados pelos contrastes de alguma de suas propriedades físicas com as do meio circundante,

usando, para esta finalidade, medidas tomadas na superfície da terra ou da água, no interior de furos de sondagens ou em levantamentos aéreos".

Por propriedades físicas dos materiais entende-se, velocidade de propagação de ondas elásticas, resistividade elétrica, densidade, potencial elétrico natural, cargabilidade, suscetibilidade magnética, entre outras. Ao detectarem os contrastes entre as propriedades físicas dos materiais que compõem a crosta terrestre, os métodos geofísicos possibilitam a avaliação qualitativa, e em muitos casos, quantitativa, da natureza dos terrenos investigados. Dos parâmetros definidos, destacam-se: o grau de alteração, a presença de estruturas geológicas, a espessura da diferenciação magmática, a identificação de contatos geológicos, dentre outros, características estas são fundamentais para caracterização e classificação do maciço rochoso.

Um dos métodos mais clássicos utilizados na investigação do ambiente terrestre é a sísmica. Este método geofísico lida com a propagação das ondas elásticas nos materiais geológicos, característica que tem correlação direta com algumas propriedades físicas dos materiais, tais como, grau de consolidação, cimentação, alteração, compactação, saturação do maciço, entre outros. Desta forma, a sísmica produz informações que podem ser integradas com dados de sondagens mecânicas (rotativa) contribuindo efetivamente para a caracterização geológica e geotécnica dos maciços rochosos.

Dentre os métodos sísmicos, destaca-se a sísmica de refração, que vem sendo amplamente empregada há alguns anos na geologia de engenharia. Por se tratar de um método que determina, com relativa precisão, as velocidades de propagação das ondas sísmicas nos materiais, tem efetiva aplicação no estudo na avaliação da qualidade de maciços rochosos (SJOGREN *et al*.,1979).

A sísmica de refração, portanto, tem ampla aplicação em estudos preliminares de implantação de grandes obras na mineração, como barragens, taludes e túneis.

Os métodos geofísicos elétricos compreendem um vasto conjunto de técnicas, destacando-se, como principais na aplicação a túneis, as que avaliam a resistividade aparente dos terrenos. Segundo Wahlstrom (1973) e Galera Fernández (1997), estes métodos de resistividade possuem um alcance médio de cerca de 100m, sendo especialmente adequados na detecção de aspectos importantes na caracterização do maciço rochoso, como sejam as falhas e a posição dos níveis freáticos ao longo do traçado do túnel.

Os métodos eletromagnéticos têm o mesmo campo de aplicação dos métodos elétricos, podendo utilizar georradares para a obtenção de perfis de reflexão de ondas eletromagnéticas, possuindo um alcance que varia entre 35 e 100 m.

Os métodos sísmicos, elétricos e eletromagnéticos, podem ainda ser realizados no interior de furos de sondagem, os métodos e técnicas aplicáveis são a transmissão sísmica ascendente (*uphole shooting*), transmissão sísmica descendente (*downhole shooting*), transmissão sísmica entre furos (*crossohole transmission*) e perfilagem acústica (*acousting borehole logging*).

3.2.1 Transmissão sísmica ascendente (*uphole shooting*)

Esse ensaio permite a obtenção de zoneamento do maciço, principalmente espessura de zonas alteradas. Nesse método, a fonte de ondas sísmica (espoleta, por exemplo) é fixada a várias profundidades no furo de sondagem (não revestido), enquanto os geofones, que captam as ondas, estão situados na superfície do terreno. O gráfico tempo distancia (tempo de percurso das ondas e a distância percorrida) permitem calcular a velocidade de transmissão de ondas sísmicas no local da sondagem e, com base no resultado obtido, é possível fazer interpretação das condições do maciço perfurado (ABGE, 2013).

3.2.2 Transmissão sísmica descendente (*downhole shooting*)

Este ensaio, ao contrário do anterior, mantém a fonte na superfície e os geofones em vários níveis dentro do furo de sondagem. As velocidades propagação são obtidas da mesma maneira que o anterior.

3.2.3 Transmissão sísmica entre furos (*crossohole transmission*)

Este ensaio permite localizar zonas de baixas velocidades, que não conseguem ser detectadas pelos ensaios sísmicos tradicionais, feito pela superfície. Permiti, ainda, a determinação de parâmetros elásticos dinâmicos do maciço rochoso como módulo de elasticidades, de rigidez ou de cisalhamento, módulo de

compressibilidade e coeficiente de Poisson. Esse parâmetro, importantes para projeto estrutural de obras, são obtidos a partir da determinação da velocidade das ondas longitudinais e transversais em um determinado material a uma mesma cota.

É utilizado dois ou mais furos de sondagens, sendo o primeiro reservado à fonte e os geofones dispostos nos demais furos, na mesma cota.

3.2.4 Perfilagem acústica (*acousting borehole logging*)

É recomendado para locais onde ocorre grande número de camadas pouco espessas, porém possuindo contrastes distintos de velocidade. Esta é uma situação de difícil caracterização nas investigações e nos ensaios sísmicos tradicionais. A perfilagem contínua permite determinar o tempo de percurso de uma onda sísmica em distância entre 0,5 e 3m (portanto, as velocidades), pela colocação de emissores e captadores de vibração dentro de um mesmo furo de sondagem, a diversas profundidades. A perfilagem encontrada é usada nos estudos de porosidade, fraturamento, mudanças litológicas e etc., a partir da medida de parâmetros físicos como resistividade, densidade e potencial espontâneo.

4 CARACTERIZAÇÕES DE MACIÇO ROCHOSO

A caracterização de um maciço rochoso tem por objetivo criar um modelo (tipo de rocha, espessura das camadas, características das descontinuidades, água subterrânea, comportamento das rochas, etc.) que represente o maciço com o detalhamento capaz de fornecer as informações necessárias para a execução de uma dada obra de engenharia.

Segundo a (ISRM,1978), um maciço rochoso é um meio constituído de blocos de rocha intacta (meio continua) separados fisicamente por descontinuidades (juntas (diaclases), falhas, dobras, estratificações, etc.), que podem conter ou não material de preenchimento, as propriedades mecânicas e hidráulicas do maciço serão governadas pelas propriedades da rocha intacta e também pelo número, posição, natureza e condições das descontinuidades.

Na elaboração de modelo busca-se identificar zonas estruturalmente homogêneas, isto é, regiões do maciço que tenham características e respostas mecânicas semelhantes. De um modo não rigoroso pode-se dizer que se busca encontrar regiões que possuam a mesma classificação geomecânica.

O processo de criação de um modelo (geométrico/estrutural/mecânico) para o maciço e realizado principalmente de forma indutiva, isto é, partindo de informações pontuais buscando estimar a composição geral do maciço, este trabalho de indução pode ter um acréscimo dedutivo com o auxílio de um modelo geológico tectônica da região.

Uma característica importante do levantamento de maciços rochosos é que os estudos de caracterização não se limitam a fase anterior à elaboração do projeto, durante a execução do projeto e até posteriormente a sua construção são realizados ensaios para levantar novas informações, confirmando ou não o comportamento previsto, sobre determinada ótica, a instrumentação da obra pode ser considerada um tipo de ensaio "em escala real".

As características do levantamento geológico dependem muito do tipo e importância da obra, do tempo da fase do projeto e do próprio maciço rochoso. O levantamento pode se desenvolver em:

a) Estudos preliminares (compilação de dados pré-existentes, análise de mapas geológicos, fotos aéreas, imagens de satélite, visitas a campo, etc.);

b) Estudos para projeto (sondagens, investigações geofísicas, galerias, valas, levantamento estrutural, etc.);

c) Estudos durante a construção (instrumentação, ensaios in situ, etc.).

A literatura mostra que quanto às rochas não há ainda nenhuma classificação universal, embora existam propostas de vários autores com muitos pontos semelhantes. Essa circunstância levou a que fossem criados respectivamente em 1972 e em 1975 dois grupos de trabalho, o primeiro no âmbito da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM) e o segundo da Associação Internacional de Geologia de Engenharia (IAEG), com a preocupação de estabelecerem sistemas de classificação que pudessem vir a ser aceito internacionalmente.

4.1 Classificações geológicas

As rochas, que parecem eternas e imutáveis ao observador comum são, na realidade, muitas vezes, produto de uma história complexa (ciclo das rochas). Elas se formam através de processos sedimentares, metamórficos ou ígneos, e adquirem, neste estágio, algumas características primárias (mineralogia, textura, estrutura). Estas características podem permanecer inalteradas por muito tempo ou sofrer mudanças radicais. Estas mudanças têm origens diversas como circulação de fluidos, que podem alterar a composição química das rochas por entrada ou saída de elementos, ou mesmo provocar a sua eliminação parcial por dissolução; metamorfismo que, por modificação de condições pressão e temperatura, leva a mudanças da mineralogia, erosão e alteração, que tendem a eliminar a rocha, movimentação relativa de massas rochosas que provocam modificações de estruturas, etc.

Quando se pretende fazer o estudo de um maciço rochoso se faz necessário saber descrever e entender as modificações estruturais, ou simplesmente a deformação que encontrasse imposta. Com tudo o estudo é caracterizado em maciços rochosos heterogêneos, anisótropos e descontínuos, e sua complexidade resulta da evolução geológica expressa em regiões estáveis e podendo ocorrer em regiões tectonicamente ativas (que são caracterizadas principalmente pela ocorrência de terremotos) resultando em domínios impostos pela a deformação

(strain) e à atuação de esforços (stress) (força por unidade de superfície numa direção determinada).

A deformação superficial, em condições de temperatura e pressão litostática baixas é marcada essencialmente pela ruptura frágil das rochas. Nestas condições, a deformação é quase exclusivamente representada pelas fraturas.

O termo fratura engloba todas as deformações acompanhadas de uma ruptura da rocha. A totalidade da deformação é concentrada ao longo de planos bem definidos da rocha, sendo ela não penetrativa. As condições crustais para o desenvolvimento de tal tipo de estrutura são geralmente superficiais, embora, em certas situações, elas possam aparecer em profundidades mais elevadas.

É possível estabelecer, em função dos movimentos ao longo do plano de ruptura, uma subdivisão entre os vários tipos de fraturas.

Fraturas sem movimento paralelo ao plano de ruptura são geralmente chamadas juntas. As juntas podem ser por sua vez, subdivididas em três grupos:

- Fraturas sem movimento nenhum.
- Fraturas com movimento de afastamento perpendicular ao plano de ruptura.
- Fraturas com movimento de aproximação perpendicular ao plano de ruptura.
- Fraturas com movimento paralelo ao plano de ruptura.

Estas fraturas são chamadas falhas. Elas podem ou não apresentar um movimento perpendicular ao plano de ruptura.

Quando dos estudos de geologia estrutural é aplicado, um conceito mais amplo é geralmente usado em vez de fraturamento, analisam-se as "descontinuidades" dos maciços rochosos, que, além das fraturas, englobam todos os planos de menor coesão das rochas (como, por exemplo, os planos de estratificação, de clivagem e certos planos de foliação). Nestes estudos aplicados, as descontinuidades existentes têm que ser observadas e descritas com o maior cuidado possível. Apesar de importantes, esses dados são insuficientes por si só para definir de maneira clara e objetiva o arranjo dos sistemas de fraturas de corpos rochosos e sua geometria.

Com esse objetivo em mente, o modelo estrutural deve apresentar os tipos de estruturas e idades relativas, por meio de estudos da geometria e cinemática dos maciços (MAGALHÃES; CELLA, 1998).

A avaliação das propriedades geotécnicas de um maciço rochoso inclui o conhecimento da composição litológica, seu estado de alteração, sua coerência (tenacidade) e determinação em campo da ocorrência e características das descontinuidades no maciço.

4.2 Composições litológicas

A composição litológica se refere ao tipo de rocha presente no maciço, sendo classificada por meio de conceitos da petrologia. A classificação litológica, ou petrográfica, quando aplicada em geologia de engenharia, deve se valer dos conceitos básicos da geologia, mas ao mesmo tempo deve ser simples e objetiva, sem a necessidade de nomenclaturas complexas, que dificultam os trabalhos práticos.

Para facilitar a classificação, a Comissão de Mapeamento de Geologia de Engenharia da International *Association for Engineering Geology and Environment* (IAEG, 1981) apresentou classificação baseada em um número limitado de “rochas tipo”. A classificação litológica nem sempre discrimina a variação real de uma rocha em determinado local, valendo-se assim da determinação adicional de variedades de um mesmo litotipo.

A identificação litológica é importante devido às relações entre conteúdo rochoso e as características do maciço, que condicionam o comportamento quanto ao seu uso em engenharia. Além disso, os dados permitem avaliar os campos de variação das propriedades físicas e mecânicas da rocha, porque determinado tipo de rocha poderá apresentar parâmetros mecânicos dentro de determinado campo de valores, diferentes de outro tipo litológico.

A caracterização litológica permite ainda avaliar a possibilidade de se extrapolar resultados de ensaios pontuais para o maciço como um todo.

4.3 Alteração

Alteração é a mudança física ou química da rocha por reações com o ar ou soluções aquosas. A alterabilidade é o potencial que uma rocha tem de se alterar. Os principais tipos de alteração que podem afetar as rochas são a alteração primária, que ocorre em ambientes endógenos, sobretudo dependentes de

fenômenos magmáticos, e a alteração intempérica, que se dá em função da ação de agentes predominantes nos ambientes exógenos, sob as diferentes condições de interação do conjunto atmosfera-hidrosfera-biosfera-geosfera. Trata-se de um processo análogo à corrosão comum em outros materiais de engenharia.

Essa importância é atribuída ao fato de os processos intempéricos (biológicos, físicos e químicos) provocarem diminuição da resistência mecânica, aumento da deformabilidade e modificação da permo porosidade das rochas. A alteração, frequentemente, também é chamada de decomposição, termo que incorpora o conceito de perda das propriedades geomecânica dos maciços rochosos. Um material que possuía boas qualidades de resposta mecânica em subsuperfície pode tornar-se totalmente inadequado após algum tempo de exposição às condições atmosféricas ou de percolação de água.

Existem muitas versões com a indicação e graus de alteração e os critérios para sua determinação. Entretanto, o número de estágios deve ser limitado para rocha sã, intacta ou praticamente intacta. Para avaliar o grau de alteração é utilizada tabelas nas quais são definidos os graus de alteração e os respectivos critérios para sua identificação.

Geralmente são elaborados quadros específicos para cada obra, em função das rochas existentes, e que indiretamente, referem se ao perfil de intemperismo. Exemplos de quadros de diversos autores, contendo de três a cinco graus, são mostrados no quadro 1.

Quadro 1 - Grau de alteração para gnaisses, migmatitos, granitos e granitoides.

(continua)

Grau	Designação	Características
A1	Praticamente Sã	Macroscopicamente, existem poucos indícios de alteração física ou química dos minerais. Minerais apresentam brilhos ou descoloração incipiente. A rocha quebra-se com dificuldade ao golpe do martelo. O fragmento possui bordas cortantes que resistem ao corte por lâminas de aço.
A2	Medianamente alterada	Minerais medianamente alterados, geralmente sem apresentar brilho. Cor da rocha original bastante mascarada pela alteração. A rocha quebra-se com relativa dificuldade ao golpe do martelo. O fragmento possui bordas cortantes que podem ser abatidas por lâminas de aço.
A3	Alterada	Minerais alterados. A rocha quebra-se com relativa facilidade ao golpe de martelo. Os fragmentos podem ser abatidos facilmente por lâmina de aço.

(conclusão)

Grau	Designação	Características
A4	Muito ou extremamente alterada	Minerais apresentam pulverulentos. O fragmento esmaga-se facilmente ao golpe do martelo. As bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos. A lâmina de aço provoca sulco acentuado na superfície do fragmento. Pode incluir solo de alteração.

Fonte: (TOGNON et al., 1985)

Quadro 2 - Grau de alteração.

Grau	Designação	Características
A1	Sã ou Praticamente	Alteração ausente ou incipiente.
A2	Medianamente alterada	Minerais medianamente alterados. Minerais geralmente não apresentam brilho. Materiais de alteração mascarando a cor da rocha original.
A3	Muito ou extremamente alterada	Minerais apresentam-se pulverulentos e totalmente sem brilho.

Fonte: (GUIDICINI et al., 1972).

Quadro 3 - Grau de alteração para basalto, metassedimentos e granito-gnaisse.

Grau	Designação	Características
A1	Sã	Alteração Ausente
A2	Pouco alterada	Apreciável oxidação das fraturas.
A3	Medianamente alterada	Matriz pouca alterada
A5	Decomposta	Solos com vestígio da estrutura original

Fonte: (CAMARGO et al., 1978).

Quadro 4 - Grau de alteração para basalto.

Grau	Designação	Características
A1	Sã (S)	Não apresenta vestígio de ter sofrido alteração físicas e químicas dos minerais principais.
A2	Pouco alterada	Apresenta sinais de alteração incipientes dos minerais primários; em geral é ligeiramente descolorida. Apresenta praticamente as mesmas propriedades físicas e mecânicas da rocha sã.
A3	Medianamente alterada	Apresenta-se com os minerais medianamente alterados; é bastante descolorida e suas propriedades físicas e mecânicas são inferiores ás da rocha pouco alterada, sendo, entretanto, uma rocha bastante resistente, quebrando-se com relativa dificuldade sob a ação do martelo. Quando pouco fraturada só pode ser escavada a fogo. É uma rocha adequada como fundação de obras de concreto.
A4	Muito alterada (MT)	Apresenta-se com os minerais muito alterados, ás vezes, pulverulentos e friáveis. Suas propriedades físicas e mecânicas são conceituadamente inferior ás da rocha medianamente alterada. Quebra-se facilmente com as mãos e é escavada a picareta.
A5	Extremamente alterada (EXT)	Rocha decomposta ou solo em que se mantêm ainda as estruturas da rocha original. Escavável a enxadão.

Fonte: (CAMARGO et al.,1978)

Quadro 5 - Grau de alteração de rocha.

(continua)

Grau	Designação	Características
A1 RS	Rocha Sã	Sã ou praticamente sã. / alteração mineralógica nula ou incipiente./ cor original intacta. Escavável a fogo, perfuração com rotativa.
A2 RAD	Rocha alterada dura	Alteração mineralógica perceptível./ cores esmaecidas e pequenas transformaçoes físico-químicas./ escavável a fogo, perfuração com rotativa.
A3 RAM	Rocha alterada mole	Alteração mineralógica acentuada / cores parcialmente modificadas e intensas transformações físico-químicas./ escavável a picareta ou escarificador, perfuração com trépano e lavagem.

(conclusão)

Grau	Designação	Características
A4 SA	Solo de alteração	Alteração mineralógica praticamente completa / cores totalmente modificadas e transformações físico-químicas./exceto nos minerais resistentes. /escavável a enxadão, perfuração a percussão. .

Fonte: (THEMAG, 2012).

É importante, portanto conhecer o comportamento de maciços rochosos, não só na sua condição in situ, mas também após algum tempo expostos as novas condições de trabalho.

O grau de alteração deve ser definido após ter sido feita a recuperação, junto com a classificação geológica, procedendo-se ao ajuste e a correlação entre estes parâmetros. Isso evita equívocos, como o de se anotar rocha sã para trechos com baixa recuperação onde o maciço está muito a extremamente alterado, e apenas amostras recuperadas é que estão sãs (ou praticamente sãs).

Usualmente, são considerados de três a cinco graus de alteração. A separação desses graus é feita a partir da definição tátil-visual dos graus extremos: rocha sã, que corresponde à ausência de alteração e máximo grau de resistência do tipo litológico; e rocha extremamente alterada, que corresponde ao máximo estágio de alteração da rocha e menor resistência mecânica. A justificativa para três graus é que eles são suficientes para correlacionar esse parâmetro com a resistência do maciço. A utilização de cinco graus inclui rochas extremamente alteradas.

Os graus de alteração são padronização para cada local e para cada tipo ou conjunto litológico, genética e mineralogicamente semelhante.

4.4 Coerência

Coerência é definida com base nas propriedades de tenacidade (resistência ao impacto do martelo de geólogo), dureza (resistência ao risco), friabilidade (esforço provocados por pressão dos dedos) e coesão das rochas. É determinado segundo as mesmas diretrizes mencionado para a alteração, após a doação de um dos quadros citadas (ou criação de uma nova) que melhor represente as condições encontradas.

Sugere-se a escolha de uma dessas quadros ou a montagem de outra específica, que possa representar, adequadamente, as condições geológicas encontradas.

Os quadros abaixo podem ser modelos a serem considerados na escolha de quadro de alteração e coerência.

Quadro 6 - Grau de coerência para rochas brandas.

Siglas	Denominação	Valores de C (g)	Características
C1	Coerente	< 0,1	Superfície riscável por ponta de aço. Sulco produzido normalmente mostra profundidade inferior a 1 mm. / quebra com dificuldade ao golpe de martelo produzindo poucos fragmentos de bordas
C2	Medianamente coerente	0,1 - 0,4	Superfície riscável por ponta de aço. Sulco produzido apresenta geralmente profundidades entre 1 e 2 mm/ quebra com relativa facilidade ao golpe de martelo, produzindo fragmentos com bordas quebradiças por pressão dos dedos.
C3	Pouco coerente	> 1,4	Superfície riscável durante o ensaio. Sulco produzido apresenta profundidades entre 2 e 4 mm/ quebra com muita facilidade ao golpe de martelo, produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente.
C4	Incoerente	0,4 - 1,5	Superfície riscável durante o ensaio. Sulco produzido apresenta profundidades entre 2 e 4 mm/ quebra com muita facilidade ao golpe de martelo, produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. .

