

Universidade Federal de Minas Gerais
Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas

Tese de Doutorado

**“Contribuição à Caracterização
Geológica-Geomecânica no
Quadrilátero Ferrífero”**

Autora: Cláudia Aparecida Nonato
Orientadora: Prof^a. Maria de Fátima Andrade Gripp

Março / 2002

Cláudia Aparecida Nonato

**CONTRIBUIÇÃO À CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOMECÂNICA
NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

**Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Metalúrgica e de Minas
da Universidade Federal de Minas Gerais**

**Área de concentração: Tecnologia Mineral
Orientadora: Prof^a. Maria de Fátima Andrade Gripp**

**Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2002**

FOLHA DE APROVAÇÃO

*“Tudo responde ao chamado da alegria;
tudo se reúne onde a vida é um canto.”*

Cristiano D. Larson

AGRADECIMENTOS

A autora agradece a todos aqueles que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a elaboração deste trabalho, e em particular:

À Professora Maria de Fátima, minha orientadora, pelo acompanhamento, paciência, atenção constante, sugestões e amizade a mim dedicada;

À Jacqueline Andrade Nogueira, colega de doutorado, pela amizade e pelo auxílio na realização dos testes de laboratório;

À MBR (Minerações Brasileiras Reunidas), pelo acesso aos relatórios internos e pelo fornecimento de amostras para a realização dos ensaios de laboratório;

À FAPEMIG, Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais, pelo apoio recebido;

À URBEL, Companhia Urbanizadora de Belo Horizonte, pela liberação parcial de horários de trabalho;

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro durante parte do tempo de execução do trabalho;

Aos funcionários da Mineração Itanorte, Mineração Rio Bravo, Mina de Água Santa e Pedreira 12, pelo apoio durante a coleta de dados de campo;

SUMÁRIO

RESUMO	16
ABSTRACT	17
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	18
1.1 - Relevância e Justificativa	18
1.2 - Objetivos	20
1.3 - O Quadrilátero Ferrífero: características gerais na Região Metropolitana de Belo Horizonte	21
1.3.1 - Aspectos geomorfológicos	21
1.3.2 - Clima	21
1.3.3 - Situação dos taludes naturais	22
1.3.4 – Hidrologia na Região Metropolitana de Belo Horizonte.....	22
1.3.4.1- Drenagem Superficial.....	22
1.3.4.2 - Águas subterrâneas	22
1.3.5 - Alteração - Espessura do Manto de Intemperismo - Tipos de Solos	23
1.4 Referências Bibliográficas	23
CAPÍTULO 2: CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA.....	26
2.1 – Introdução	27
2.2 – Revisão da Literatura	27
2.2.1 - Litologia	27
2.2.2 - Grau de alteração dos maciços rochosos	28
2.2.2.1 – Classificações de rochas e solos	28
2.2.2.2 – Caracterização do estado de alteração	30
2.2.2.3 – Exemplos de avaliação da alteração de maciços rochosos.....	34
2.2.2.4 – Relação entre a resistência à compressão uniaxial e as classes de alteração	40
2.2.3 - Grau de fraturamento dos maciços	45
2.2.4 - Caracterização geomecânica das descontinuidades	45

2.2.4.1 - Parâmetros comumente usados na descrição das descontinuidades e maciços	47
2.3 – Metodologia.....	48
2.3.1 – Descrição litológica.....	48
2.3.2 – Avaliação do grau de alteração	49
2.3.3 – Avaliação do grau de coerência e de fraturamento dos maciços	49
2.3.4 – Caracterização geomecânica das descontinuidades	49
2.4 – Resultados e Discussão	50
2.4.1 – Descrição das áreas mapeadas	50
2.4.2 – Mineração Itanorte.....	52
2.4.3 – Mineração Rio Bravo	56
2.4.4 – Mina de Água Santa	57
2.5- Conclusões	60
2.6 – Referências Bibliográficas.....	60
CAPÍTULO 3: ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES	64
3.1 – Introdução	64
3.2 – Revisão da Literatura	65
3.2.1 - Identificação das Descontinuidades.....	65
3.2.2 – A Técnica “Scanline”	66
3.3 – Metodologia.....	69
3.3.1 – Identificação das descontinuidades.....	69
3.3.2 – Levantamento de dados	69
3.3.3 – Construção de diagramas de freqüência e de histogramas com as medidas de espaçamento	70
3.4 – Resultados e Discussão	70
3.5 – Conclusões	82
3.6 – Referências Bibliográficas.....	83