Fonte: (SOARES, 1991).

Quadro 7 - Grau de coerência para rochas.

Siglas	Denominação	Características
C1	Coerente	Quebra com dificuldade ao golpe de martelo formando poucos fragmentos de bordas cortantes./ superfície dificilmente ou apenas levemente riscada por lâmina de aço. Característica mêcanicas elevadas.
C2	Medianamente coerente	Quebra com relativa dificuldade ao golpe de martelo em vários fragmentos com bordas que podem ser quebradas pela pressão dos dedos./a lâmina de aço provoca um sulco pouco acentuado na superfície do fragmento. Características mêcanicas boas
C3	Pouco coerente	Quebra facilmente ao golpe do martelo, produzindo muitos fragmentos que podem ser partidos manualmente./a lâmina de aço provoca uns sulcos profundos na superfície do fragmento. Características mecânicas baixas.
C4	Incoerente	Esfarela ao golpe do martelo e desagrega sob a pressão dos dedos. / pode ser cortado por lâminas de aço./ friável./ características mecânicas muito baixas. .

Fonte: (THEMAG, 2012)

Comumente o início da alteração resulta numa significada diminuição da resistência da rocha, em relação a rocha original, enquanto nos estágios mais avançados de alteração, esta tendência se atenua.

Os fatores de redução da resistência da rocha intacta (sã) devem ser visto como uma restrição, pois podem apresentar grande dispersão, sendo prudente uma verificação detalhada na área de estudo.

4.5 Caracteres das descontinuidades

O estudo das descontinuidades mostra-se de importância fundamental, pois estas estruturas condicionam o comportamento dos maciços rochosos, especialmente em relação à deformabilidade, resistência e permeabilidade, podendo controlar toda a estabilidade do meio rochoso.

Descontinuidade é o termo geral para qualquer quebra na continuidade mecânica do maciço rochoso que tenha nenhuma ou baixa resistência à tração. É um termo coletivo para a maioria dos tipos de descontinuidades, tais como planos de acamamento, planos de xistosidade, contatos, zonas de fraqueza, falhas, fraturas,

juntas etc. (ABGE/CBMR,1983) indica os parâmetros quantitativos para descrever as descontinuidades e os maciços rochosos.

A importância das descontinuidades na análise de estabilidade de obras em rocha é inquestionável. Para a obtenção dos dados das descontinuidades num detalhamento adequado deve-se realizar um mapeamento das mesmas, aliado a uma caracterização quantitativa de destas grandezas. Primeiramente, deve-se fazer uma análise preliminar do maciço através do estudo de mapas geológicos e fotos aéreas. Depois, uma análise mais detalhada deve ser feita através das formas geológicas e topográficas, sondagens e ensaios nas descontinuidades.

A orientação, locação, persistência, pressão d'água e resistência ao cisalhamento de descontinuidades críticas são dados essenciais para uso em análises de estabilidade de obras em rocha. Na fase de investigação preliminar, os dois últimos parâmetros podem provavelmente ser estimados com aceitável precisão a partir de uma cuidadosa descrição da natureza das descontinuidades. Feições como rugosidade, resistência das paredes, grau de intemperismo, tipo de material de preenchimento e sinais de percolação d'água são dados indiretos para esse problema de engenharia.

As características das descontinuidades devem ser tão precisamente estimadas quanto possível para que a previsão de comportamento do maciço rochoso seja confiável. Estas características possuem a propriedade de serem aleatórias e, portanto, é necessária a aplicação de métodos estatísticos e probabilísticos, mais do que determinísticos.

4.5.1 Grau de fraturamento do maciço rochoso

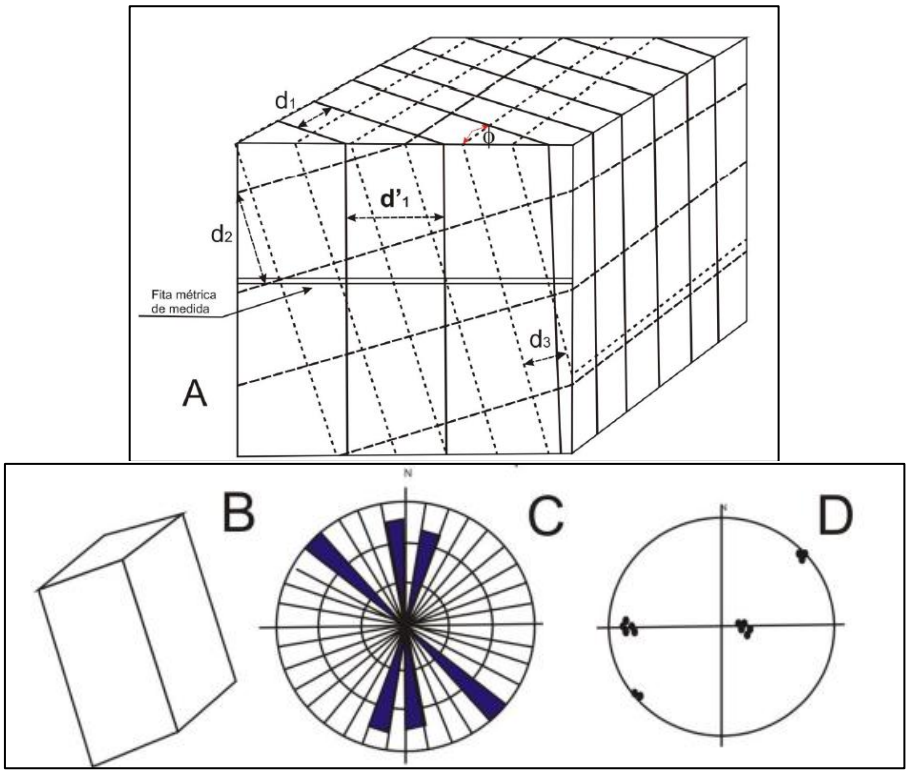
O grau de fraturamento está relacionado com a integridade física do maciço rochoso e o modo como este se deforma. De uma forma geral pode-se dizer que dois fatores principais afetam a intensidade de fraturamento de um maciço rochoso: o número de famílias de descontinuidades e o espaçamento entre elas.

Maciços rochosos com blocos de pequeno tamanho em relação ao tamanho total do maciço tendem a ser mais deformáveis do que aqueles com blocos grandes, bem como os maciços com um número maior de famílias tendem a ser mais deformáveis que aqueles com um número menor de famílias.

O tamanho dos blocos é estimado pelas dimensões dos blocos de rocha que resultam da orientação das famílias de descontinuidades que se interceptam e do espaçamento das famílias individuais conforme ilustrado na (Figura 5).

Descontinuidades individuais podem também influenciar o tamanho e a forma dos blocos. A combinação do tamanho do bloco com a resistência ao cisalhamento entre blocos determina o comportamento mecânico do maciço rochoso sobre dadas condições de tensão. Maciços rochosos compostos de grandes blocos tendem a ser menos deformáveis que aqueles compostos de pequenos blocos. Tamanhos pequenos de blocos podem indicar um modo potencial de escorregamento semelhante aqueles em solo (circular ou rotacional), em vez de translacional e tombamento de blocos, usualmente associados com maciços descontínuos.

Figura 5 - Representação esquemática de um sistema de 15 fraturas em um maciço rochoso. A) bloco diagrama com fraturas (a face frontal é a face exposta em uma galeria ou num talude). B) formato do bloco mínimo isolado pelo sistema de fraturas. C) diagrama de rosetas representando leituras estatisticas.



Fonte: Do autor

O maciço rochoso pode conter também descontinuidades individuais. O número de família afeta o comportamento mecânico do maciço rochoso uma vez que determina o quanto o maciço pode deformar sem provocar o fraturamento da rocha intacta.

Quanto à aparência do maciço, esta também é afetada porque o número de famílias determina o grau de sobre a escavação que tende a ocorrer com a escavação a fogo. O número de famílias de descontinuidades pode ser o fator dominante na estabilidade de obras em rocha, visto que, tradicionalmente, a orientação das descontinuidades em relação a uma face aberta é considerada de suma importância. Um grande número de famílias pouco espaçadas pode mudar o modo potencial de ruptura da obra, de translacional ou tombamento para rotacional ou circular.

4.5.2 Orientação espacial

As descontinuidades presentes nos corpos rochosos, distribuem-se espacialmente segundo orientações preferenciais, agrupando-se em famílias.

A orientação preferencial é uma consequência das tensões geológicas atuantes durante os vários eventos ou gerações de deformação, resultando na superposição no decorrer do tempo de várias feições. Os resultados desta superposição podem ser em certos casos extremamente complexos.

Um evento ou geração representa todas as feições deformacionais geradas de maneira sincrônica, num mesmo local (feições cogenéticas). Pode ser, por exemplo, uma falha e as juntas formadas na mesma época, um conjunto de falhas normais e de falhas de transferência, etc. A superposição de gerações pode ocorrer de diversas maneiras, pode ser uma deformação progressiva onde a soma de incrementos infinitesimais, pode ser polifásica onde representa uma sucessão descontínua de eventos ligada a modificações na cinemática da deformação ou policíclica onde feição topográfica, desaparece, deixando como registro apenas as feições deformacionais. Há importância de visualizar todas essas gerações ou eventos, pois essas informações geram incrementos para que se possa entender melhor a evolução das estruturas presente no maciço rochoso.

A orientação espacial de cada descontinuidade é expressa em termos de sua direção (definida pelo ângulo que a interseção do plano da descontinuidade, com o plano horizontal, faz com a direção norte) e pelo ângulo de mergulho (ângulo de inclinação do plano com o plano horizontal, sendo a reta do mergulho a reta de máxima inclinação no plano e perpendicular à direção).

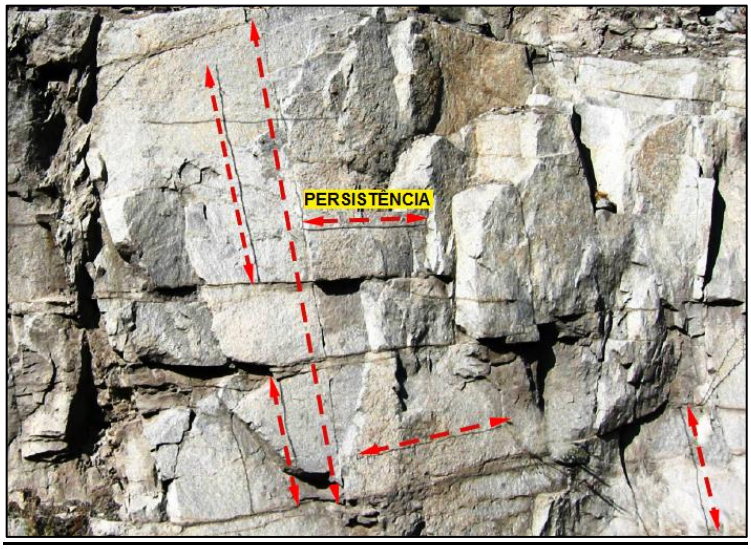
A orientação das descontinuidades e estudada usualmente através das chamadas projeções estereográficas. Uma vez projetadas, os dados podem ser analisados e comparados, e suas relações e características estruturais podem ser convencionalmente avaliados. A utilização do método de projeção esférica apresenta de melhor forma os dados geológicos (HOEK; BRAY, 1981), pois permite o estudo estatístico da distribuição dos dados por meio de métodos gráficos.

4.5.3 Persistência

Persistência é a continuidade de uma descontinuidade conforme observada em um afloramento. Pode ser uma medida aproximada de sua extensão em área ou comprimento de penetração da descontinuidade conforme ilustrado na (Figura 6).

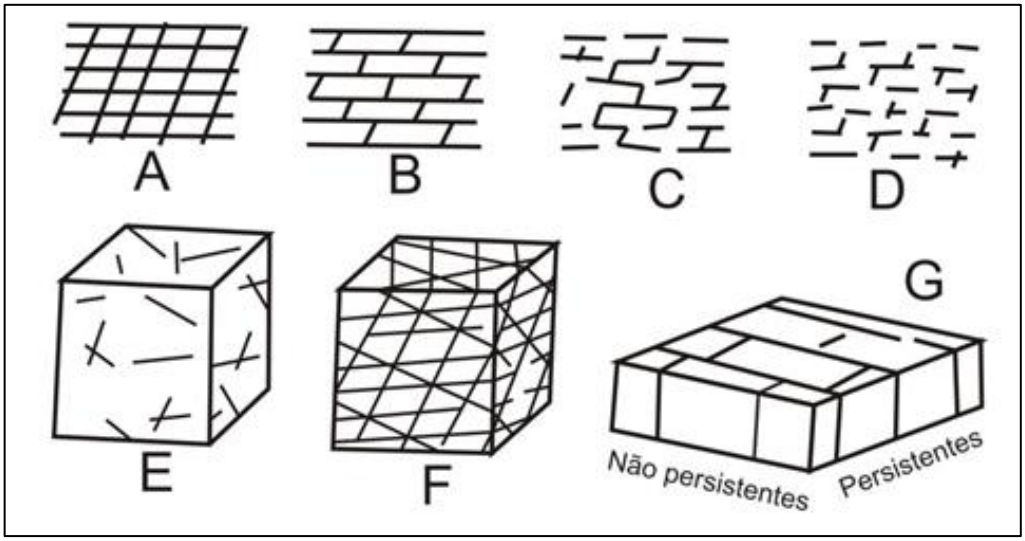
Se a descontinuidade acaba em rocha sã ou em outra descontinuidade então é denominada não persistente, uma descontinuidade cujas extremidades não se encontram nos afloramentos, ou na área de influência da obra, é denominada persistente. A região da rocha intacta compreendida entre os extremos de descontinuidades subsequentes é chamada de ponte rochosa. A persistência é considerada, para efeito de caracterização de descontinuidades, como um dos parâmetros de maior importância, em caso as descontinuidades, orienta das desfavoravelmente em relação à estabilidade de um talude, determinará a probabilidade de ruptura do maciço rochoso. Elas podem alterar substancialmente todas as propriedades chave do maciço (resistência, deformabilidade e permeabilidade), no entanto, devido principalmente à limitação visual dos afloramentos, e muito difícil visualizar e quantificar a não persistência de descontinuidades conforme ilustrado na (Figura 6).

Figura 6 - Tamanho de uma descontinuidade num maciço de Granito.



Fonte: Do autor

Figura 7 - Ilustração exemplificando a persistência de famílias de descontinuidades. A até D ilustram a diminuição da persistência de muito grande para muito pequena ao longo de uma face exposta para medida. E e F também ilustram a persistênciaprquena a muito pequena.



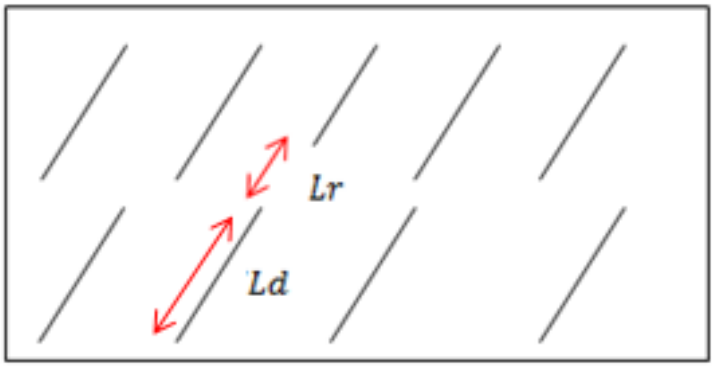
Fonte: Do autor

No entanto, há casos em que a não persistência de descontinuidades é notória e nesses casos e possível definir um grau de persistência utilizando, por exemplo, a equação abaixo. Considerando o traço das descontinuidades Ld, e o traço da ponte rochosa Lr, conforme ilustrado na figura 8, pode-se fazer uma definição bidimensional de persistência como:

$$k = \frac{Ld}{Ld+Lr} \qquad (2)$$

Assim, uma descontinuidade será não persistente se $k< 1$. Quando menor o índice k, maior será a contribuição da rocha intacta nas propriedades da descontinuidade.

Figura 8 - Representação bidimensional da persistência .



Fonte: (MULLER,1963).

Um exemplo prático desse procedimento foi feito por Muller em 1963, que analisando um maciço com descontinuidades não persistentes, definiu o "grau de desenvolvimento das descontinuidades", k, como sendo a razão entre o somatório das áreas descontinua e a área total.

$$k = \frac{\sum A\ descontinuidade}{\sum AT} \qquad (3)$$

Quando ocorrem as descontinuidades de caráter persistente são classificadas de acordo com a tabela abaixo.

Tabela 1 - Classificação da Persistência.

Termo	**Persistência (m)**
Persistência muito pequena	< 1
Persistência pequena	1 < 3
Persistência média	3 < 10
Persistência grande	10 < 20
Persistência muito grande	> 20

Fonte: (ISRM,1983)

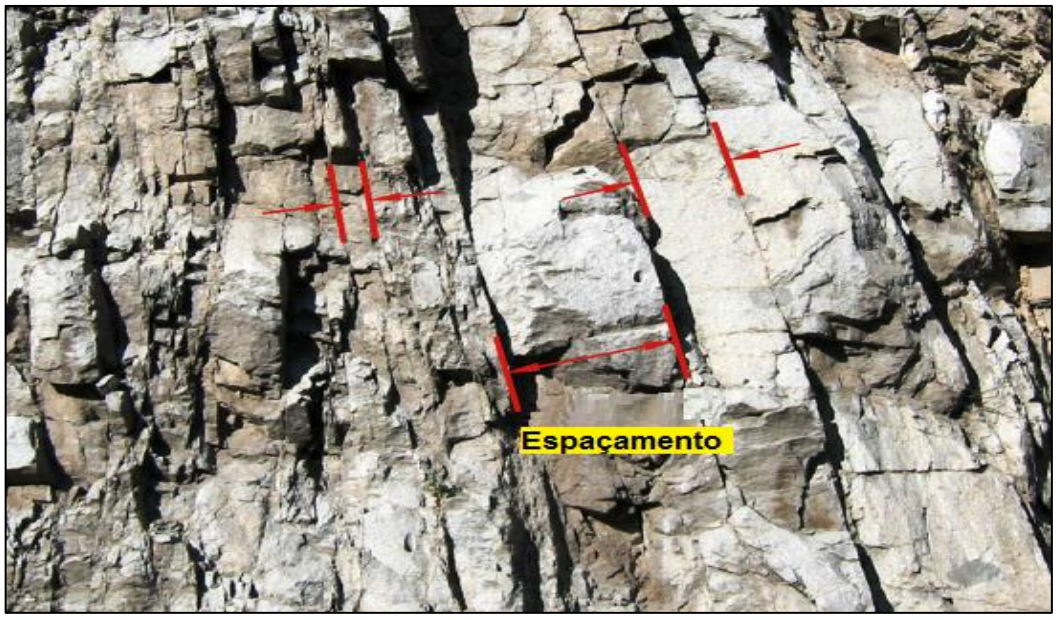
.

O objetivo numa avaliação é determinar a média do comprimento do traço das descontinuidades numa face. Há ainda o fato da ocorrência das descontinuidades muito pequenas, as quais são difíceis, senão impossíveis de medir. Como a caracterização geomecânica de maciços rochosos é o resultado final da descrição de vários afloramentos, taludes e/ou paredes de galerias, computar a persistência média de cada família de descontinuidade e indicar aquelas que mostram persistência maior do que as faces de exposições descritas são os procedimentos mais adequados a ser adotado.

4.5.4 Espaçamento

Um dos parâmetros mais importantes dentre os que influência o comportamento geomecânico e hidráulico dos maciços rochosos, é o espaçamento, ou frequência, onde procura exprimir a “quantidade” relativa de descontinuidades por unidade de medida, seja em comprimento, área ou volume conforme ilustrado na (Figura 9).

Figura 9 - Distância perpendicular entre as descontinuidades adjacente de espaçamento no maciço de Granito.



Fonte: Do autor

Quanto menor for o espaçamento entre as descontinuidades de um maciço, maiores serão as deformações e a permeabilidade. O espaçamento é determinado em termos da distância média perpendicular entre duas descontinuidades pertencentes à mesma família, sendo as distâncias tomadas geralmente ao longo de

linhas de varredura, como por exemplo, uma sondagem ou uma linha de levantamento sistemático de descontinuidades em afloramentos (BROWN,1981). O espaçamento pode ser expresso por intervalos de variação numérica. A tabela 9 contém critérios muito usuais, mas não únicos.

Tabela 2 - Classificação do espaçamento.

Termo	Espaçamento (cm)	Denominação
E1	>200	Muito afastadas
E2	60 E 200	Afastadas
E3	20 E 60	Medianamente afastadas
E4	6 A 20	Próxima
E5	< 6	Muito próximas

Fonte: (ISRM, 1983)

O espaçamento entre as descontinuidades adjacentes determina, em grande parte, o tamanho dos blocos de rocha intacta. Os espaçamentos menores tendem a determinar uma baixa coesão para o maciço rochoso, conferindo à rocha um comportamento mais próximo dos materiais granulares. Os maciços rochosos com espaçamentos maiores entre as descontinuidades, por outro lado, oferecem melhores condições de inter travamento das famílias de descontinuidades. A natureza aleatória do espaçamento faz com que esse parâmetro não seja definido por um valor, mas por uma série de valores. Assim, o espaçamento deve ser analisado estatisticamente.

Estes efeitos estão relacionados com a persistência das descontinuidades. A importância do espaçamento aumenta quando existem outras condições favoráveis para a deformação, tais como a baixa resistência ao cisalhamento e a presença de um número suficiente de descontinuidades orientadas favoravelmente para produzir o deslizamento. O mecanismo de deformação e de ruptura no maciço rochoso pode variar com a proporção do espaçamento entre as descontinuidades e o tamanho da escavação.

4.5.5 Rugosidade

Rugosidade é a combinação da aspereza (também chamada de ondulação de segunda ordem) e ondulação (primeira ordem) da superfície, relativas ao plano médio de uma descontinuidade. A aspereza e ondulação contribuem para a resistência ao cisalhamento. A ondulação em grande escala pode também modificar o mergulho local. A rugosidade das paredes de uma descontinuidade é uma característica potencialmente importante na sua resistência ao cisalhamento, especialmente nos casos de descontinuidades não preenchidas. A importância da rugosidade diminui à medida que a abertura, ou o material de preenchimento, aumenta.

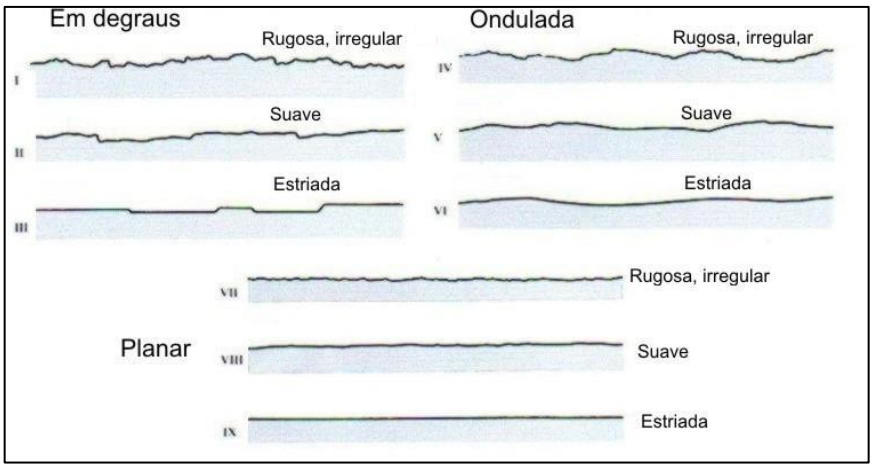
A rugosidade das paredes de uma descontinuidade pode ser caracterizada através das ondulações de primeira ordem, que estão relacionadas com o fenômeno de dilatância durante o cisalhamento e pelas de segunda ordem (aspereza), que tendem a ser rompidas durante o processo de cisalhamento. O quadro 8 e a figura 10 apresentam o sistema proposto para classificação da rugosidade de acordo com a Comissão (ISRM, 1978).

Quadro 8 - Parâmetros de rugosidade para classificação.

Classe	Descrição da rugosidade
I	Rugosa ou irregular, em degraus.
II	Suave em degraus
III	Estriada (slickensided), em degraus.
IV	Rugosa ou irregular, ondulada.
V	Suave, ondulada
VI	Estriada, ondulada
VII	Rugosa ou irregular planar
VIII	Suave, planar
IX	Estriada, planar

Fonte: (ISRM,1978)

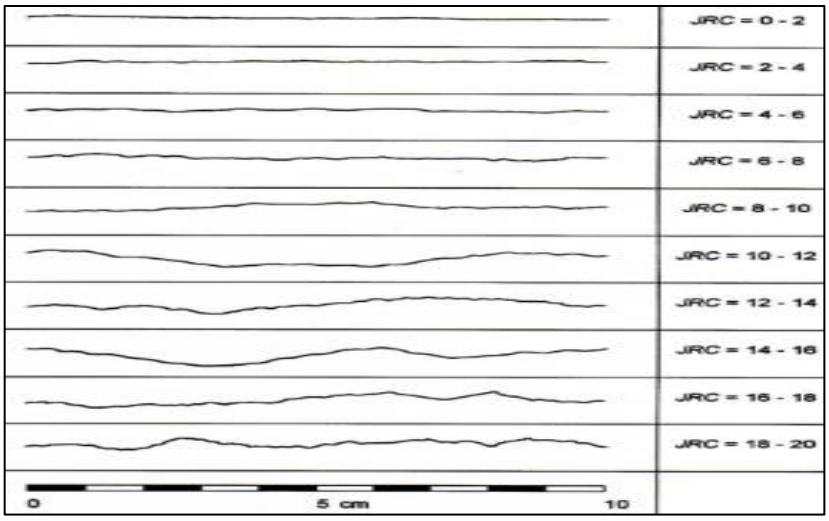
Figura 10 - Ilustração dos tipos de rugosidade segundo as classes.



Fonte: BARTON E CHOUBEY, 1977

A rugosidade, no entanto, também pode ser expressa por outros parâmetros, quantitativa e estimada. A rugosidade tem um papel fundamental na estimativa da resistência ao cisalhamento de um maciço rochoso. Nesse sentido, Barton e seus colaboradores publicaram uma série de artigos que tratam da estimativa de campo para a rugosidade; Barton e Choubey (1977) consolidaram um quadro de referência para a estimativa de um índice de rugosidade relacionado com fraturas (JRC, *joint roughness coefficient*). O coeficiente de rugosidade é um número que pode ser estimado pela comparação entre a aparência da superfície de descontinuidade e o perfil padrão publicado (Figura 11).

Figura 11 - Perfil padrão de rugosidade para a superfície das descontinuidades tipo fraturas, para estimar o coeficiente de rugosidade (JRC)



Fonte: BARTON; CHOUBEY, 1977.

Segundo Barton e Choubey (1978) a rugosidade das paredes da descontinuidade influência na resistência ao cisalhamento, o que é demonstrado através do parâmetro JRC presente na equação de resistência de descontinuidades, onde se observa que o ângulo de atrito de pico da descontinuidade é diretamente proporcional a rugosidade:

$$\phi_{(f)} = \mathrm{JRC}.\log\left(\frac{\mathrm{JCS}}{\sigma_n}\right) + \phi_r \qquad (4)$$

Onde:

$\phi_{(f)}$ = Ângulo de atrito de pico

JRC = Coeficiente de rugosidade da descontinuidade

JCS = Resistência à compressão das paredes da descontinuidade

ϕ_r = Ângulo de atrito residual ou básico

4.5.6 Resistência das paredes

Resistência das paredes é a resistência à compressão uniaxial das paredes adjacentes de uma descontinuidade, a qual deve ser menor que a da rocha intacta devido ao intemperismo ou alteração das paredes. O intemperismo afeta as paredes das descontinuidades mais do que o interior do maciço, de modo que a resistência da superfície de uma descontinuidade é sempre menor do que a obtida em testemunhos de sondagem. Uma descrição do estado de intemperização ou alteração, tanto para o material rochoso, quanto para as paredes da descontinuidade, é uma parte essencial da descrição da resistência das paredes (Quadro 11). Se as paredes estão em contato, têm uma importante componente de resistência ao cisalhamento. Na determinação da resistência das paredes podem ser utilizados os seguintes equipamentos: martelo de geólogo com ponta fina, estilete ou similar, esclerômetro de Schmidt ou ensaio de carga puntiforme. O uso do esclerômetro deve ser aliado a tabelas de conversão e gráficos para corrigir a orientação do esclerômetro e para converter o resultado em uma resistência uniaxial estimada (Figura 11). Também se deve medir a densidade (massa específica) seca de pequenas amostras de rocha.

Os resultados podem ser apresentados na forma de uma descrição dos graus de alteração registrados em esboços simplificados e/ou seções verticais, com a resistência das paredes rochosas das descontinuidades registrada junto com o assumido campo de variação da resistência à compressão uniaxial. Nos testes com o esclerômetro de *Schmidt*, a média dos resultados (r) deve ser anotada junto com a densidade média da rocha (γ) e o valor estimado da resistência da parede (JCS) estimado pela equação proposta por Barton e Choubey (1978), onde um grupo de 10 resultados deve ser selecionado para mostrar o campo típico de variação dos valores das respostas:

$$\log(\mathrm{JCS}) = 0{,}00088.\gamma_d.\mathrm{r} + 1{,}01 \qquad (5)$$

Onde:

JCS = Resistência à compressão das paredes da descontinuidade

γ_d = Peso específico seco (kN/m^3)

r = Valor obtido no esclerômetro

Quadro 9 - Classificação qualitativa do grau de alteração de descontinuidades .

(continua)

TERMO	DESCRIÇÃO	GRAU
Fresca	Nenhum sinal visível de material rochoso alterado: talvez leve descoloração nas principais superfícies da descontinuidade.	I
Levemente alterada	Descoloração indica alteração do material rochoso e das superfícies de descontinuidade. Todo o material pode estar descolorido pelo intemperismo e mais fraco externamente do em sua condição original	II
Moderadamente alterada	Menos da metade do material rochoso está decomposto e/ou desintegrado em solo. Rocha fresca ou descolorida estão presentes em uma estrutura contínua ou em pedaços	III
Altamente alterada	Mais da metade do material rochoso está decomposto e/ou desintegrado em solo. Rocha fresca ou descolorida está presente como uma estrutura descontínua ou em pedaços.	IV

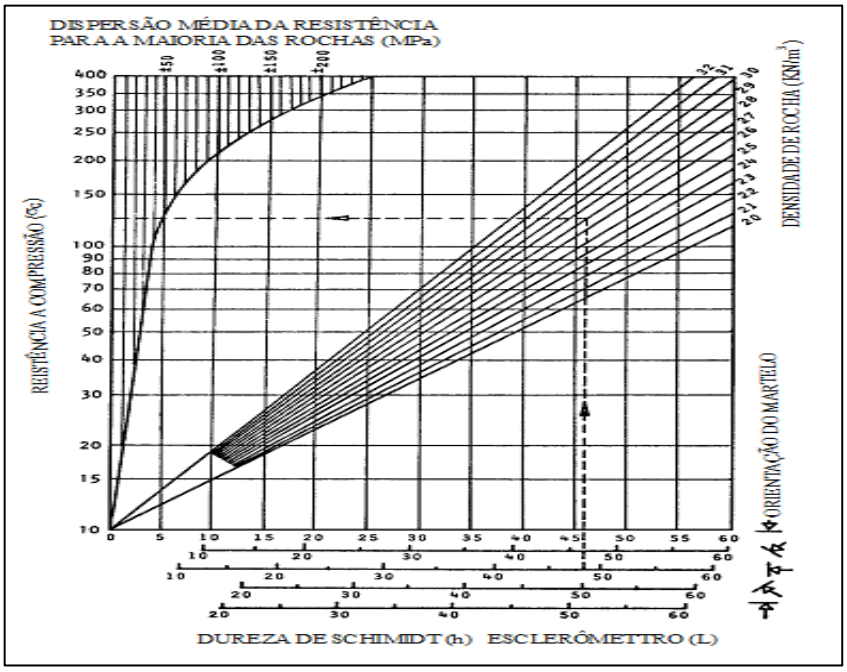
(conclusão)

TERMO	DESCRIÇÃO	GRAU
Completamente alterada	Todo material está decomposto e/ou desintegrado em solo. A estrutura original do maciço está intacta.	V
Solo residual	Todo o material rochoso foi convertido em solo e estrutura original destruída. Houve uma grande mudança no volume, mas o solo não foi significativamente transformado.	VI

Fonte: (ABGE/CBMR, 1983.)

Os valores que são pertinentes às paredes das descontinuidades, devem ser cuidadosamente distinguidos de valores que podem ter sido registrados por materiais, representando a rocha fresca da parte interna dos blocos de rocha.

Figura 12- Ábaco de correlação para obtenção da resistência a compressão através do esclerômetro de Schmidt e do peso específico da rocha.



Fonte: Modificado de (HOEK; BRAY, 1981).

Alternativa simples que pode ser utilizada tanto em campo como em laboratório é o ensaio de carga puntiforme (*Point Load Index*). Este ensaio é de custo baixo e pode ser realizado em amostras sem preparação prévia. A relação entre os resultados dos ensaios de compressão simples e de carga puntiforme é determinada pela seguinte equação:

$$c = C.\ Is \quad . \quad (6)$$

Onde:

c = Resistência à compressão simples

Is = Índice de resistência ao carregamento puntiforme

C = Constante que depende do diâmetro da amostra (Tabela 12).

Tabela 3 - Constante de correlação entre a resistência à compressão uniaxial e a carga puntiforme em função do diâmetro da amostra.

Diâmentro da amostra (mm)	Constante C
20	17,5
30	19.0
40	21,0
50	23,0
60	24,5

Fonte: (ABGE/CBMR, 1983.)

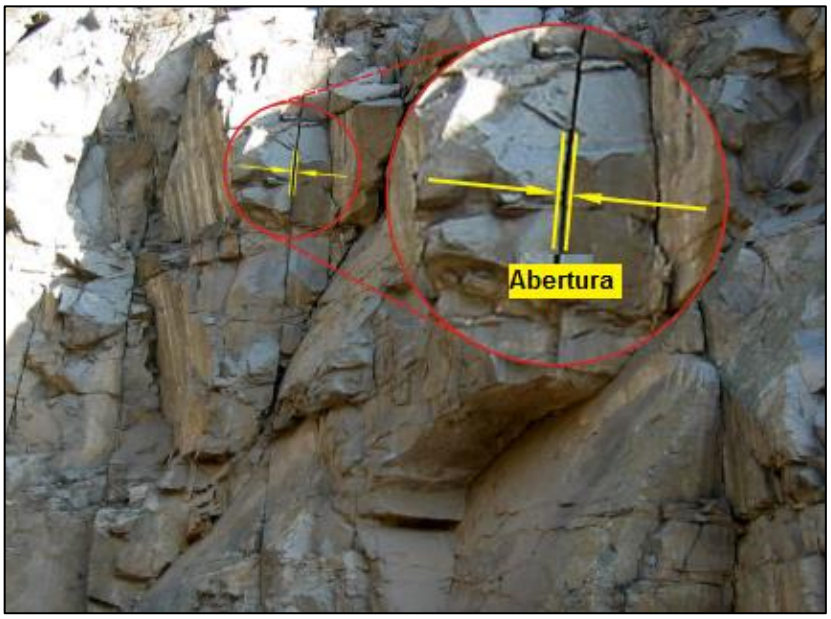
A validade do ensaio de carregamento puntiforme depende das condições dos pedaços fraturados da amostra. O ensaio pode ser aceito quando a fratura ocorre paralela aos pontos de aplicação da carga externa. Caso a fratura ocorra segundo outro plano, como ocorre, por exemplo, em amostras xistosas, ou ocorra esmagamento ou deformações excessivas, o ensaio deve ser rejeitado.

4.5.7 Abertura

Abertura é a distância que separa as paredes de rocha de uma descontinuidade aberta onde o espaço é preenchido por ar ou água. A abertura é desta forma, diferente da largura de uma descontinuidade preenchida. Descontinuidades que foram preenchidas, mas que tiveram seu preenchimento lavado localmente, também está incluído nesta categoria. Grandes aberturas podem ser resultantes de deslocamentos cisalhantes de descontinuidades com apreciável rugosidade e ondulação, de abertura por tração, de carreamento de materiais pela água e por dissolução. Descontinuidades verticais ou subverticais que foram abertas

por tração, como resultado da erosão d’água ou degelo, podem se apresentar com grandes dimensões.

Figura 13 - Representação de um maciço rochoso mostrando a abertura entre paredes adjacentes da descontinuidade no maciço de Granito.



Fonte: Do autor

Na determinação da abertura das descontinuidades são utilizados os seguintes equipamentos: trena de pelo menos 3 m de comprimento, subdividida em mm, lâminas padrões (para estimativa da largura de abertura estreitas), tinta spray branca (para facilitar a observação de descontinuidades finas) e equipamento para lavagem da rocha exposta.

As aberturas mais estreitas podem ser medidas com aproximação com as lâminas padrões, enquanto as aberturas maiores podem ser medidas com uma régua graduada. Podem-se usar também furos de sondagem ou testemunhos para determinar a abertura de descontinuidades mais profundas ou de difícil acesso. Na apresentação dos resultados deve-se seguir a terminologia apresentada no quadro 10.

Quadro 10. Abertura de descontinuidades.

Abertura	**Descrição**	**Feições**
< 0,1 mm	Bem fechada	Feições fechadas
0,1 - 0,25 mm	Fechada	
0,25 - 0,5 mm	Parcialmente aberta	
0,5 - 2,5 mm	Aberta	
2,5 - 10 mm	Moderadamente larga	Feições falhadas
10 mm	Larga	
1 - 10 cm	Muito larga	
10 - 100 cm	Extremamente larga	Feições abertas
> 1m	Cavernosa	

Fonte:(ABGE/CBMR, 1983).

A abertura tem grande influência nas propriedades ligadas à condutividade hidráulica do maciço rochoso.

4.5.8 Preenchimento

Preenchimento é o material que separa as paredes adjacentes de uma descontinuidade e que usualmente é mais fraco que a rocha que lhe deu origem. Os materiais típicos de preenchimento são: areia, silte, argila, brecha e milonito e outros. Também inclui filmes de minerais secundários e descontinuidades seladas, por exemplo, quartzo e veios de calcita. A distância perpendicular entre as paredes é chamada de espessura da descontinuidade preenchida, distinguindo-se da abertura de uma feição falhada ou aberta.

As características mecânicas dos diferentes materiais que formam o preenchimento afetam o comportamento das descontinuidades, particularmente quando se considera sua resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade. O comportamento físico depende principalmente dos seguintes fatores: mineralogia do material de preenchimento, tamanho das partículas, relação sobre adensamento, presença de água e permeabilidade, deslocamentos tangenciais prévios, rugosidade das paredes, largura e fraturamento ou esmagamento da parede de rocha. Deve-se fazer todo o possível para registrar tais fatores, usando-se descrições quantitativas, esboços e/ou fotografias.

No estudo do preenchimento deve-se usar uma fita métrica com pelo menos 3 m de comprimento, graduada em mm, para determinar sua espessura, sacos

plásticos para recolher material de preenchimento (1 ou 2 kg), martelo de geólogo com ponta delgada, estilete resistente ou similar, para fazer ensaios manuais no material de preenchimento e nos materiais rochosos (Quadros 11 e 12). Em alguns casos testemunhos não perturbados são necessários para ensaios de cisalhamento, onde tubos amostradores podem ser utilizados.

Quadro 11. Ensaios manuais para estimar a resistência ao cisalhamento não drenada de materiais de preenchimento coesivos .

Descrição		Identificação no campo	Valor Aproximado de σc (kPa)
S1	Argila muito mole	Facilmente penetrada algumas polegadas com o pulso	< 25
S2	Argila mole	Facilmente penetráveis algumas polegadas com o dedo poleg	25 – 50
S3	Argila firme	Podem ser penetráveis algumas polegadas com o dedo polegar com esforço moderado	50 – 100
S4	Argila rígida	Prontamente "amolgada" com o dedo polegar, porém penetrável somente com grande esforço.	100 – 250
S5	Argila muito rígida	Prontamente "recortada" com a unha	250 – 500
S6	Argila dura	"Recortada" com dificuldade com a unha	> 500

Fonte: (ABGE/CBMR, 1983).

Quadro 12. Ensaios manuais para estimar a resistência de materiais rochosos.

Descrição		Identificação no campo	Valor Aproximado de σc (MPa)
R0	Rocha extremamente fraca	Marcada com a unha	0,25 - 1,0
R1	Rocha muito fraca	Esmigalhada com golpes firmes com a ponta do martelo de geólogo e pode ser raspada com canivete	1,0 - 5,0
R2	Rocha fraca	Pode ser raspada com dificuldade com canivetes, marcas podem ser feitas com a ponta do martelo de geólogo	5,0 - 25
R3	Rocha medianamente resistente	Não pode ser raspada ou riscada com canivete, mas as amostras podem ser fraturadas com golpes de martelo de geólogo	25 - 50
R4	Rocha resistente	As amostras necessitam de mais que um golpe com martelo de geólogo para fraturar-se	50 - 100
R5	Rocha muito resistente	As amostras necessitam de muitos golpes com martelo de geólogo para fraturar-se	100 - 250
R6	Rocha extremamente resistente	As amostras podem somente ser lascadas com martelo de geólogo	< 250

Fonte: (ABGE/CBMR, 1983).

Os resultados podem ser apresentados de modo mais detalhado ou não, dependendo da importância conferida às descontinuidades individuais preenchidas (ou famílias). É sugerida a seguinte ordem para a apresentação dos resultados:

- Geometria (espessura, rugosidade das paredes, esboços de campo).
- Tipo de preenchimento (mineralogia, tamanho de partícula, grau de alteração, índices físicos do solo, expansibilidade potencial).

- Resistência do preenchimento (índices manuais, resistência ao cisalhamento, relação de sobre adensamento, deslocado / não deslocado).
- Percolação (presença de água e dados quantitativos da permeabilidade).