CAPÍTULO 4: PARÂMETROS PARA PROJETOS DE ENGENHARIA DE TALUDES	84
4.1- Introdução	84
4.2 – Revisão da Literatura	86
4.2.1– Identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha	86
4.2.2 – Determinação de parâmetros físicos através de testes de laboratório	91
4.2.2.1 - Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta	92
4.2.2.2 - A velocidade do som na avaliação do grau de fissuramento do maciço rochoso	94
4.2.2.3 – Resistência à tração medida através do ensaio brasileiro	97
4.2.3 - Fluxo de água subterrânea em maciços rochosos.....	100
4.2.3.1 - Modelos de fluxo em maciços rochosos	102
4.2.3.2 - Condutividade hidráulica de uma família de descontinuidades	104
4.3 – Metodologia	107
4.3.1 – Identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha	107
4.3.2 – Determinação da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta	107
4.3.2.1 – Obtenção das amostras de rocha	107
4.3.2.2 – Preparação das amostras	107
4.3.2.3 – Realização dos testes	108
4.3.2.4 – Determinação da densidade relativa das amostras de rocha	108
4.3.3 – Determinação da velocidade do som para se avaliar o grau de fissuramento do maciço rochoso	108
4.3.4 – Determinação da resistência à tração através do ensaio brasileiro	110
4.3.5 – Apresentação dos resultados referentes aos itens 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4	111
4.3.6 – Determinação da condutividade hidráulica de uma família de descontinuidades.....	111
4.4 – Resultados e Discussão	111
4.4.1– Tipos de ruptura de taludes em rocha.....	111
4.4.2 – Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta	118
4.4.3 A velocidade do som na avaliação do grau de fissuramento do maciço rochoso.....	125
4.4.4 – Resistência à tração	126

4.4.5 – Condutividade hidráulica de uma família de descontinuidades.....	126
4.5 – Conclusões.....	135
4.6 – Referências Bibliográficas.....	138
CAPÍTULO 5: ESTABELECIMENTO DE MODELO GEOMECÂNICO COM O AUXÍLIO DO PROGRAMA UDEC (UNIVERSAL DISTINCT ELEMENT CODE)140	
5.1 - Introdução.....	141
5.2 - Revisão da Literatura.....	142
5.2.1 – O método dos Elementos Distintos	142
5.3 – Ruptura de um talude em maciço rochoso	143
5.4 – Exemplo de aplicação do programa UDEC – O talude sul da Mina de Águas Claras.....	146
5.4.1 – A Mina de Águas Claras.....	146
5.4.2 – O Lago de Águas Claras	148
5.5 – Conclusão	153
5.6 – Referências bibliográficas	153
CAPÍTULO 6: COMENTÁRIOS FINAIS	154
6.1 – Caracterização geológica-geomecânica	155
6.2 – Espaçamento das descontinuidades.....	156
6.3 – Parâmetros para os projetos de engenharia de taludes.....	157
6.3.1 – Identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha.....	157
6.3.2 – Determinação de parâmetros físicos através de testes de laboratório	158
6.3.3 – Fluxo de água subterrânea em maciços rochosos.....	159

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 – Fluxograma para identificação dos tipos de solo.....</i>	<i>32</i>
--	-----------