4.5.9 Percolação e fluxo de água em maciços rochosos

Percolação é o fluxo de água e umidade livre, visíveis em descontinuidades individuais ou no maciço rochoso como um todo. A percolação d'água nos maciços rochosos ocorre principalmente através de descontinuidades (permeabilidade secundária), mas em certas rochas sedimentares a permeabilidade primária do material pode ser significante. A permeabilidade secundária é muita afetada pelo espaçamento e pela abertura das descontinuidades existentes no maciço rochoso.

Problema de estabilidade pode ser previsto com a determinação do nível do lençol freático, do caminho preferencial de percolação e pressão d'água. A descrição de campo das características hidráulicas do maciço rochoso define os ensaios de permeabilidade in situ a serem realizados.

A equação proposta por *Snow* (1968) demonstra estes efeitos sobre a condutividade hidráulica de um sistema de descontinuidades:

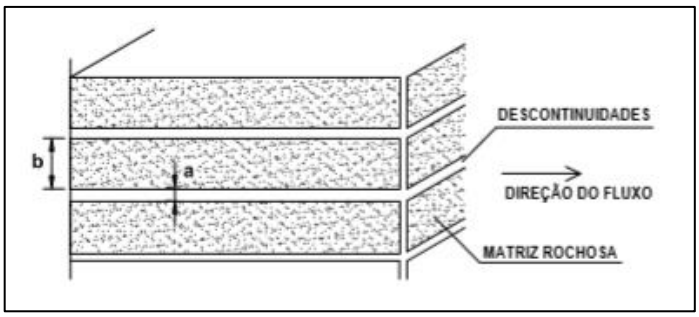
$$Km = a/b\ Kf + Kr \qquad (7)$$

Onde;
Km = Permeabilidade do maciço rochoso
a = Abertura das descontinuidades
b = Espaçamento das descontinuidades
Kf = Permeabilidade das descontinuidades
Kr = Permeabilidade da matriz rochosa

Onde; g a aceleração da gravidade, e v a viscosidade cinemática da água.

$$Kf = g.\ a^2/\ 12.v \qquad (8)$$

Figura 14. Parâmetros de análise de um meio fraturado.



Fonte: LOUIS, C. 1969.

Onde há transição solo rocha usa o ensaio de perda dados característicos dos ensaios são:

- Vazão absorvida
- Pressão efetiva utilizada
- Trecho do maciço submetido ao ensaio

A partir desses valores, é feito o cálculo da condutividade hidráulica, que pode ser expresso pela perda d'água específica PE, em L/min por m por kgf/cm²

A perda d'água específica é dada por:

$$PE = Q/LP \quad (9)$$

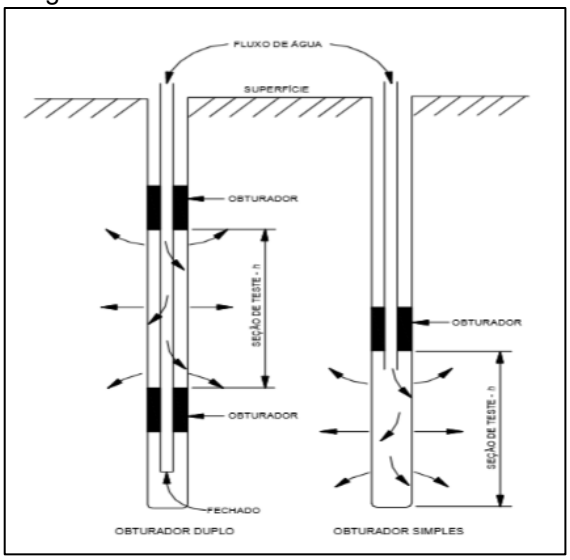
Onde:

Q = vazão em litros/minuto (L/min)

L = trecho ensaiado em metros (m)

P = pressão efetiva em kgf/cm²

Figura 15. Ensaio de perda d'água.



Fonte: ZEIGLER, 1976.

O ensaio de perda d’água consiste na injeção de água sob pressão em um trecho do furo de sondagem, selado por um ou mais obturadores, conforme a figura 8, e a medida da quantidade de água que se infiltra no maciço durante certo intervalo de tempo (OLIVEIRA, 1998).

Para a interpretação dos resultados são elaborados gráficos de Q x P, tentando determinar o regime de fluxo envolvido, fenômenos de lavagem ou colmatagem de fenda.

No caso de taludes rochosos, o projeto preliminar irá se basear em valores assumidos de tensão normal efetiva. Se, como resultado de observações de campo, concluir-se que é justificável assumir valores mais pessimistas para a pressão d´água (p. ex. fratura de tração cheia d’água, com pressão de saída nula no pé do talude) em uma descontinuidade desfavorável, isto implicará claramente em grandes consequências no projeto. A estabilidade de uma obra pode ser imensamente prejudicada pela existência de água em grande escala no maciço, em decorrência dos seguintes fatores:

- A pressão de água atuante reduz os esforços resistentes e ao mesmo tempo aumenta aqueles que tendem à ruptura.
- A existência de umidade aumenta o peso do material dificultando o seu transporte e aumentando os custos da operação.
- Em regiões onde a temperatura alcança valores negativos, há o risco do congelamento da água existente no maciço e sua consequente expansão. Tal efeito pode bloquear as fissuras de drenagem naturais, causando um acúmulo de água e pressão. A expansão de volume devido ao congelamento pode acelerar o processo de erosão nestas fissuras, criando planos de deslizamento.
- A presença de água pode erodir a superfície da obra e carrear material fino pelas fissuras existentes, podendo obstruir canais de drenagem naturais.
- A existência de lençóis freáticos aumenta os custos de operação, na medida em que a necessidade de drenagem aumenta.
- A ocorrência de fluxo ascendente pode acarretar a liquefação do solo.

Entre todos os fatores citados, o mais importante para a estabilidade da obra é a existência de pressão hidráulica nas descontinuidades do maciço. Existem duas possibilidades para a obtenção da distribuição de pressão hidráulica no maciço. A primeira é através do traçado das linhas de fluxo e equipotenciais a partir da

permeabilidade do maciço, da fonte de água e da geometria da obra. A segunda é a medição direta da pressão com o auxílio de piezômetros. Ambas alternativas apresentam dificuldades práticas, porém é essencial o conhecimento da distribuição de pressão hidráulica para a análise da estabilidade de obras em rocha.

5 CLASSIFICAÇÕES DE MACIÇOS ROCHOSOS

A natureza do maciço rochoso é muito complexa, portanto precisa-se de ferramentas teóricas que permitam analisar o controle de seu comportamento. Para resolver este problema se idealizam modelos teóricos que só conseguem analisar um determinado processo num tempo e espaço determinado, onde o bom senso e a experiência prática são partes importantes. Caso se possa contar com esta experiência passada (projeto e construção de uma escavação em condições similares às apresentadas), as decisões do projeto atual poderão ter certo grau de confiança. Por outro lado, quando não se tem essa experiência, uma alternativa está nos sistemas de classificação geomecânica, que permite relacionar a situação atual com as situações encontradas por outros, ou seja, as classificações geomecânica são uma forma sistemática de catalogar experiências obtidas em outros lugares e relacioná-las com a situação encontrada.

Os sistemas para classificação de maciços rochosos têm sido desenvolvidos desde Ritter (1879) primeiramente na tentativa de estabelecer um critério para a abertura de túneis, especificamente para a determinação do tipo de suporte necessário. Em mecânica das rochas, o primeiro sistema de classificação foi proposto há 70 anos para a abertura de túneis suportados por arcos metálicos (TERZAGHI, 1946).

Considerando as três principais abordagens; analítica, observacional e empírica, como são praticadas em mineração e na engenharia civil, atualmente as classificações são usadas associadas com métodos analíticos e computacionais. De fato, em muitos projetos de construção subterrânea e mineração, as classificações de maciços rochosos forneceram o único apoio sistemático ao projeto em outra forma aleatória de procedimento “tentativa e erro” (BIENIAWSKI, 1989).

As classificações de maciços rochosos têm sido aplicadas com sucesso em todo o mundo: nos Estados Unidos (DEERE *et al*., 1967; WICKHAM *et al*., 1972; BIENIAWSKI, 1976), no Canadá (FRANKLIN, 1970), na Europa Ocidental (PACHER *et al*., 1974; BARTON *et al*., 1974), na África do Sul (BIENIAWSKI, 1973; LAUBSCHER, 1977), Nova Zelândia, Japão, Índia, URSS, e na Polônia, A tabela abaixo mostra os principais sistemas de classificação de maciços rochosos.

Tabela 4. Principais sistemas de classificação de maciços rochosos.

(Continua)

Sistemas de classificação de Maciços rochosos	**Autor**	**País de origem**	**Áreas de aplicação**
Rock load	Terzaghi, 1946	USA	Túneis com suporte de Aço
Stand-up time	Lauffer, 1958	Austrália	Túneis
New Austrian Tunneling Method (NATM)	Pacher et al, 1964	Áustria	Túneis
Rock Quality Designation (RQD)	Deere et al, 1967	USA	Furos de sondagem, Túneis
Rock Structure Rating (RSR)	Wickham et al, 1972	USA	Túneis
Rock Mass Rating (RMR)	Bieniawski, 1973 (última Atualização 1989 – USA)	África do Sul	Túneis, minas, taludes, Fundações
Modified Rock Mass Rating (M-RMR)	Ünal e Özkan, 1990	Turquia	Mineração
Rock Mass Quality (Q)	Barton et al, 1974 (última Atualização 2002)	Noruega	Túneis, minas, fundações
Strength-Block size	Franklin, 1975	Canadá	Túneis

(Conclusão)

Sistemas de classificação de Maciços rochosos	**Autor**	**País de origem**	**Áreas de aplicação**
Basic Geotechnical Classification	ISRM, 1981	Internacional	Geral
Rock Mass Strength (RMS)	Stille et al, 1982	Suécia	Mineração de metais
Unified Rock Mass Classification System (URCS)	Williamson, 1984	USA	Geral
Weakening Coefficient System (WCS)	Singh, 1986	Índia	Mineração de carvão
Rock Mass Index (RMi)	Palmström, 1996	Suécia	Túneis
Geological Strength Index (GSI)	Hoek e Brown, 1997	Canadá	Todos os tipos de escavações subterrâneas

Fonte:(Bieniawski, 1989; Özkan; Ünal, 1996; Ulusay; Sönmez, 2002).

Nesse capítulo serão apresentadas as classificações mais aceitas e utilizadas na área de Mecânica das Rochas, sem desmerecer outras classificações que foram esquecidas ou não tiveram grande demanda de uso, mas que serviram como fundamento no processo de melhor compreensão do comportamento do maciço

rochoso para dar origem às classificações mais usadas. As classificações mais usadas são a de Deere (1967) como índice RQD, Bieniawski (1973, 1976 e 1989) com o índice RMR (Rock Mass Rating), Barton et al. (1974) com o índice de Qualidade de Rocha o Q e mais recentemente, Hoek (1997) propôs o sistema GSI (Geological Strength Index), simplesmente índice GSI, que tenta fundir os dois primeiros sistemas anteriores para fins de obtenção de parâmetros de deformabilidade e resistência do maciço rochoso.

Os sistemas de classificação foram propostos com os seguintes objetivos:

- Identificar os parâmetros mais significantes que influenciam o comportamento dos maciços rochosos.
- Setorizar o maciço em grupos de similar comportamento e qualidades.
- Fornecer as características básicas para o entendimento de cada setor ou classe de maciço.
- Relacionar as condições de um local com a experiência encontrada em outros locais.
- Derivar dados e diretrizes para obras em engenharia.
- Fornecer bases comuns para a comunicação entre engenheiros e geólogos.

Baseados em parâmetros quantitativos formulados na caracterização do maciço, esses sistemas seguem critérios específicos, relacionados com o objetivo propostos, tais como os métodos de escavação estimativa de sistema de contenção atuante etc. A utilização de uma classificação universal não é recomendável, sendo desejável estabelecer metodologia adequada a um conjunto de situações, como determinadas litologias, objetivo ou tipo de obras.

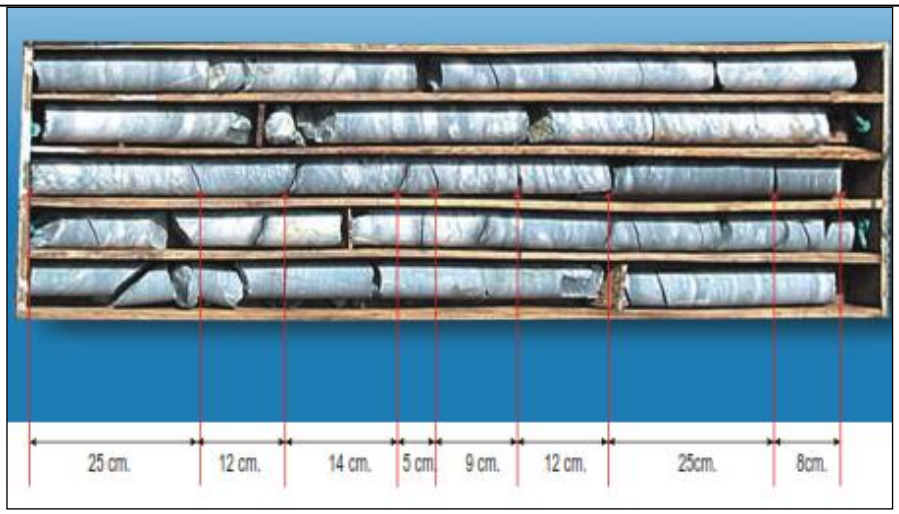
Deve-se considerar a origem do desenvolvimento dos diferentes sistemas de classificação para ter segurança na sua aplicação para diferentes problemas da engenharia.

5.1 Índice de qualidade de rocha (RQD).

O índice de designação da qualidade da rocha (*RQD*) foi introduzido há mais de 40 anos atrás em um momento em que as informações sobre a qualidade da rocha eram geralmente disponíveis somente a partir de descrições realizadas por

geólogos utilizando-se o percentual de recuperação das amostras de furos de sondagem (DEERE; DEERE, 1988). D. U. Deere desenvolveu esse índice em 1964, mas foi somente em 1967 que o conceito foi apresentado pela primeira vez em uma publicação (DEERE et al.,1967). Posteriormente, este índice se tornou um parâmetro importante das classificações geomecânica mais sofisticadas.

Figura 16. Processo para medir e calcular o *RQD*.



$$RQD = \frac{\Sigma \text{ comprimento de partes do corpo de prova} \geq 10 \text{ cm}}{\text{Comprimento total do corpo de prova}} \times 100\%$$

$$RQD = \frac{25 + 12 + 14 + 12 + 25}{110} \times 100\% = 80\%$$

Fonte: Modificado - BIENIAWSKI, 1989.

O *RQD* foi desenvolvido para fornecer um índice que fosse capaz de quantificar a qualidade do maciço rochoso por amostras de furos de sondagem. O índice é definido como a porcentagem de pedaços intactos com mais de 100 mm no comprimento total da amostragem. Os furos devem ter pelo menos 54,7 mm de diâmetro. O processo correto de medir o comprimento das partes do testemunho e o cálculo do *RQD* está ilustrado na figura 16. No quadro 13 é mostrada a relação entre o índice *RQD* e a qualidade da rocha no maciço.

Quadro 13. Relação entre o índice *RQD* e a qualidade da rocha para a engenharia.

RQD (%)	**Qualidade da Rocha**
< 25	A – Muito ruim
25 – 50	B – Ruim
50 – 75	C – Razoável
75 – 90	D – Bom
90-100	E - Excelente

Fonte: (DEERE, 1968).

O *RQD* é um parâmetro dependente da direção e seu valor pode alterar-se significativamente dependendo da orientação do furo. O uso da contagem volumétrica de juntas pode ser bastante útil na redução desta dependência direcional. Ele pretende representar a qualidade do maciço rochoso in situ. Quando é usado perfuratriz com broca de diamante, o cuidado deve ser tomado para assegurar que as fraturas que tenham sido geradas pelo manuseio ou pelo processo de perfuração, sejam identificadas e ignoradas na determinação do valor do índice. Ao se usar a relação de Palmström para o mapeamento de galerias, as fraturas induzidas por desmonte a fogo não devem ser incluídas na estimativa do Jv.

O *RQD* tem sido amplamente utilizado, particularmente na América do Norte, nos últimos anos. Deere (1970), Merritt (1972) e Deere e Deere (1988) tentaram relacionar o *RQD* com o “Fator de Carga de Rocha” de Terzaghi e com os tipos de suporte de rocha para túneis. No contexto dessa discussão, o uso mais importante do *RQD* é como um componente do *RMR* e da classificação *Q*.

É extremamente importante obter um valor de *RQD* de confiança, devido a ser um valor utilizado em várias classificações geomecânicas. Relações empíricas são muito úteis em regiões onde a topografia é muito irregular e íngreme.

A adaptação à prática brasileira do parâmetro *RQD* é chamado de IQR (Índice de Qualidade da Rocha), onde considera trecho de fraturamento homogêneo o mesmo escolhido para o grau de fraturamento, enquanto no *RQD*, é feito pelo o comprimento da manobra.

$$IQR = \sum_{i=1}^{i=n} Pi.\ 100\%\ /\text{N} \quad (10)$$

Onde:

P_i = Comprimento das peças ≥ 10 cm.

N = Comprimento do trecho de fraturamento homogêneo.

O IQR é um parâmetro que computa ao mesmo tempo o grau de fraturamento e a recuperação. Tem sido utilizado principalmente para a caracterização e a classificação de maciços rochosos frente ás solicitações de obras subterrâneas, taludes e fundações. É interessante a sua utilização considerando-se a possibilidade de correlação de valores de IQR com índices de resistência mecânica do maciço, como o módulo de deformabilidade.

A qualidade do maciço rochoso baseada nos valores de IQR está apresentada no quadro 14.

Quadro 14. Qualidade do maciço rochoso baseado em valores do IQR .

Qualidade do Maciço	**IQR (%)**	**Grau**
Exelente	90 a 100	Q1
Boa	75 a 89	Q2
Regular	50 a 74	Q3
Pobre	25 a 49	Q4
Muito Pobre	0 a 24	Q5

Fonte: (BARTON, et al.1974)

O IQR foi definido, originalmente, com base nos procedimentos válidos para o *RQD*, para diâmetros de sondagem de 76 mm e vedada a sua aplicação em maciços de avançados graus de alteração. Essas restrições podem ser cuidadas com a exigência de uma recuperação mínima de 75%. Abaixo deste valor, as determinações do grau de fraturamento e IQR são bastante contraditórias.

5.2 Sistema de classificação *RMR*

O sistema *Rock Mass Rating* (*RMR*), também conhecido como Classificação Geomecânica, foi desenvolvido por Bieniawski durante os anos de 1972-1973 e

1989. Nos últimos 35 anos, o sistema *RMR* tem resistido ao tempo e se beneficiou pela sua extensa aplicação por muitos autores em todo o mundo. Essa variedade de aplicações, totalizando mais de 351 casos históricos, aponta para a aceitação do sistema e sua facilidade inerente de uso e versatilidade na prática da engenharia envolvendo túneis, galerias, minas, taludes e fundações. No entanto, é importante que o sistema *RMR* seja usado para a finalidade na qual ele foi desenvolvido e não como resposta para todos os problemas de projeto.

Apesar de o sistema *RMR* ter sido modificado por várias vezes, é importante afirmar que o sistema tem permanecido essencialmente o mesmo em princípio. Assim, quaisquer modificações e extensões são fruto do mesmo método básico e não devem ser interpretadas como novos sistemas. Para evitar qualquer confusão, as seguintes extensões do sistema foram valiosas para novas aplicações, mas ainda fazendo parte do sistema *RMR* global: aplicações de mineração, Laubscher (1977,1984); rupturabilidade (*rippability*), Weaver (1975); mineração em rocha dura, Kendorski et al. (1983); mineração em carvão, Unal (1983), Newman e Bieniawski (1986); fundações de barragens, Serafim e Pereira (1983); tunelamento, Gonzalez de Vallejo (1983); estabilidade de taludes, Romana (1985); e mineração indiana em carvão, Venkateswarlu (1986).

Os seis parâmetros enumerados abaixo são utilizados para classificar o maciço rochoso usando o sistema RMR ou Classificação Geomecânica, são eles:

1. Resistência à compressão uniaxial da rocha;
2. Designação da Qualidade da Rocha (RQD);
3. Espaçamento entre as descontinuidades;
4. Condição das descontinuidades;
5. Condições da água subterrânea,
6. Orientação das descontinuidades em relação à escavação.

Tabela 5- Classificação geomecânica .

PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO COM SEUS PESOS									
Parâmetro			Faixa de valores						
1	Resistência da rocha intacta (Mpa)	Índice de carga puntiforme	>10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Para menores valores, recomenda-se ensaio (σ_c).		
		Resistência à compressão uniaxial	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1- 5	<1
	Peso		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Peso		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		>2 m	0,6-2 m	200-600 mm	60-200 mm	<60 mm		
	Peso		20	15	10	8	5		
4	Padrão das descontinuidades		Superfície muito rugosa, e sem alteração, fechada e sem persistência.	Superfície pouco rugosa e levemente alterada, abertura <1 mm.	Superfície pouco rugosa e muito alterada, abertura <1 mm.	Superfície estriada ou espessura de preenchimento <5 mm ou abertura persistente de 1-5 mm	Espessura de preenchimento com material argiloso >5 mm ou abertura persistente >5 mm.		
	(Ver tabela 6)								
	Peso		30	25	20	10	0		
5	Ação da água subterrânea	Vazão de infiltração por 10 m de túnel (l/m)	Nulo	<10	10 - 25	25-125	>125		
		(Pressão de água na junta) /σ_1	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		Condições gerais no maciço	Completamente seco	Úmido	Molhado	Gotejamento	Fluxo abundante		
	Peso		15	10	7	4	0		

Fonte: (BIENIAWSKI,1989)

Tabela 6- Classificação da condição das descontinuidades .

Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	2	0
Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
Peso	6	5	3	1	0

Fonte: (BIENIAWSKI,1989)

Tabela 7- Efeito da orientação das descontinuidades .

(continua)

Direção perpendicular ao eixo do túnel				**Direção paralela ao eixo do túnel**		
Abertura do túnel no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação		Inclinação Inclinação 45-90º	Inclinação 20-45º	Inclinação 0-20º
Inclinação 45-90º	Inclinação 20-45º	Inclinação 45-90º	Inclinação 20-45º			
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável

(conclusão)

Direção perpendicular ao eixo do túnel				**Direção paralela ao eixo do túnel**		
Orientação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fonte: (BIENIAWSKI,1989)

Na aplicação desta classificação, o maciço é dividido em regiões e cada uma classificada separadamente. Estas regiões são divididas por características estruturais maiores como falhas abertas, mudanças de tipo de rocha, mudanças grandes do espaçamento das descontinuidades. O sistema *RMR* é apresentado através de tabelas, que atribui pesos para os seis parâmetros acima listados. Estes valores são somados para obter o valor de *RMR* (máximo de 100 pontos).

A tabela 5 permite determinar os pesos relativos a cinco das características (1 a 5). O peso relativo à condição descontinuidades (4) pode ser determinado através da tabela 6 se houver uma descrição mais detalhada das juntas. Neste caso, o valor do peso é determinado através da soma dos cinco parâmetros característicos destas referidos nessa tabela. No caso de não haver valores disponíveis para utilizar esta tabela deverá ser escolhida a descrição da tabela 7 mais próxima da realidade.

5.2.1 Diretrizes para descrição do sistema (*RMR*)

Para cadastro dos parâmetros do *RMR* e dos ângulos das descontinuidades deverão ser utilizadas fichas que contenha locais para registrar as medições de recuperação, *RQD*, número de descontinuidades por avanço e ângulos dos mergulhos das descontinuidades em relação ao eixo dos testemunhos e também

para o registro das avaliações de resistência à compressão e das condições das descontinuidades.

As medições dos ângulos entre descontinuidades e eixos dos testemunhos, que não faz parte do sistema *RMR*, possibilitará a determinação do número de famílias de descontinuidades nos setores sondados e poderá ainda ser útil para estimativa das atitudes das famílias dominantes. Os quatro parâmetros iniciais do *RMR* deverão ser feitos tomando como base os intervalos definidos em cada manobra de sondagem. Quando duas litologias estiverem presentes em uma mesma manobra, as mesmas deverão ser individualizadas em seus intervalos específicos. Em manobras de sondagem com a presença de mais de duas litologias, ou com repetições entre duas litologias intercaladas, deve-se manter os intervalos originais das manobras e indicar na ficha de anotação as múltiplas litologias que estão presentes naquele intervalo. Nos intervalos em que os testemunhos houverem sido removidos para análise química (minério) ou para ensaios de compressão, não deverão ser feitas medições nos testemunhos porventura remanescentes, e a ocorrência de amostragem deverá ser anotada nas fichas.

É recomendável que os testemunhos dos trechos geotecnicamente descritos sejam fotografados e que os testemunhos dos respectivos furos sejam guardados até a aprovação do relatório final do estudo.

A seguir são apresentadas diretrizes básicas para medir, ou estimar, os cinco parâmetros que compõem o sistema *RMR* e para medir os ângulos entre planos de descontinuidades e eixos dos testemunhos de sondagem.

5.2.2 Diretrizes para estimativa da resistência à compressão

Um dos grandes problemas na geotécnia é estimar a resistência do maciço rochoso. As propriedades de resistência e deformação de um maciço rochoso são muito condicionadas pela existência de descontinuidades, ou seja, as propriedades mecânicas estão relacionadas com a qualidade do maciço rochoso. Em geral, um maciço rochoso de boa qualidade, terá uma maior resistência, que um maciço rochoso pobre.

Os blocos podem apresentar diferentes níveis de meteorização. Além disso, as superfícies de contato podem variar de limpo a coberta por vegetação. A

determinação de testes in situ por meio de testes de laboratório, geralmente, não é prático, por isso essa força deve ser estimada a partir de observações geológicas e de resultados de testes em blocos de rocha individuais (HOEK, et al., 2000).

A resistência do material rochoso na classificação *RMR* é determinada pelos valores da resistência à compressão uniaxial e pode recorrer-se aos valores da dureza de *Schmidt* (R) que são obtidos através da utilização do martelo de *Schmid*t, (tipo N) *in Situ.* (YAGIZ, 2009).

Na determinação das propriedades da rocha, quadro 15, é essencial a assistência prática para determinar a resistência dos materiais rochosos. Brown (1981). O grau de consistência, resistência e índices físicos é estimado com base na apreciação táctil-visual das características de resistência ao impacto, trabalhabilidade do material e estimativa da resistência à compressão simples, através de ensaios de martelo de *Schmidt* realizados em amostras típicas.

De acordo com o *ISRM*, o número de ensaios abordados para os ensaios são 10, obtendo-se a média desses valores.

Nas rochas meteorizadas não devem ser eliminados os valores baixos, devido a estes valores serem causados pela meteorização.

Para cada intervalo correspondente a manobra de sondagem ou litologia deverá ser marcada a categoria de resistência mostrada. Caso ocorram variações apreciáveis de resistência em um mesmo intervalo, poderão ser marcadas mais de uma classe de resistência.

Quadro 15- Estimativa de Resistência à Compressão de Rochas .

(continua)

Grau	Descrição da rocha	Identificação de campo	Resistência à compressão uniaxial (MPa)
R0	Extremamente fraca	Amostra da rocha pode ser marcada com a unha.	**0,25 - 1,0**
R1	Muito fraca	Amostra pode ser descascada usando canivete. Fragmenta totalmente quando golpeada com a ponta do martelo geológico.	**1,0 - 5,0**

(conclusão)

Grau	Descrição da rocha	Identificação de campo	Resistência à compressão uniaxial (MPa)
R2	Fraca	Amostra pode ser descascada com dificuldade usando um canivete. Marca rasa na rocha é produzida por golpe firme com a ponta de martelo	**5 – 25**
R3	Medianamente forte	Rocha não pode ser raspada ou descascada com uso de canivete. Amostra da rocha pode ser fraturada com um único golpe firme	**25 - 50**
R4	Forte	Para romper uma amostra da rocha é requerido mais de um golpe com martelo geológico.	**50 - 100**
R5	Muito forte	Para romper uma amostra da rocha são requeridos diversos golpes de martelo geológico.	**100 - 250**
R6	Extremamente forte	Golpes de martelo geológico removem apenas lascas da rocha, sem quebrá-la.	**> 250**

Fonte: Brown (1981).

O valor médio de R é posteriormente relacionado com o peso específico do material rochoso de acordo como foi abordado no capítulo caracterizações de maciço rochoso, o ábaco de correlação usa para obtenção da resistência a compressão através do esclerômetro de *Schmidt* e do peso específico da rocha para determiná-la a resistência à compressão, de modo a encontrar o valor da resistência à compressão uniaxial, em MPa, este último permite a definição do respectivo peso na classificação geomecânica de Bieniawski (1989).

5.2.3 Diretrizes para medição de *RQD*

Conforme o procedimento foi apresentado anteriormente, devem ser desprezadas as quebras nos testemunhos que puderem ser claramente identificadas como sendo provocadas pela operação de sondagem ou pela colocação dos testemunhos nas respectivas caixas. Para sondagens verticais, quando ocorre

fratura subverticais, se recomenda penalizar o trecho, descontando-se 10 cm da peça cortada pela fratura subvertical.

Além do *RQD* deverá ser medida a recuperação total, importante índice para discriminar alteração excessiva ou faturamento intenso do maciço rochoso.

5.2.4 Diretrizes para determinação do espaçamento médio entre descontinuidades.

Para a determinação do espaçamento médio entre descontinuidades devem ser contadas as fraturas naturais presentes nos testemunhos de sondagem em cada intervalo definido por manobra de sondagem ou por mudança de litologia.

Para o cálculo de espaçamento médio entre fraturas em metros, o comprimento de cada intervalo em metros será então dividido pelo respectivo número de fraturas.

Caso ocorram zonas de falha, com um número muito grande de fraturas, poderá simplesmente ser anotada nas fichas essa condição, e durante o tratamento dos dados será atribuída pontuação mínima ao parâmetro correspondente ao espaçamento médio entre fraturas.

5.2.5 Diretrizes para estimativa das condições das descontinuidades.

As condições das descontinuidades com respeito à resistência ao cisalhamento serão avaliadas de acordo com as cinco classes estipuladas no sistema RMR (tabela 5), com pontuações 30, 25, 20, 10 e 0.

Para enquadramento de um intervalo em uma determinada classe são levados em consideração (BROWN, 1981):

- Rugosidade das paredes das descontinuidades.
- Separação entre as paredes das descontinuidades.
- Alteração da parede das descontinuidades.
- Preenchimento das descontinuidades com material de baixa coesão (argila, rocha decomposta, areia ou silte).

A rugosidade das paredes das descontinuidades pode ser verificada em testemunhos de sondagem, exceto em caso de rocha muito alterada, quando pode ocorrer a remoção de material durante a sondagem.

A separação entre as paredes das fraturas naturais ocorre apenas nas zonas superficiais do maciço rochoso, e somente pode ser avaliada por inspeção direta da superfície rochosa.

A alteração das paredes pode ser avaliada em testemunhos, exceto em caso de alteração excessiva, quando ocorre remoção de material durante a sondagem.

Quando presente, o preenchimento das descontinuidades é geralmente removido pela água da sondagem, e não pode ser constatado diretamente nos testemunhos. Essa condição pode ser inferida em intervalos que apresentam baixa recuperação, indicativo de rochas alteradas ou com fraturas preenchidas. Nesses casos a condição mais desfavorável deve ser atribuída ao intervalo, o que corresponde à pontuação nula.

Cada intervalo deverá ser inspecionado para definir as classes de condições de descontinuidades presentes, podendo ser feita mais de uma classificação em cada intervalo, dependendo da variabilidade das condições das descontinuidades.

Na fase de tratamento dos dados será calculada a média ponderada das avaliações em cada intervalo, sendo atribuído um valor único a cada intervalo. Com esse procedimento se conseguirá um valor mais refinado para esse parâmetro do maciço que possui uma avaliação de natureza um tanto qualitativa.

5.2.6 Condições de água no maciço rochoso.

Conforme mencionado, a condição de água no maciço rochoso deve ser avaliada com base em estudos, ou em considerações, sobre a hidrogeologia do local. No caso de minas já em operação é possível estimar as condições de água por inspeção das aberturas subterrâneas. Idealmente as inspeções dever ser realizadas em diferentes épocas do ano para verificação de flutuações sazonais das condições hídricas do maciço.

5.2.7 Influência da direção e mergulho das descontinuidades.

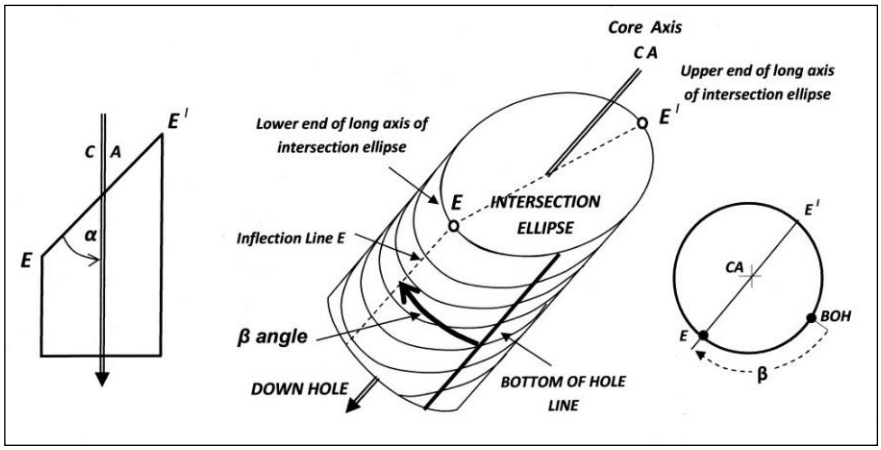
O sexto parâmetro é tratado separadamente, pois a influência das orientações das descontinuidades depende das aplicações do projeto de engenharia, como túnel, mina, taludes ou fundação (tabela 6). Nota-se que o

"valor" do parâmetro "orientação da descontinuidade" não é dado em termos quantitativos, mas por meio de descrições qualitativas como "favorável". Para ajudar a decidir como a orientação da direção e do mergulho são favoráveis ou não em tunelamento, deve ser feita referência à tabela 7, que é baseada em estudos de Wickham et al. (1972). Para taludes e fundações, devem-se consultar os trabalhos de Romana (1985).

Com o objetivo de ganhar conhecimento sobre o número de conjuntos (ou famílias) de descontinuidades, com as respectivas atitudes, deverá ser feita a medição dos ângulos que os planos das descontinuidades formam com o eixo dos testemunhos, seguindo o método alfa-beta indicado por Goodman (1976).

A figura 17 é demostra a definição dos ângulos que uma estrutura planar faz com o eixo do furo de sondagem (CA) e a base do furo (BOH) linha do testemunho orientado. O ângulo alfa é o ângulo agudo entre CA e a linha EE (ao longo eixo da elipse intersecção). O ângulo beta é o ângulo entre a linha (BOH) e E. Esta medida segundo o perímetro do núcleo no sentido horário quando se olha para baixo do furo. A orientação das descontinuidades pode ser obtida rapidamente por projeção estereográfica. O ângulo beta pode variar de 0 a 359 graus.

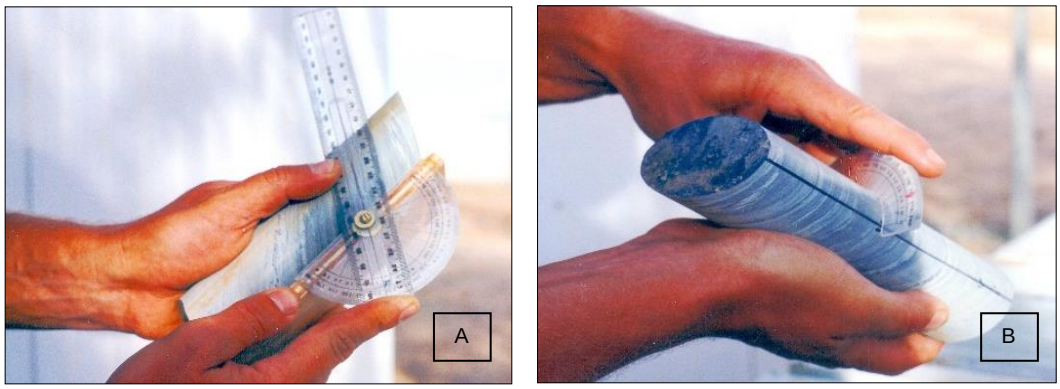
Figura 17. Método alfa-beta.



Fonte: GOODMAN ,1976

Pode se usar um simples transferidor de fabricação caseira para medir o ângulo alpha de uma estrutura planar em um intervalo de testemunho de sondagem orientado como é mostrado na figura 18A.

Figura 18. Figura A medição do ângulo alpha. A em B medição do ângulo beta.



Fonte: Do autor

Na figura 18B o ângulo beta de uma estrutura planar é medido em um intervalo de testemunho de sondagem orientado. A linha preta marca a linha do testemunho orientado (BOH). Embora tedioso isso possa ser gratificante se recuperação do testemunho tenha sido excelente.

Em alguns intervalos em rocha muito alterada, ou em rocha sã sem descontinuidades, poderá ser impossível realizar medições de ângulos.

Caso possível, as descontinuidades deverão ser identificadas quanto à gênese: em junta, falha, dobramento, bandamento, foliação ou contato, mas em caso de dúvida esse campo poderá ser deixado em branco sem maiores implicações na análise geotécnica dos dados.

O significado geotécnico se expressa no quadro 16. Os resultados obtidos classificam o maciço em cinco tipos, desde o muito bom (classe 1) ao muito fraco (classe 5), a que lhe são atribuídos uma qualidade e características geotécnicas, bem como define-se os valores da coesão e do ângulo de atrito interno dos maciços rochosos. Assim um maciço rochoso classificado como muito bom, (classe 1) será um maciço rochoso duro, pouco fraturado, sem filtrações importantes e pouco meteorizado, apresentando poucos problemas em relação à estabilidade e resistência do maciço.

Quadro 16. Classes de maciços

Peso global	100-81	80-61	60-41	40-21	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Maciço rochoso muito bom	Maciço Rochoso bom	Maciço rochoso razoável	Maciço rochoso fraco	Maciço rochoso muito fraco
Tempo médio para aguentar sem suporte	20 anos para 15 m de vão	1 ano para 10 m de vão	1 semana para 5 m de vão	10 horas para 2,5 m de vão	30 minutos para 1 m de vão
Coesão da massa rochosa (kPa)	> 400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito da massa rochosa	> 45	35-45	25-35	15-25	<15

Fonte: (BIENIAWSKI,1989)

Este tipo de maciço não precisa praticamente de medidas de estabilização e reforço para melhorar o seu comportamento, possuindo uma capacidade de carga alta, permite a escavação de taludes com encostas bastante inclinadas.

O valor define ainda indicações do tempo médio de auto sustentação para vãos não revestidos em túneis (períodos de tempo durante os quais deverá ser colocado o suporte sob pena de ocorrer o colapso previsível da abertura).

5.3 Aplicação de técnicas de krigagem para estimativa do *RMR*

Muitos autores utilizaram técnicas geoestatísticas para estimar parâmetros geomecânicos que determinam a qualidade do maciço rochoso (YOU; LEE, (2006), CHOI; LEE, (2007), CHOI et al. (2009), STAVROPOULOU et al. (2007), EXADAKTYLOS; STAVROPOULOU (2008), KAEWKONGKAEW et al. (2011), MATÍAS EGAÑA; JULIÁN M. ORTIZ (2013)). O uso dessas técnicas tem aumentado no ramo da mecânica de rochas, pois estimar dados necessários em locais de difícil acesso é o que viabiliza o desenvolvimento de obras. You e Lee (2006)

incorporaram exploração geofísica, perfuração e dados de campo, ao longo de um alinhamento de um túnel, localizado na Coréia.

Os autores aplicaram a técnica de Krigagem de Indicadores Múltipla às classes de RMR, antes da escavação e construção em três fases diferentes do túnel. Choi e Lee (2007) e Choi et al. (2009) utilizaram a abordagem geoestatística para caracterizar a qualidade do maciço rochoso ao longo de um alinhamento do túnel, localizado em Kimhae City (Coréia).

Os valores de RMR foram estimados usando a abordagem Krigagem Indicadora Anisotrópica Tridimensional, combinando campo e dados geofísicos de poços. Um método quantitativo para avaliar a incerteza do RMR estimado era proposto. Stavropoulou et al. (2007) exploraram os dados de poços geológicos e geotécnicos obtidos na fase exploratória de um projeto de tunelamento para reproduzir a variabilidade espacial da qualidade do maciço rochoso (em termos de RMR).

A Krigagem Ordinária foi usada para estimar os valores de *RMR* em torno dos túneis duplos projetados, com um comprimento total de 130 metros cada. Exadaktylos e Stavropoulou (2008) investigaram a variabilidade espacial exibida pelo RMR durante uma escavação subterrânea, afrontando também o problema de ampliação dos parâmetros de deformabilidade e resistência da rocha a partir de testes de laboratório.

A interpolação dos valores de *RMR* foi realizada pela técnica de krigagem universal. Kaewkongkaew et al. (2013) investigou a aplicabilidade e limitação de métodos geoestatísticos na previsão da qualidade do maciço rochoso utilizando o *RMR*. Eles usaram dados provenientes de dois estudos de caso diferentes, ambos localizados na Tailândia. A previsão, por Krigagem Ordinária, permitiu estimar valores de *RMR* que foram comparados com dados de observação de campo disponíveis a partir da escavação de túneis exploratórios. Oh et al. (2004) integrou os dados de resistividade magneto telúrico com informações de furo para a estimativa espacial de valores do *RMR* ao longo de um túnel de dois quilômetros. Os valores médios do *RMR*, em torno dos locais de sondagem, foram estimados através de Krigagem Simples. Matías Egaña & Julián M. Ortiz (2013) utilizaram a simulação geoestatística para avaliar a incerteza sobre o comportamento do *RMR*. Os autores aplicaram técnicas geoestatísticas para modelar a qualidade do maciço rochoso. A metodologia foi aplicada ao Projeto Subterrâneo Chuquicamata, no norte do Chile.