<i>Figura 2.2 – Características principais dos horizontes de um perfil de alteração de rochas ígneas e metamórficas e respectivas soluções típicas para taludes de corte, segundo Deere & Patton (1971).</i>	33
<i>Figura 2.3 – Perfil de intemperismo para regiões tropicais, segundo Vaz (1996a).</i>	39
<i>Figura 2.4 – Resistência à compressão uniaxial e classes de alteração, segundo Vaz (1996a).</i>	42
<i>Figura 2.5 - Talude 05, mapeado na Mineração Itanorte.</i>	51
<i>Figura 2.6 - Talude 01, mapeado na Mineração Rio Bravo.</i>	51
<i>Figura 2.7 - Parte do talude constituído por itabirito mole, intercalado por hematita compacta e hematita pulverulenta, mapeado na Mina de Água Santa.</i>	52
<i>Figura 2.8 - Vista parcial do talude 05, na Mineração Itanorte.</i>	54
<i>Figura 2.9 - Detalhe para blocos em itabirito duro, no talude mapeado na Mineração Rio Bravo.</i>	58
<i>Figura 3.1. Coleta de dados de espaçamento utilizando a técnica da scanline, modificada de Brady & Brown (1985)</i>	68
<i>Figura 3.2- Vista parcial de talude constituído pela alternância de filitos e quartzitos (Formação Cercadinho, Quadrilátero Ferrífero).</i>	72
<i>Figura 3.3 – Parte de talude em filito prateado, Formação Cercadinho, Grupo Piracicaba, localizado na Av. Raja Gabaglia – Belo Horizonte.</i>	73
<i>Figura 3.4 – Porção de talude em quartzito (Formação Cercadinho, Grupo Piracicaba), localizado na Av. Raja Gabaglia, Belo Horizonte.</i>	74
<i>Figura 3.5 (a) – Diagramas de frequência elaborados para as superfícies de descontinuidade identificadas na Formação Cercadinho.</i>	76
<i>Figura 3.5(b) – Diagramas de frequência construídos para as superfícies de descontinuidade identificadas na Formação Cercadinho.</i>	77
<i>Figura 3.6 – Histogramas relativos ao espaçamento da família 1 de descontinuidades.</i>	78
<i>Figura 3.7 – Histogramas construídos para a família de descontinuidades 2, referentes aos taludes 9 e 15.</i>	79
<i>Figura 3.8 – Histogramas relativos aos taludes 9 e 12, para a família de descontinuidades 3.</i>	80
<i>Figura 3.9 – Histogramas relativos aos espaçamentos medidos no campo para as famílias de descontinuidades 1, 2 e 3, considerando-se todas as medidas feitas em todos os taludes da área em estudo.</i>	81
<i>Figura 4.1 - Mecanismos de ruptura para taludes em rocha. a) ruptura planar; b) ruptura em cunha; c) tombamento de blocos.</i>	88
<i>Figura 4.2 – Ruptura planar em estágios, resultante da combinação de várias descontinuidades conectadas entre si.</i>	89

<i>Figura 4.3 - Esquemas de : a) ruptura circular; b) sulco ou ravinamento; c) colapso de blocos.</i>	90
<i>Figura 4.4 – Teste de resistência à compressão uniaxial.</i>	93
<i>Figura 4.5 - Gráfico para classificação do grau de fissuramento em amostras de rocha.</i>	98
<i>Figura 4.6 – Representação do ensaio brasileiro.</i>	99
<i>Figura 4.7 - Esquemas simplificados da distribuição de pressão de água para a análise da estabilidade de taludes.</i>	101
<i>Figura 4.8 - Grupos de maciços rochosos, segundo Louis (1976).</i>	103
<i>Figura 4.9 - Meios contínuos (1) e (2) e descontínuos (3) e (4) na avaliação dos problemas relacionados ao fluxo de água subterrânea.</i>	106
<i>Figura 4.10 - Parâmetros hidráulicos de um maciço rochoso</i>	106
<i>Figura 4.11 – Layout simplificado dos componentes eletrônicos utilizados na medida da velocidade do som em amostras de rocha.</i>	110
<i>Figura 4.12 – Detalhe para ruptura planar em talude construído em xisto, próximo ao bairro Jonas Veiga, BH.</i>	113
<i>Figura 4.13 – Tombamento de blocos centimétricos ocorrido em talude construído em quartzo-xisto, na altura do bairro Pirineus, BH.</i>	114
<i>Figura 4.14 – Colapso de bloco em talude em quartzo-xisto, na altura do bairro Pirineus, BH.</i>	115
<i>Figura 4.15 – Ravina surgida em talude em xisto muitíssimo alterado, na altura do bairro Jonas Veiga, BH.</i>	116
<i>Figura 4.16 – Saprólito de xisto, observado em talude construído em estrada, na altura do bairro Jonas Veiga, BH.</i>	117
<i>Figura 4.17 – Histograma relativo aos testes de resistência à compressão uniaxial, realizados em 18 amostras de itabirito dolomítico.</i>	120
<i>Figura 4.18 – Histograma relativo aos valores encontrados para o módulo de elasticidade em 18 amostras de itabirito dolomítico.</i>	120
<i>Figura 4.19 – Curvas resistência x deformação específica relativas a testes de resistência à compressão uniaxial realizados em 7 amostras de itabirito dolomítico.</i>	121
<i>Figura 4.20 – Curvas resistência x deformação específica relativas a testes de resistência à compressão uniaxial realizados em 7 amostras de itabirito dolomítico.</i>	122
<i>Figura 4.21 - – Curvas resistência x deformação específica relativas a testes de resistência à compressão uniaxial realizados em 3 amostras de itabirito dolomítico.</i>	123
<i>Figura 4.22 – Histogramas relativos às medidas de velocidade do som em amostras de itabirito dolomítico.</i>	128