5.4 Sistema de classificação geomecânica *Q*

Com fundamento na observação em maiores números de escavações subterrâneas, Barton, Lien e Lund, do *Norwegian Geotechnical Institute*, propuseram, em 1974, uma classificação que assenta na definição de um índice de qualidade *Q* (*Tunnelling Quality Index*) baseado na análise de 6 fatores considerados relevantes para a caracterização do comportamento dos maciços rochosos. O valor do índice Q varia numa faixa logarítmica de 0,001 até 1000 e é definido por:

$$Q = \left(\frac{RQD}{Jn}\right)\left(\frac{Jr}{Ja}\right)\left(\frac{Jw}{SRF}\right) \tag{11}$$

Onde:

RQD = Índice *RQD*

Jn = Índice de influência do número de famílias das descontinuidades

Jr = Índice de influência da rugosidade das paredes das descontinuidades

Ja = Índice de influência da alteração das paredes das descontinuidades

Jw = Índice de influência da ação da água subterrânea

SRF = Índice de influência do estado de tensões no maciço (*Stress Reduction Factor*).

O índice de Qualidade (*Q*) pode ser considerado como a medida de três parâmetros que são o tamanho dos blocos (*RQD/Jn*), a resistência ao cisalhamento entre blocos (*Jr/Ja*) e a tensão ativa (*Jw/SRF*). Explicando o significado destes três parâmetros, tem-se alguns comentários de Barton et al. (1974):

- A primeira parcela (*RQD/Jn*) representa a estrutura do maciço rochoso, que é uma medida grosseira do tamanho dos blocos do maciço.
- A segunda parcela (*Jr/Ja*) representa a rugosidade e características de atrito das paredes das descontinuidades. Esta parcela é computada a favor da resistência, como descontinuidades não alteradas e em contato direto. Deve-se esperar que esta superfície vá se dilatar fortemente quando cisalhada, e por esta razão deve ser favorável à estabilidade do túnel
- A terceira parcela (*Jw/SRF*) é formada por dois parâmetros de agentes externos (água e tensões). O índice *SRF* é a medida de: i) perda da capacidade de

resistência no caso de escavações através de zonas de cisalhamento e maciços rochosos moles; ii) tensões em maciço rochoso competente; e iii) efeito de expansão lateral ("*squeezing*") no caso de maciço rochoso plástico incompetente. Este parâmetro pode ser considerado como um parâmetro das tensões totais do maciço rochoso. O índice de influência da ação da água subterrânea *Jw* é uma medida da pressão de água, que apresenta um efeito prejudicial na resistência ao cisalhamento das descontinuidades, pela redução na resistência efetiva da tensão normal. Assim, a parcela (*Jw/SRF*) é um fator empírico que descreve de certa forma a tensão ativa.

5.4.1 Diretrizes do índice de qualidade *Q*.

Os valores de *Q* pode ser determinada de maneiras diferentes, por mapeamento geológico em escavações subterrâneas, na superfície, ou, alternativamente, pelo corte de testemunho de sondagem. Sendo que os valores mais corretos são obtidos a partir mapeamento geológico em escavações subterrâneas. Cada um dos seis parâmetros é determinado de acordo com uma descrição encontrada nos quadros abaixo.

Durante o mapeamento pode ser necessário dividir a escavação subterrânea em várias seções de modo a que a variação do valor Q dentro de cada seção é moderada, isto é, esta variação não deverá exceder a de uma classe de rocha no quadro de suporte. Durante a escavação, um avanço de explosão será uma seção natural para mapeamento individual. Em seções de alguns metros de comprimento, pode haver alguma variação, e a fim de mostrar esta variação, pode ser utilizado mapas de histogramas.

O valor *Q* verdadeiro no nível de escavação só pode ser observado na própria escavação, sendo que o valor de Q obtido por outros métodos será mais incerto.

5.4.2 *Rock quality designation* (*RQD*).

Destinado a ser usado como um sistema de classificação simples para a estabilidade de maciços rochosos o *RQD* é usado, numa percentagem entre 0 e 100. Se 0 é usado na fórmula *Q*, ele vai dar um valor *Q* igual a 0.

No caso de não existir amostragem obtida por sondagens, mas que sejam identificáveis os traços das descontinuidades em afloramentos rochosos ou em escavações poderá estimar o valor do *RQD* recorrendo à relação proposta por Palmstrom, 1975 (*ISRM* 1981). Ele sugere que, quando não há testemunhos de sondagem disponíveis, mas traços de juntas são visíveis na superfície do maciço exposto ou nas galerias de exploração, o *RQD* pode ser estimado pelo parâmetro.

$$RQD = 115 - 3{,}3\ Jv \text{ para } Jv > 4{,}5 \quad (12)$$

$$RQD = 100 \text{ para } Jv \leq 4{,}5 \quad (13)$$

Sendo que o parâmetro *Jv* representa o número total de descontinuidades que interceptam por unidade de volume (1 m/³) o maciço rochoso.

Uma vez que nem sempre é fácil ter a percepção tridimensional do afloramento, o valor de *Jv* pode ser determinado, contando as descontinuidades de cada família que interceptam o maciço rochoso, ao longo de certo comprimento, medido perpendicularmente à direção de cada uma das famílias presentes.

$$Jv = \Sigma\ n^{o}\ descontinuidades\ /\ comprimento\ médio \quad (14)$$

O comprimento a medir dependerá do espaçamento de cada família, variando normalmente a metros. De acordo com os valores de *Jv*, são normalmente utilizadas as seguintes designações para descrever as dimensões dos blocos:

Quadro 17. Descrição do tamanho dos blocos em função do número de descontinuidades.

Descrição	Jv (descontinuidades/ m³)
Blocos muito grandes	< 1
Blocos grandes	1 a 3
Blocos tamanhos médios	3 a 10
Blocos pequenos	10 a 30
Blocos muito pequenos	> 30

Fonte: (ISRM, 1981).

Quando *Jv* é superior a 60, considera-se que o maciço rochoso está bastante fraturado. Outra forma, menos precisa, mas mais facilmente executável de estimar o valor de *Jv* é contar o número total de descontinuidades que interceptam um

comprimento L, em qualquer direção, correspondendo este valor à frequência das descontinuidades, λ.

$$\lambda = n^{o}\ descontinuidades\ (m) / L \qquad (15)$$

A determinação do RQD pode assim ser feita a partir da frequência das descontinuidades, obtendo-se um valor teórico mínimo para o RQD:

$$RQD \approx 100\ \exp^{-0,1\ \lambda}(0,1\ \lambda + 1) \qquad (16)$$

É de notar que o *RQD* é um parâmetro dependente da direção de amostragem, podendo o seu valor variar significativamente em função da orientação das sondagens. O uso deste índice volumétrico, para estimar o valor do *RQD*, pode apresentar-se como benéfico por reduzir tal dependência.

A classificação dos maciços rochosos, baseada nos valores do *RQD*, embora útil, é bastante limitada. De facto, além das fraturas, outras descontinuidades que caracterizam a estrutura geológica das formações, podem, de forma idêntica, imprimir um dado comportamento a um maciço. Estão neste caso, por exemplo, as superfícies de estratificação e de xistosidade.

Alguns autores indicam que o *RQD* deve ser investigado em escavação subterrânea normalmente a partir de 2m da periferia de detonação, pois pode ser influenciado por fraturas causadas pela detonação. No entanto, elas podem ser importantes para a estabilidade dos blocos individuais. Em alguns casos ocorre a incerteza a que as juntas devem ser consideradas.

Quadro 18. Classificação do parâmetro e *RQD* para o índice *Q* .

ÍNDICE *RQD*	*RQD*	NOTAS:
A. Muito Ruim	0-25	1. Se RQD é medido ≤10 (incluindo 0), assumir o valor nominal de 10 para calcular *Q*.
B. Ruim	25-50	
C. Razoável	50-75	
D. Bom	75-90	2. Intervalos de 5 em 5 no valor de *RQD* são considerados de boa acurácia (p.ex. 95, 100).
E. Ótimo	90-100	

Fonte: (BARTON et al., 1974)

Este será muitas vezes o caso em maciços com estruturas planares com aspecto de xistosidade e gnaissificação. Uma superfície xistosa ou gnáissica

representa uma fraqueza na rocha, e não é necessariamente uma articulação natural, muitas vezes dividido em planos finos devido ao intemperismo, enquanto alguns metros abaixo da superfície a rocha podem aparecer maciça. Daí rochas com estruturas planares podem ter valores de *RQD* elevados.

5.4.3 Números de juntas (*Jn*)

A forma e o tamanho dos blocos de rocha dependem da geometria das juntas. As juntas dentro de um conjunto de articulação serão praticamente paralelas um ao outro e exibirá um espaçamento característico em comum. Conjunto que não ocorrem sistematicamente, ou que têm um espaçamento de vários metros é chamado conjunto aleatório. No entanto, o efeito de espaçamento depende fortemente da amplitude ou altura da abertura subterrânea.

Tabela 8. Classificação do parâmetro *Jn* para o índice *Q.*

NÚMERO DE FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES	*Jn*	NOTAS 1. Para interseções usar (3*Jn*) 2. Para emboques usar (2*Jn*)
A. Descontinuidades esparsas ou ausentes.	0,5-1	
B. Uma família de descontinuidades	2	
C. B mais descontinuidades esparsas.	3	
D. Duas famílias de descontinuidades	4	
E. D mais descontinuidades esparsas	6	
F. Três famílias de descontinuidades.	9	
G. F mais descontinuidades esparsas	12	
H. Quatro ou mais famílias de descontinuidades.	15	
I. Rocha extremamente fraturada (triturada)	20	

Fonte: (BARTON et al., 1974)

Segundo Barton (1974) A relação ao comprimento de *Jn* não afeta diretamente os valores de *Q*, não tendo importância para a estabilidade da abertura. Porém ele destaca que quando as juntas com persistência pequena a muito pequena em geral não fazer parte da formação de blocos, elas podem ser consideradas como aleatórias, mesmo se ocorrerem sistematicamente.

Se elas tomam parte na formação de blocos, elas devem ser consideradas como um conjunto de junta na localização particular em que elas ocorrem.

5.4.4 Índice de rugosidade das juntas (*Jr*)

O atrito presente nas juntas depende da natureza da superfície de suas paredes, se elas são ondulantes, planares, ásperas ou lisas. O número em conjunto de rugosidade descreve essas condições e é estimado a partir da tabela 27.

Tabela 9. Classificação do parâmetro *Jr* para o índice *Q*.

CONDIÇÃO DE RUGOSIDADE DAS PAREDES	Jr	NOTAS
a. Paredes das descontinuidades em contato		1. Acrescentar 1,0 se o espaçamento entre descontinuidades for > 3 m. 2. *Jr* = 0,5 no caso de descontinuidades planas e estriadas e com orientação na direção da tensão mínima
b. Paredes das descontinuidades em contato com deslocamentos diferenciais < 10 cm		
A. Descontinuidades não persistentes.	4	
B. Descontinuidades rugosas ou irregulares, onduladas.	3	
C. Descontinuidades lisas e onduladas.	2	
D. Descontinuidades polidas e onduladas	1,5	
E. Descontinuidades rugosas ou irregulares e planas	1,5	
F. Descontinuidades lisas e planas.	1	
G. Descontinuidades polidas ou estriadas e planas.	0,5	
c. Sem contato entre as paredes das descontinuidades quando cisalhadas		
H. Descontinuidades preenchidas com material argiloso.	1	
J. Descontinuidades preenchidas com material granular	1	

Fonte: (BARTON et al., 1974)

Os termos áspero, liso e *slickenside* referem-se a pequenas estruturas em uma escala de centímetros ou milímetros. Isto pode ser avaliado, passando o dedo ao longo da parede das descontinuidades podendo sentir pequenas rugosidades.

Quando a rugosidade é de grande escala ela é caracterizada ao longo de 1 m de comprimento em sua superfície.

5.4.5 Índice de alteração e preenchimentos de juntas (*Ja*).

O tipo de mineral e as suas características são decisivas para caracterização do valor de *Ja*. Quando ocorrer percolação de água na parede das juntas esse material irá amolecer. Uma vez que apenas pequenas quantidades de água são necessárias para causar expansão mineral em algumas argilas, um alto valor de Ja geralmente é dado independentemente da situação de água, onde a expansão

mineral da argila é abundante. O valor de Ja depende do tipo de minerais na junta. A expansão mineral é desfavorável para a estabilidade do maciço, podendo, portanto, ser necessário uma análise do material em laboratório. As análises podem ser realizadas utilizando testes de laboratório relativamente simples, ou de difração de raios-x. A pressão da expansão medida em laboratório não deve ser usada diretamente no dimensionamento da contenção desde o maciço rochoso. Além disso, o material contido na análise da expansão mineral é geralmente misturado com outros minerais e fragmentos de rocha.

Para se determinar um índice de alteração e preenchimento a tabela 10 foi dividida em três categorias ("a", "b" e "c") com base na espessura e grau de contato da parede da rocha quando cortado ao longo do plano da junta.

Além do índice de alteração e preenchimentos se relaciona o ângulo de atrito das juntas. Para considerar o ângulo de atrito dois fatores são importantes; espessura e resistência da parede, estes fatores dependem principalmente da composição mineral.

Tabela 10. Classificação do parâmetro *Ja* para o índice *Q*

(Continua)

CONDIÇÕES DE ALTERAÇÃO DAS PAREDES	*Ja*	ϕ_r (º)	NOTAS
a. Descontinuidades com contato rocha/rocha e sem deslocamento relativo entre as paredes			1. ϕ_r ângulo de atrito residual (indicativo das propriedades mineralógicas dos produtos de alteração)
A. Paredes duras, compactas, com preenchimento de materiais impermeáveis	0,75	-	
B. Descontinuidades sem alteração, pigmentação superficial incipiente	1	25-35	
C. Paredes levemente alteradas; películas de materiais arenosos ou minerais abrasivos	2	25-30	
D. Paredes com películas de material siltoso com pequena fração argilosa	3	20-25	
E. Paredes com películas de material mole (micas, clorita, talco, gesso, grafite etc.), eventualmente com minerais expansivos	4	8-16	

(Conclusão)

CONDIÇÕES DE ALTERAÇÃO DAS PAREDES	*Ja*	ϕ_r (º)	NOTAS
b. Descontinuidades com contato rocha/rocha e com deslocamento relativo incipiente entre as paredes (deslocamento diferencial inferior a 10 cm)			1. ϕ_r ângulo de atrito residual (indicativo das propriedades mineralógicas dos produtos de alteração)
F. Paredes com partículas arenosas, fragmentos de rocha etc.	4	25-30	
G. Paredes com preenchimento contínuo e poucos espessos (< 5 mm) de material argiloso fortemente sobre adensado	6	16-24	
H. Paredes com preenchimento contínuo e pouco espesso (< 5 mm) de material argiloso pouco ou medianamente sobre adensado.	8	12-16	
J. Paredes com preenchimento de materiais argilosos expansivos; valores variáveis com a porcentagem dos argilo-minerais expansivos presentes e com a ação conjugada da água intersticial.	8-12	6-12	
c. Descontinuidades sem contato rocha/rocha e com deslocamento relativo entre as paredes			
K. Zonas de preenchimento com fragmentos de rocha	6		
L. Rocha e material argiloso (ver G, H e J para caracterizar as condições das argilas)	8		
M. Zonas de preenchimento com fragmentos de rocha.	8-12	6-24	
N. Zonas de preenchimento com material arenoso ou siltoso-argiloso, sendo pequena a fração argilosa.	5		
O. Zonas contínuas de preenchimento com material argiloso	10-13		
P e R (ver G, H e J para a condição das argilas)	6-24		

Fonte: (BARTON et al., 1974)

5.4.6 Fator de redução devido presença de água (*Jw*).

A Água dentro de um maciço pode expandir ou lavar os minerais e, assim, reduzir o atrito nos planos das descontinuidades presente nesse maciço. A pressão da água pode reduzir a tensão normal nas paredes e fazer com que os blocos se movam mais facilmente.

A determinação do fator de redução de água é baseada no fluxo e pressão da água observados em uma abertura subterrânea, tabela 11. É recorrente a

percolação de água em aberturas subterrâneas, sendo, no entanto provenientes do invertido, e podem ser difíceis de observar ou medir quantitativamente. Em uma abertura subterrânea próxima a superfície, a entrada pode variar com as estações de chuvas e quantidade de precipitação local, o fluxo pode aumentar em períodos com precipitação elevada e diminuir em estações secas ou em estações com condições de congelamento. Estas condições devem ser levadas em consideração quando se determinar o fator de redução de água. Medidas de vedação, por exemplo, jateamento vai reduzir o fluxo, e o valor de *Jw* deve então ser aumentada de acordo com a redução do fluxo de entrada. Em alguns casos, a abertura subterrânea pode ser seca logo após a escavação, mas desenvolver fluxo ao longo do tempo. Em outros casos, alguns fluxos presentes diminuirão após há algum tempo.

Os menores valores de *Jw* representam grandes problemas de estabilidade (*Jw* <0,2).

Tabela 11. Classificação do parâmetro *Jw* para o índice *Q*

CONDIÇÕES DE AFLUÊNCIA DE ÁGUA	*Jw*	u (MPa)	NOTAS
A. Escavação a seco ou com pequena afluência de água (<5 l/min)	1	<0,1	1. Valores aproximados do poro pressões da água 2. Reduzir os valores de Jw no caso de instalação de dispositivos de drenagem (C a F) 3. Não são considerados os problemas especiais causados por formação de gelo
B. Afluência média da água com eventual carregamento do preenchimento.	0,67	0,1-0,25	
C. Afluência elevada de água em rochas competentes de descontinuidades não preenchidas.	0,5	0,25-1	
D. Afluência elevada de água com carregamento significativo do preenchimento	0,33	0,25-1	
E. Afluência excepcionalmente elevada de água (ou jatos de pressão), com decaimento com o tempo.	0,1-0,2	>1	
F. Afluência excepcionalmente elevada de água (ou jatos de pressão), sem decaimento com o tempo.	0,05-0,1	>1	

Fonte: (BARTON et al., 1974)

5.4.7 Fator referente à influência do estado de tensão maciço (*SRF*).

O fator referente à influência do estado de tensão maciço (*SRF*) pode descrever a relação entre estresse e a influência do estado do maciço em uma abertura subterrânea. Os efeitos do estresse geralmente podem ser observados como fragmentação, queda de blocos, deformação, dilatação de juntas. No entanto, pode se observar por algum tempo a instabilidade do maciço antes que ocorra esses fenómenos.

Ambas as tensões podem ser medidas, e *SRF* pode então ser calculada a partir da relação entre a resistência à compressão uniaxial da rocha (σc) e o estresse principal ($\sigma 1$) ou a relação entre o estresse σ θ tangencial máxima e σc em rocha maciça. Durante a fase de planejamento de uma escavação subterrânea, SRF pode ser estipulado a partir das características dos esforços anisotrópicos expresso no maciço com técnicas estatísticas.

A fim de determinar *SRF*, as condições de estresse do maciço devem ser determinadas antes primeiras com uma análise técnica, depois o valor do parâmetro SRF pode ser determinado na tabela 12. A situação de estresse é classificada em quatro categorias.

a) Zonas de fraqueza que cruzam a abertura subterrânea onde pode ou não ser capaz de transferir tensões ao redor do maciço rochoso.

b) rocha competente com problemas de estabilidade devido às altas tensões ou falta de tensões.

c) deformação plástica das rochas incompetentes pela a influência das tensões das rochas encaixantes.

d) Rochas expansivas; atividade de expansão química, dependendo da presença de água.

Tabela 12. Classificação do parâmetro *SRF* para o índice *Q*

(Continua)

6. CONDIÇÃO DAS TENSÕES NO MACIÇO			*SRF*	NOTAS
a. Zonas de baixa resistência interceptando a escavação				1. No caso de ocorrência de zonas de baixa resistência relevantes, mas não interceptando a escavação, recomenda-se a redução dos valores de *SRF* de 25 a 50%. 2. No caso de tensões subsuperficiais (ver H), adotar *SRF* = 5 quando a profundidade da abóbada da escavação abaixo da superfície do terreno for menor que a sua dimensão característica (largura do vão) 3. Para os itens H a M, σ_1, σ_3 são tensões principais; σ_c é a resistência à compressão simples e σ_t a resistência a tração 4. Para maciço muito anisotrópico, introduzir correções nos itens H a M de acordo com os seguintes critérios: a) $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$: reduzir σ_c para $0{,}8\sigma_c$ e σ_t para $0{,}8\sigma_t$ b) $\sigma_1/\sigma_3 > 10$: reduzir σ_c para $0{,}6\sigma_c$ e σ_t para $0{,}6\sigma_t$
A. Ocorrências múltiplas contendo material argiloso ou rocha quimicamente decomposta (qualquer profundidade)			10	
B. Ocorrência específica contendo material argiloso ou rocha quimicamente decomposta (profundidade da escavação < 50 m)			5	
C. Ocorrência específica contendo material argiloso ou rocha quimicamente decomposta (profundidade da escavação > 50 m)			2,5	
D. Ocorrência múltiplas de zonas de material cisalhado em rochas competentes, isentas de argila e com blocos desagregados de rocha (qualquer profundidade)			7,5	
E. Ocorrência específicas de zonas de material cisalhado em rochas competentes, isentas de material argiloso (profundidade de escavação < 50 m)			5	
F. Ocorrências específicas de zonas de material cisalhado em rochas competentes, isentas de material argiloso (profundidade da escavação > 50 m)			2,5	
G. Ocorrência de juntas abertas e intenso fraturamento do maciço (qualquer profundidade)			5	
b. Rochas competentes (comportamento rígido)				
	(σ_c/σ_1)	(σ_t/σ_1)		
H. Tensões baixas, sub-superficiais	>200	>13	>2,5	
J. Tensões Moderadas	10-200	0,66-13	1,0	
K. Tensões elevadas (eventuais problemas de estabilidade das paredes)	5-10	0,33-0,66	0,5-2	
L. Condições moderadas de fraturamento (rockburst)	2,5-5	0,16-0,33	5-10	
M. Condições intensas de rocha explosiva (rockburst)	<2,5	<0,16	10-20	
c. Rochas incompetentes (comportamento plástico às deformações)				
N. Tensões moderadas			5-10	

(Conclusão)

O. Tensões elevadas	10-20	
d. Rochas expansivas (atividade expansiva química dependente da presença da água)		
P. Tensões moderadas	5-10	
R. Tensões elevadas	10-20	

Fonte: (BARTON et al., 1974)

5.5 Utilização do sistema *Q* de Barton

Com os seis valores do sistema *Q* já caracterizado é possível dar um padrão geomecânico do maciço rochoso, usado como um guia para a concepção de suporte em novos projetos subterrâneos.

Tabela 13. Classes de maciços rochosos em função de *Q*

Padrão Geomecânico do Maciço	Valores de *Q*
Péssimo	< 0,01
Extremamente ruim	0,01 - 0,1
Muito ruim	0,1 - 1,0
Ruim	1,0 - 4,0
Regular	4,0 - 10,0
Bom	10,0 - 40,0
Muito bom	40,0 - 100,0
Ótimo	100,0 - 400,0
Excelente	> 400,0

Fonte: (BARTON et al., 1974)

Com o objetivo de encontrar uma relação entre o índice *Q*, a estabilidade e o sistema de suporte requerido, Barton *et al.* (1974) definiram um parâmetro adicional que chamou de Dimensão Equivalente (*De*) da escavação. Este valor é calculado dividindo a dimensão da escavação, (o diâmetro ou a altura das paredes da escavação) pelo *ESR*, que significa índice de Suporte da Escavação (*ESR-Excavation Suport Ratio*):

$$De = [\text{Dimensão da escavação, diâmetro ou altura (m)}] / (ESR) \quad (16)$$

O valor de ESR está relacionado com o uso da escavação e o grau de segurança necessário no sistema de suporte para manter a estabilidade. Barton et al. (1974) sugeriram os seguintes valores de ESR, conforme mostrados na tabela 14

A dimensão equivalente, *de*, plotada junto com o valor de *Q,* é utilizada para determinar o número das categorias de suporte necessárias (BARTON *et al*., 1974), o que foi atualizado por Grimstad e Barton (1993), refletindo o uso crescente do reforço de fibra de aço em concreto projetado como suporte para escavações subterrâneas. A tabela 33 mostra esta relação. Como pode ser visto, para um valor de 9,4 m e um índice *Q* de 4,5 tem-se uma categoria da escavação de 4, que requer um sistema de tirantes espaçados em 2,3 m e concreto projetado com espessura de 40 a 50 mm.

Tabela 14. Índice de suporte de escavação (*ESR*) apropriado para vários tipos de escavações subterrâneas.

	TIPO DE ESCAVAÇÃO	*ESR*	Casos
A	Escavações em minas temporárias	3-5	2
B	Túneis verticais (poços): • Seção circular • Seção retangular ou quadrada	 2,5 2,0	
C	Escavações em minas permanentes, Túneis com fluxo de água (excluindo Túneis de adução a alta pressão), Túneis piloto, Túneis de ligação de poços, e frentes de avanço de grande porte.	1,6	83
D	Cavernas de estocagem, plantas de tratamento de água, pequeno auto estrada e linhas ferroviárias subterrâneas, acesso a cavernas confinadas, Túneis de acesso em geral	1,3	25
E	Usinas hidrelétricas, grandes autopistas e linhas ferroviárias subterrâneas, cavernas de segurança, portais, interseções.	1,0	73
F	Estações nucleares subterrâneas, estações ferroviárias subterrâneas, fábricas.	0,8	2

Fonte: (BARTON et al., 1974)

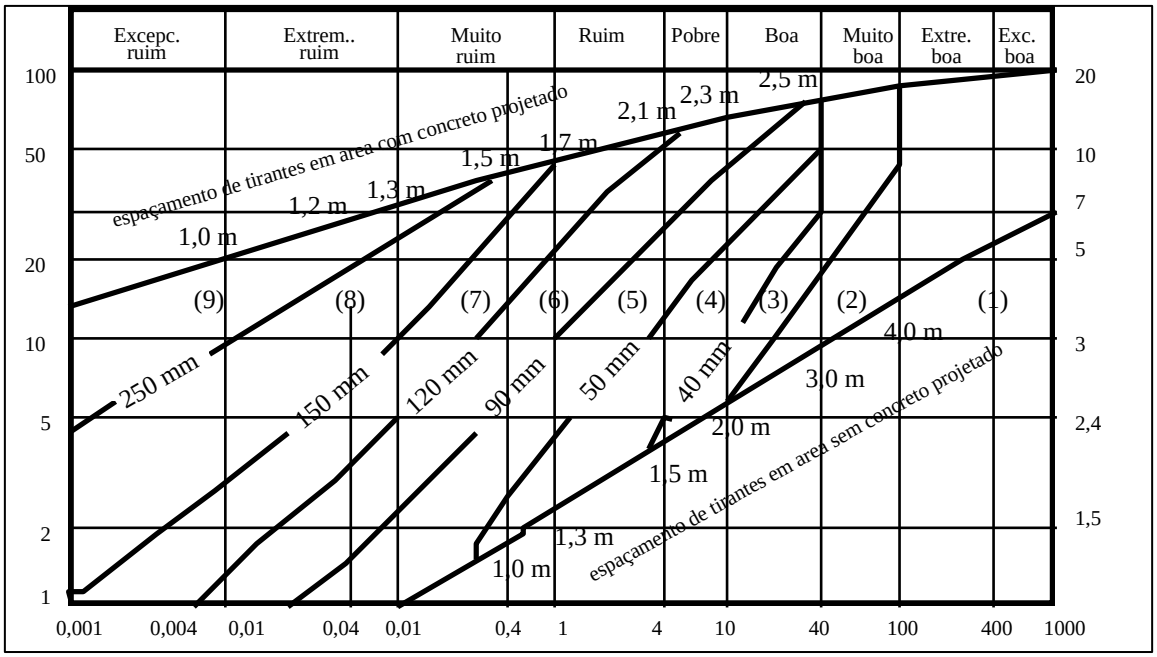


Tabela 15. Sistema *Q* para classificação dos maciços rochosos e escolha do tipo de suporte .

(1)	Sem suporte	(6)	Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de 90-120 mm, e com tirantes.
(2)	Tirantes curtos localizados		
(3)	Sistema de tirantes	(7)	Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de 120-150 mm, e com tirantes.
(4)	Sistema de tirantes com concreto projetado de 40-100 mm		
		(8)	Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de > 150 mm, reforçado com arcos de concreto e tirante.
(5)	Concreto projetado reforçado com fibra de aço, de espessura de 50-90 mm, e com tirantes.		
		(9)	Estrutura de concreto

Fonte: (GRIMSTAD; BARTON, 1993).

O comprimento L do tirante pode ser estimado pelo vão da escavação B e o Índice de Suporte da Escavação (*ESR*), como proposto por Barton *et al*. (1974):

$$L = \frac{2 + 0{,}15B}{ESR} \qquad (17)$$

Os máximos vão autossustentável é estimado por:

$$\textit{Máximo vão autossustentável} = 2ESRQ^{0.4} \qquad (18)$$

Baseados em casos registrados, Grimstad e Barton (1993), sugerem uma relação entre o valor de *Q* e a pressão permanente de suporte no teto do túnel como sendo:

$$P_{roof} = \frac{2\sqrt{JnQ^{-1/3}}}{3Jr} \qquad (19)$$

5.5.1 Resistência ao cisalhamento

O sistema *Q* pode estimar um valor para a resistência ao cisalhamento aparente a partir dos parâmetros *Jr* e *Ja*. Em 1974 Barton e colaboradores formularam a tabela 34 onde se pode obter uma aproximação da resistência ao cisalhamento Inter blocos para as três categorias de contatos de paredes de rocha ao longo de fraturas, baseado na função tg-¹ (Jr/Ja).

Tabela 16. Estimativa da resistência ao cisalhamento aparente .

(Continua)

A- Fraturas sem deslocamento relativo. Contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas						
Descriçãoo	Valores j_r					
		Ja = 0,75	1,0	2	3	4
A-fraturas descontínuas	4	79º	76º	63º	53º	45º
B-fraturas ásperas ou irregulares, Onduladas	3	76°	72º	56º	45º	37º
C-fraturas lisas, onduladas	2	69º	63º	45º	34º	27º
D-fraturas polidas, onduladas	1,5	63º	56º	37º	27º	21º
E-fraturas ásperas ou irregulares, Planas	1,5	63º	56º	37º	17º	21º
F-fraturas lisas, planas	1,0	53º	45º	27º	18º	14º

(Conclusão)

B- Fraturas com deslocamento relativo (menos de 10 cm). Contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas						
		Ja= 4	6	8	12	-----
A-fraturas descontínuas	4	45º	34º	27º	18º	-----
B-fraturas ásperas ou irregulares,	3	37º	27º	21º	14º	-----
C-fraturas lisas, onduladas	2	27º	18º	14º	9,5º	-----
D-fraturas polidas, onduladas	1,5	21º	14º	11º	7,1º	-----
E-fraturas ásperas ou irregulares, Planas	1,5º	21º	14º	11º	7,1º	-----
F-fraturas lisas, planas	1,0º	14º	9,5º	7,1º	4,7º	-----
G-fraturas polidas, planas	0,5º	7º	4,7º	3,6º	2,4º	-----

C- Fraturas com deslocamento relativo. Não há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas				
		Ja = 6	8	12
Rochas trituradas, com minerais Argilosos	1,0	9,5	7,1	4,7
		Ja = 5		
Zonas siltosas ou areno-argilosas	1,0	11º		
		Ja = 10	13	20
Bandas argilosas espessas	1,0	5,7º	4,4º	2,9º

Fonte: (BARTON et al., 1974)

5.5.2 Estimação do módulo de deformabilidade

Barton (2002) apresentou uma fórmula para calcular o módulo de deformabilidade a partir do valor Q pela seguinte equação**:**

$$Em = 10.\ [Q.\ (\sigma c/100)\ ]^{1/3} \qquad (20)$$

Grimstad e Barton (1993) também sugeriram uma fórmula para estimar o módulo de deformabilidade relacionado com o valor *Q*, segundo estes autores, a expressão deve ser usada para valores de Q maiores que 1.

$$Em = 25.\log Q \qquad (21)$$

Em seu trabalho intitulado "*The deformation modulus of rock masses – comparisons between in situ tests and indirect estimates*", Palmström e Singh (2001) propuseram uma nova equação para o intervalo de 1 < Q < 30.

$$Em = 8.\ Q0{,}4 \qquad (22)$$

5.5.3 Correlações entre o *RMR* e o sistema-*Q*

As correlações foram propostas entre o *RMR* e o índice-*Q* (BIENIAWSKI, 1976), baseadas em 111 casos históricos analisados para este fim, sendo 62 casos escandinavos, 28 casos Sul-africanos, e 21 casos dos Estados Unidos, Canadá, Austrália e Europa. Foram determinadas as seguintes relações para engenharia civil de túneis:

$$RMR = 9\ \ln Q + 44 \qquad (23)$$

A utilização destas correlações entre sistemas de classificação geomecânica deve ser feita com precaução, pois os parâmetros adotados e a maneira como os mesmos são combinados para chegar ao resultado difere caso a caso. Os significados geomecânico e geotécnico de classes homônimas pertencentes a sistemas distintos não são necessariamente correspondentes.

Para túneis de mineração, Abad *et al*. (1983) analisaram 187 minas de carvão na Espanha, chegando a essa correlação:

$$RMR = 10,5\ lnQ + 42 \qquad (24)$$

5.6 *Geological Strength Index* (*GSI*).

Um do método empírico que inicialmente foi aplicado na determinação dos parâmetros de resistência dos maciços rochosos “homogêneos e isotrópicos”. Devido à ausência de outros métodos dentro da comunidade da mecânica das rochas, este critério tem sido aplicado de forma satisfatória num grande número de projetos a nível mundial, ainda para maciços rochosos estruturalmente anisotrópicos.

É um sistema de caracterização do maciço rochoso que tem sido desenvolvido em mecânica das rochas para atender a necessidade de entrada de dados confiáveis relacionadas a propriedades da rocha, servindo como entrada para a análise numérica ou soluções de forma fechada para a concepção de túneis, taludes, ou fundações em rochas.

O caráter geológico do material rochoso, em conjunto com a avaliação visual da massa rochosa que forma o maciço rochoso, é usado como uma entrada direta para a seleção de parâmetros para a previsão de força no maciço e sua deformabilidade.

Esta abordagem permite o maciço rochoso a ser considerado como contínuo sem perder a influência que a geologia tem sobre as suas propriedades mecânicas. Ele também fornece um método de campo para a caracterização de difícil descrição da massa rochosa.

O parâmetro *GSI* (*Geological Strength Index*) foi proposto por Hoek (1994), que de fato é uma forma de fusão dos sistemas *RMR* e *Q*, para fins de obtenção de parâmetros geomecânico de maciços rochosos. Os sistemas *RMR* e *Q* visam recomendar soluções para problemas de engenharia, por exemplo, o suporte necessário para um túnel, escavado num maciço rochoso a certa profundidade. Já o *GSI* visa apenas os parâmetros do maciço rochoso. Assim, Hoek sugere que os índices *RMR* e *Q* sejam corrigidos eliminando os parâmetros que incorporam agentes externos à qualidade do maciço rochoso. No entanto, ocorre com frequência

na mineração coletas de dados sendo feitas por técnicos imberbes, levando ao erro da quantificação do sistema.

4.5.1 Funções do índice de força geológica.

A função da classificação *GSI* é uma descrição geológica cuidadosa da massa rocha, que é essencialmente qualitativa, onde se acreditava que o número das juntas é em grande parte complexas e de poucas informações. O sistema GSI nunca foi destinado como um substituto para *RMR* ou *Q*. O *GSI* sozinho não é uma ferramenta de design do túnel, sua única função é a estimativa de propriedades do maciço rochoso. Ele está intimamente ligado com a força da rocha intacta e deve ser usada independentemente deste parâmetro. Este índice é baseado em uma avaliação da litologia, estrutura e condição das superfícies de descontinuidade na massa da rocha, e estima-se de um exame visual do maciço rochoso exposto em afloramentos, em escavações de superfície tais como taludes e túneis (galerias). O *GSI* combinado com os dois parâmetros fundamentais da geologia que são as condições de descontinuidades e a sua massa rochosa sendo sempre respeitadas as restrições geológicas principais que regem a formação regional se tornar um índice simples de ser aplicado.

As quantificações do *GSI* não funcionam bem em terrenos tectonicamente perturbados em que o conjunto estrutural tem sido destruído ao passar da era geológica por inúmeras reologias. Em maciços rochosos com essa reologia é recomendado que o uso da abordagem qualitativa original fosse baseado no cuidado de observações visuais. Assim, o sistema de "quantificação" só é válido no intervalo de, $35 < GSI < 75$, quando o comportamento do maciço rochoso depende do movimento e rotação de blocos de rocha intacta e onde o espaçamento e a condição de descontinuidades que separam estas partes não sejam controlados por esses movimentos. Quando o maciço rochoso passa por algum movimento, a quantificação deixa de ser válida.

Uma vez que for caraterizado um número para o *GSI*, este número é inserido em um conjunto de equações empiricamente desenvolvido para estimar as propriedades de massa de rocha que podem ser usadas como entrada em alguma forma de análise numérica ou solução de forma fechada.

O índice é usado em conjunto com os valores apropriados para confinamento e compressão de força de resistência à compressão da rocha intacta, *σci* e a constante petrográfica, *mi*, para calcular as propriedades mecânicas de uma massa de rocha, em particular a resistência à compressão da massa da rocha (*σcm*) e seu módulo de deformação (*E*).

Os procedimentos básicos são explicados por Hoek e Brown (1997), mas um aprimoramento das equações empíricas e a relação entre os critérios de Hoek e Mohr-Coulomb têm sido abordados por Hoek e colaboradores (2002) para intervalos apropriados de stress encontrados em túneis e encostas.

Ao longo dos anos o *GSI* passou por muitas atualizações, uma atualização mais recente é a de Hoek e colaboradores (2013) que apresentaram um ábaco no qual o *GSI* pode ser estimado a partir da estrutura (juntas) do maciço e da qualidade das descontinuidades. Esses autores possibilitaram quantificar a estrutura do maciço pelo *RQD*, e para quantificar a condição das descontinuidades pelos pesos da classificação RMR para a condição das descontinuidades de Bieniawski (1989), denominados de *JCond89*. Assim, o *GSI* pode ser determinado pela relação:

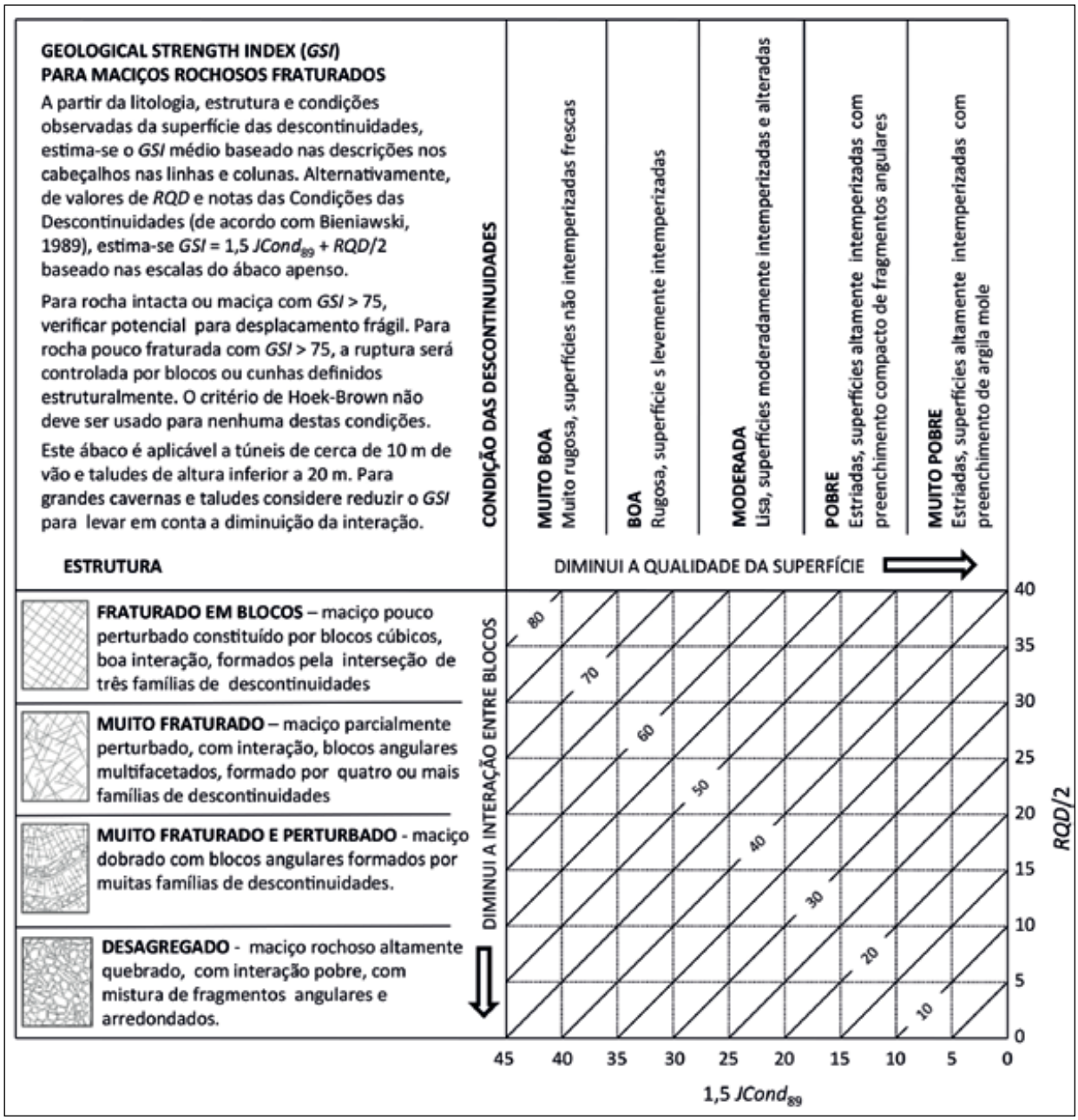
$$GSI = 1{,}5 \times JCond89 + RQD/2 \qquad (25)$$

A aplicação direta do valor do *GSI* é estimar os parâmetros do critério de resistência de Hoek-Brown para os maciços rochosos. Embora não tenha sido destinado a ser uma classificação do maciço rochoso, o valor do *GSI*, de fato, reflete a qualidade do maciço rochoso.

5.6.1 Descrição geológica no quadro *GSI*

Quando se analisa um maciço rochoso específico, é sugerida que a seleção do caso apropriado no quadro *GSI* não deva ser limitada a semelhança visual com os esboços estrutural do maciço. As descrições devem ser descritas cuidadosamente, para que a estrutura mais adequada seja escolhida.

Figura 19- Quantificação do GSI pela condição das descontinuidades e RQD.



Fonte: (HOEK et al., 2013)

O uso do *GSI* exige um minucioso entendimento da engenharia geológica na caracterização do maciço rochoso, visto que, seus parâmetros fornecem uma descrição generalizada sobre a estrutura do maciço rochoso.

Hoek e Brown reconheceram que as características que controlam a deformabilidade e a resistência dos maciços rochosos são semelhantes às características determinadas pelos sistemas *RMR* e *Q* de classificação de maciços

rochosos, e sugeriram que as classificações poderiam ser usadas para estimar as constantes *mb* e s usadas na em sua equação de critério ruptura.

6 CONCLUSÕES

Nos projetos geotécnicos não é possível à obtenção de resultados confiáveis sem uma rigorosa caracterização e classificação dos parâmetros dos materiais envolvidos.

Quando se tenta obter resultados por meio de ensaios laboratoriais é possível notar que ocorre uma grande deficiência para classificação do maciço, pois a sua massa rochosa fica limitado no tamanho da amostragem e, portanto, representam uma amostra muito pequena e altamente seletiva da área escolhida a partir da qual eles foram removidos. Porém a correção é possível com a introdução de parâmetros obtido no levantamento da caracterização do maciço rochoso que é capaz de criar modelos (tipo de rocha, espessura das camadas, características das descontinuidades, água subterrânea, comportamento das rochas, etc.) que represente o maciço com o detalhamento, sendo possível fornecer informações necessárias para correlacionar com os parâmetros obtidos na classificação, com isso há uma união de informações juntando dois métodos, dando uma margem de informações mais confiante para um projeto.

Contudo ocorre uma vasta discussão sobre a classificação e seus métodos, nesse trabalho foi escolhido 03(três) sistemas, Deere (1967) como índice *RQD*, Bieniawski (1973, 1976 e 1989) com o índice *RMR* (*Rock Mass Rating*), Barton *et al*. (1974) com o índice de Qualidade de rocha o *Q*, Hoek (1994) com o sistema *GSI* (*Geological Strength Index*). Sendo esses os mais aceitos em projetos de mineração por ser de rápidas respostas, histórico de exemplos ao logo dos anos e um valor financeiro mais baixo.

As duas classificações do maciço rochoso *RMR* (BIENIAWSKI, 1973, 1976 e 1989) e *Q* (BARTON *et al*., 1974) incluem parâmetros geológicos, geométricos e de projeto em engenharia, na obtenção de um valor quantitativo que descreve a qualidade geomecânica do maciço rochoso. *RMR* e *Q* são sistemas parecidos já que usam parâmetros muito similares para o cálculo da qualidade final do maciço rochoso. A diferença destes sistemas está nos diferentes pesos atribuídos aos parâmetros similares entre eles, e no uso de diferentes parâmetros para avaliar uma mesma característica. A maior diferença entre os dois sistemas é a falta de um parâmetro de tensões no sistema *RMR* e a não consideração da orientação das descontinuidades com respeito à obra no sistema *Q*.

O sistema *Q* não considera diretamente a influência da orientação das descontinuidades nem a resistência da rocha intacta, a qual é considerada indiretamente no *RQD* (que se deve ter muito cuidado no processo de amostragem, perfuração, manuseio do equipamento e da amostra na representação a qualidade da rocha), no entanto este considera as propriedades da família de descontinuidades mais desfavoráveis no índice de rugosidade e no índice de alteração das paredes das descontinuidades, que contribuem para a resistência ao cisalhamento do maciço rochoso.

Sendo o sistema *Q* é o mais recomendado sob o ponto de vista de engenharia de minas, já que ele oferece uma descrição mais completa do maciço rochoso e é mais aplicado a escavações subterrâneas para quaisquer profundidades. Em alguns casos, é conveniente fazer uma análise paramétrica, adotar uma faixa de valores para cada parâmetro no sistema de classificação e fazer uma avaliação do significado dos resultados finais. Nesta análise paramétrica podem-se ter valores médios que permitem escolher o sistema de suporte básico, e os valores máximos e mínimos indicando os possíveis ajustes ou adaptações necessárias para o resto da variabilidade dos parâmetros.

É muito importante ressaltar que o sistema de classificação *RMR* foi originalmente baseado em casos da engenharia civil (túneis rasos) e por este motivo a indústria de mineração considera esta classificação algo conservativa. Uma classificação modificada do *RMR* apropriada para a engenharia de minas deve levar em conta as tensões in-situ, as tensões induzidas pelas obras de mineração, os efeitos da escavação a fogo e o grau de alteração ou intemperismo.

O *GSI* tem um papel importante não só para definir um modelo conceitual da geologia local, mas também para a quantificação necessária para análises.

Quando o *GSI* é realizado em conjunto com a modelagem numérica, a caracterização do maciço rochoso apresenta a perspectiva de uma melhor compreensão da mecânica do comportamento do maciço rochoso. O sistema *GSI* tem um potencial considerável para uso em mineração porque permite muitas características de um maciço de rocha a ser quantificado, aumentando assim à lógica geológica e reduzindo a incerteza de engenharia. Seu uso permite que a influência de variáveis, que compõem um maciço rochoso, a ser avaliado e, portanto, o comportamento dos maciços rochosos a ser explicado mais claramente. Uma das vantagens do *GSI* é que o raciocínio geológico é incorporado permitindo

ajustes de sua classificação para cobrir uma ampla gama de massas e condições de rocha, mas também nos permite compreender os limites da sua aplicação.

A caracterização assim como a classificação geomecânica é um tanto quanto complexa. Devido à variabilidade dos maciços a avaliação das propriedades geotécnicas e o aspecto sobre o qual recai o maior grau de incerteza.

Há necessidade em todos os projetos de engenharia de minas um levantamento geotécnico bem detalhado, que não seja só as propriedades do maciço rochoso, mas suas características geotécnicas.

Deve-se salientar o papel fundamental da monitorização e observação das obras no sentido de validar e calibrar os modelos geotécnicos e na avaliação das hipóteses assumidas. Neste domínio, as técnicas de retro análise revestem-se de particular importância no sentido de permitir e obter os parâmetros que melhor traduzem o comportamento observado recorrendo a ferramentas matemáticas adequadas.

REFERÊNCIAS

ABAD, J.; CELADA, B.; CHACÓN, E.; GUTIERREZ, V.; HIDALGO, E. Application of geomechanical classification to predict the convergence of coal mines galleries and to design their supports. In: CONGRESS ON ROCK MECHANICS, 5th., 1983, Melbourne. **Proceedings**. Melbourne: ISRM, 1983. p.00-00.

Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental; Comitê Brasileiro de Mecânica das Rochas. **Métodos para a descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos**. São Paulo, SP: ABGE/CBMR, 1983.132p.

AZEVEDO, I.C.D.; MARQUES, E.A.G. Introdução à mecânica das rochas. **Caderno Didático**, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, v. 85, p. 359-361, 2002.

BARTON, N. Some new Q value correlations to assist in site characterisation and tunnel design. **Int J Rock Mech Min Sci**, v. 39, n.2, p. 184-216, Fev. 2002.

BARTON, N.; CHOUBEY, V. The shear strength of rock rocks in theory and practice. **Rock mechanics**, New York, USA, v.10, n.1, p. 1-54, Dec. 1977.

BARTON, N.; CHOUBEY, V. The shear strength of rock joint in the theory and practice. **News Journal**, ISRM, p.1-54, Oct. 1978

BARTON, N.R.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. **Rock Mech**, p.189-239, Jun.1974.

BIENIAWSKI, Z. T. Rock mass classification in rock engineering. In: SYMPOSIUM ON EXPLORATION FOR ROCK ENGINNEERING, 1976, Johannesburg. **Proceedings…** Johannesburg: Balkema, 1976. p. 97-106.

BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering classification of jointed rock masses**, Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng., 15, pp. 335-344. Nov. 1973.

BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering rock mass classification**. New York: John Wiley & Sons, 1989. 251 p.

BIENIAWSKI, Z. T. **Rock mechanics design in mining and tunnelling**, Rotterdam/Boston: A. A. Balkema Publisher, 1984. p. 272.

BROWN, E.T. (ed.). **Rock characterization, testing and monitoring** – ISRM suggested methods. Oxford: Pergamon, 1981. p.171–183.

CAMARGO, W.M. et al. Novo enfoque na avaliação de segurança nos maciços rochosos de fundação de barragem de concreto. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 12., 1978, São Paulo. **Anais…** São Paulo: [s.n.], 1978. v.2, p.357-391.

CHOI, J. Y., LEE, C. I. An estimation of rock mass rating using 3D-indicator kriging approach with uncertainty assessment of rock mass classification. In: congress of the

International Society for Rock Mechanics, 11th. 2007, Lisbon. **Proceeding…** Lisbon, 2007. p. 285-288.

CHOI, Y.; YOON, S.Y.; PARK, H.D. Tunnelling analyst: a 3d gis extension for rock mass classification and fault zone analysis in tunnelling. **Computers & Geosciences**, v. 35, p. 1322-1333. Apr. 2009.

DEERE, D. U.; HENDRON, A. J.; PATTON, F. D.; CORDING, E. J**.** Design of surface and near surface construction in rock. In: FAILURE AND BREAKAGE OF ROCK SYMPOSIUM, 8th.1967, New York. **Proceedings**…. New York: C. Fairhurst Ed., 1967. p. 237-302.

DEERE, D. U.; PECK, R. B.; PARKER, H.; MONSEES, J. E.; SCHMIDT, B. Design of tunnel support systems. **High. Res. Rec**., n..339, p. 26-33, 1970.

DEERE, D.U.; Technical description of rock cores for engineering purposes. In: DEERE, D.U. **Rock mechanics and engineering geology**. p. 17-22,1964

DEERE, D.U.; DEERE, D.W. The rock quality designation (rqd) index in practice. In: KIRKALDIE, L. (ed.). **Rock classification systems for engineering purposes**. Philadelphia: ASTM,1988. p. 91-101.

EGAÑA, M.; ORTIZ, J.M. Assessment of RMR and its uncertainty by using geostatistical simulation in a mining project. **Journal of Geo Engineering**, v. 8, n. 3, p. 83-90, 2013.

EXADAKTYLOS, G.; STRAVOPOULOU, M.; XIROUDAKIS, G.; BROISSIA, M. de; SCHWARZ, H. Aspatial estimation model for continuous rock mass characterization from the specific energy of a TBM. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 41, n.6, p. 797- 834, Dec .2008.

FRANKLIN, J. A. Observations and tests for engineering description and mapping of rocks. In: INT. CONG. ROCK MECH., 2nd, 1970, Belgrade. **Proceeding...** Belgrade: ISRM, 1970. v.1, p 1-3.

GALERA FERNÁNDEZ, J. M. Caracterización geotécnica de macizos rocosos. In: LÓPEZ JIMENO, C. (ed.). **Manual de túneles y obras subterráneas**. Madrid: Entorno Grafico, S. L., 1997. p. 143-181.

GONZALEZ de VALLEJO, L.I. A new rock classification system for underground assessment using surface data. In: INT. SYMP. ENG. GEOL. 1983, Rotterdam. **Proceedings…** Rotterdam: Underground Constr.; A.A. Balkema, 1983. p. 85-94.

GOODMAN, R.E.; BRAY, J.W. Toppling of rock slopes. In: ASCE speciality conference on rock engineering for foundation sands lopes. Boulder, Colorado: [s.n.], 1976. v. 2, p. 201 – 34.

GRIMSTAD, E.; BARTON, N. Updating the Q-system for NMT. In: INT. SYMP.ON SPRAYED CONCRETE, 1993, Oslo. **Proceedings…** Oslo, Norway: Norwegian Concrete Association, 1993. 22 p.

GUIDICINI, G. et al. Um método de classificação geotécnica preliminar em meios rochosos. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4., 1972.São Paulo, ABGE, 1972. p. 275-283.

HOEK, E. **Strength of rock and rock masses**. News J: ISRM,1994. p. 4–16.

HOEK, E. & BROWN, E. T. **Underground excavations in rock**. Institution of Mining and Metallurgy, p. 527. London. 1980.

HOEK, E.; BROWN, E.T. Practical estimates of rock mass strength. **Int. Jr. Rock Mech. And Min. Sci**., Pergamon, v.34, n.8, p.1165-1186, 1997.

HOEK, E.; READ, J.; KARZULOVIC, A.; CHEN, Z. Y. Rock slopes in civil and mining engineering. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOTECHNICAL AND GEOLOGICAL ENGINEERING, 2000, Melbourne, 2000. p. 1-16. Disponível em: <https://www.rocscience.com/documents/hoek/references/H2000e.pdf>.

HOEK, E.; CARTER, T.G. E DIEDERICHS, M.S. Quantification of the geological strength index chart. In: SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 47th, 2013, San Francisco CA, USA, California, 2013. Disponível em: <https://www.rocscience.com/documents/pdfs/rocnews/fall2013/Quantification-GSI-Chart-Hoek-Carter-Diederichs.pdf>.

HOEK, E.; KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. **Support of underground excavations in hard rock.** Rotterdam: Balkema, 1995. 210p.

HUIJBREGTS, C. J. **Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data**. Display and analysis of spatial data. New York, 1975. p. 38-53.

IMAI, N. N.; VICENTE, J.; LIMA. D. L.; TACHIBANA, V. M.; SILVA, E. A.; VOLL, E.; OLIVEIRA, H. E. S. Análise comparativa da interpolação por krigagem ordinária e krigagem por indicação no caso de ervas daninhas em cultura de soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 21., 2003. 1CD-ROM.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics.** New York: Oxford University press, 561 p,1979
POR EXTENSO (ISRM). Suggested methods for the quantitative descriptions of descontinuites in rock masses. **Intl.J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech**. **Abstr.**, v.15, p.319-388,1978.

Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas. Basic geotechnical description of rock masses. Int. Society for Rock Mechanics, Commission on the Classification of Rocks and Rock Masses. **Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. Geomech. Abstr.,** 18, p. 85-110, 1981.

JOURNEL, A.G. Nonparametric estimation of spatial distributions. **Journal of the International Association for Mathematical Geology**, v. 15, n. 3, p. 445-468, 1983.

KAEWKONGKAEW, K.; PHIEN, N.; HARNPATTANAPANICH, T.; SUTIWANICH, C. **Geological model of mae tang-mae ngad diversion tunnel project, northern thailand**. Open Journal of Geology, 3 (5), p. 340-351,2013.

KENDORSKI, F.; R. CUMMINGS; Z. T. BIENIAWSKI; AND E. SKINNER: **Rock mass classification for block caving mine drift support**. Proc. 5th Int. Congr. Rock Mech., ISRM, Melbourne, p. 51-63,1993.

KNILL J. Core values (1st Hans-Closs lecture). **Curso de mecânica das rochas**. Universidade Federal de Ouro Preto, p. 91,1981.

Associação Internacional de Geologia de Engenharia.**Rock and soil description and classification for engineering geological mapping.** IAEG, v.24, p.235-274,1981.

LANDIM, P. M; B., STURARO, J. R. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de risos**. IGCE/UNESPE, p.20. 2002.

LAUBSCHER, D. H. **Geomechanics classification of jointed rock massesmining aplications**. Trans. Inst. Min. Metall 86,p. A1-A7.1977.

LOUIS, C.**A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses**, Rel. Pesquisa no 10 Rock Mechanics Section, Imperial College, Londres, p. 00-00,1969

MAGALHÃES, F.S.; CELLA, P.R.C. **Estruturas dos maciços rochosos**. Geologia de Engenharia, São Paulo, ABGE, p. 39-55,1998.

MERRITT, A. H. **Geologic prediction for underground excavations**. Proc. Rapid. Excav. Tunneling Conf., AIME, p.115-132. N.Y .1972.

MÜLLER L. **Der felsbau**. Enke Ferlag. p.00-00, 1963.

NEWMAN, D.A; AND BIENIAWSKI, Z.T: "**Modified version of the geomechanics classification for entry design in underground coal mines**." Trans. Soc. Min.Eng. AIME 280, p. 2134-2138.1986.

OH, S.; CHUNG, H.; LEE, D. K. **Geostatistical integration of MT and borehole data for RMR evaluation**. Enviromental Geology, 46, p. 1070-1078, 2004.

OLIVEIRA, Manoel dos Santos; DE BRITO, Sérgio Nertan Alves. Geologia de
ORELLANA, E. **Prospeccion geoletrica en corriente continua**. Madri: Paraninfo, p. 523.1972.

PACHER, F.; RABCEWICZ, L.; GOLSER, J.Zum **Der seitigen stand der gebirgsklassifizierung in stollen-und tunnelbau**. Proc. XXII Geomech. Colleq. Salzburg, p. 51-58,1974.

PACHER, F.; RABCEWICZ, L; and GOLZER, **J. Zum der seitigen stand der gebirgesklassifizierung in Stollen-und Tunnelbau**. Proc XXII Geomech. Collog., Salzburg.p. 51-58,1974.

PALMSTRÖM A; SINGH R: "**The deformation modulus of rock masses – comparisons between in situ tests and indirect estimates**." Tunneling Underground Space Technol. p.115-131,2001.

ROCHA, M. **Mecânica das rochas**. Lisboa: LNEC. p.445,1981.

ROMANA, M: "**New adjustment ratings for application of bieniawski classification to slopes**." Proc. Int. Symp. Rock Mech. Excav. Min. Civ. Works, ISRM, p. 59-68, São Paulo,1985.

SERAFIM, J.L; E PEREIRA J.P: "**Consideration of the geomechanics classification of Bieniawski**." Proc. Int. Symp. on Engineering Geology and Underground construtions, p. 1133-1144, 1983.

SJOGREN, B., OFSTHUS, A E SANDBERG, J. **Seismic classification of rock mass qualities**. Geophysical Prospecting, n.27, p.409-442. 1979

SMITH, M. L.; WILLIAMS, R. E. **Indicator kriging for selective remediation**.: University of Idaho, 43, pp. 23-30. Moscow .1996.

SNOW, D.T. **Rock fracture spacings, openings and porosities**, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, p.73-91,1968.

SOARES, L. **Determinação do grau de coerência de rochas brandas**, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos da USP- Universidade de São Paulo,p. 00-00, 1991.

STAVROPOULOU, M.; EXADAKTYLOS, G.; SARATSIS, G. **A combined three-dimensional geological-geostatistical-numerical model of underground excavations in rock**. Rock mechanics and rock engineering, p.213-243 ,2007.

STEWART, S.B.V., FORSYTH, W.W. **The mathews method for open stope desing**. CIM Bulletin, p. 45-53 ,1995.

TERZAGHI, K. **Rock defects and loads on tunnel supports**. Harvard University, p. 17-99. Cambridge,1946.

TERZAGHI, K., **Theoretical soil mechanics**, John Wiley and Sons, New York , p. 00-00,1943.

THEMAG ENGENHARIA. **Tabelas, críterios e modelos paa descrição de sondagens.** http://www.themag.com.br/. 2012.

TOGNON, A.A. **Glossário de termos técnicos de geologia de engenharia**, São Paulo: ABGE, p.139, 1985

ULUSAY, R.; HUDSON, J.A., **Suggested method for determining point load strength**. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization. p. 53-60 .1985.

UNAL, E. **Design guidelines and roof control standards for coal mine roofs,** Ph.D. thesis, University Park. p 355. Pennsylvania. 1983.

VENKATESWARLU, V. **Geomechanics classification of coal measure rocks vis-à-vis roof supports**. Ph.D. thesis, Indian School of Mines, Dhanbad, p.251,1986

WAHLSTROM, E. E. "**Tunneling in rock**". Ed. Elsevier scientific publishing company. p. 250,1973.

WEAVER, K.D.; BRUCE, D. A. **Dam foundation grouting**: revised and expanded.p.00-00, 2007.

WICKHAM, G.E., TIEDEMANN, H.R., SKINENR, E.H. **Support determination based on geologicpredictions**. Proc. North American rapid excav. tunneling conf, p. 43-64 1972.

YAGIZ, S. **Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer**. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 68 (1), p. 55 e 63, 2009.

YOU, K.; LEE, J.S. Estimation of rock mass classes using the 3-dimensional multiple indicator kriging technique. **Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research**, v. 21, n. 3/4, p. 229-234, 2006.

ZEIGLER, Timothy W. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. **Determination of rock mass permeability**: final report. Vicksburg: U.S.: Dept. of Defense, Dept. of the Army, Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Soils and Pavements Laboratory, p. 00-00, 1976.

ZHAO, J. **Rock mechanics for civil engineers**. Switzerland : Swiss Federal Institute of Technology Lausanne,p. 00-00, 2008.