<i>Figura 4.23 –Histograma elaborado com os valores de IQ (índice de qualidade do maciço rochoso).</i>	131
<i>Figura 4.24 – Histogramas elaborados para os resultados de resistência à tração. Histograma A: furo 03/84. Histograma B: furo 09/85. Histograma C: resultados dos dois furos juntos....</i>	133
<i>Figura 4.25 – Talude em gnaíse, mapeado na Pedreira 12.</i>	134
<i>Figura 4.26 – Detalhe para família de descontinuidade, cuja orientação é 098/03, identificada na Pedreira 12.</i>	136
<i>Figura 4.27 – Histograma elaborado a partir de 105 medidas de espaçamento da família de descontinuidades identificada na Pedreira 12.</i>	137
<i>Figura 5.1 - Geometria do problema relativo ao estudo da estabilidade de talude em maciço rochoso fraturado seco.</i>	145
<i>Figura 5.2 - Simulação em que se considera o espaçamento das descontinuidades como 0,5 e 0,75m, sem alterar as outras propriedades do maciço.</i>	145
<i>Figura 5.3 - Deslocamento de blocos no talude, ângulo de atrito 0°, com par de valores de espaçamento 2,0/3,0 metros, e inclinação da face do talude igual a 60°.</i>	147
<i>Figura 5.4 - Deslocamento dos blocos do talude, ângulo de atrito 20° com par de valores de espaçamento 2,0/3,0 metros, e inclinação da face do talude igual a 89°.</i>	147
<i>Figura 5.5 – Disposição de litologias no talude sul, e blocos deformáveis utilizados no programa UDEC.</i>	151
<i>Figura 5.6 – Vetores relacionados aos deslocamentos no talude sul, gerados na área do filito dolomítico.</i>	151
<i>Figura 5.7 – Simulação realizada no talude sul, considerando o nível de água subterrânea igual a 1080m.</i>	152
<i>Figura 5.8– Simulação realizada no talude sul, considerando o nível de água subterrânea igual a 950m</i>	152

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela II.1 – Graus de alteração de rochas segundo o IPT.</i>	36
<i>Tabela II.2 – Classificação de rochas quanto ao grau de coerência.</i>	36
<i>Tabela II.3 – Graus de alteração / coerência considerados na caracterização geomecânica da Mina de Águas Claras.</i>	37
<i>Tabela II.4 – Metodologia adotada pela CVRD para a avaliação do grau de Alteração das rochas.</i>	38

<i>Tabela II.5 – Determinação do campo de variação da r.c.u. de solos e rochas, segundo a ISRM.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela II.6 – Reação ao martelo para os grupos de rocha, segundo Hoek.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabela II.7 – Grupos de rocha para a aplicação do perfil de intemperismo.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabela II.8 – Grau de fraturamento dos maciços rochosos.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela II.9 – Caracterização das descontinuidades com base na escala de observação.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela III.1 – Valores de espaçamento médio por família de descontinuidades, por talude analisado.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela III.2 – Espaçamentos médios e modais das famílias de descontinuidades, considerando todos os taludes ao mesmo tempo.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela IV.1 – Classificação das rochas com base na r.c.u. e na r. à tração.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabela IV.2 - Quadro-resumo exibindo os resultados dos testes de r.c.u.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabela IV.3- Densidade relativa do itabirito dolomítico.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabela IV.4-Velocidade da onda sonora medida em amostras de itabirito.....</i>	<i>127</i>
<i>Tabela IV.5-Composição mineralógica básica para o itabirito dolomítico.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabela IV.6-Índice de qualidade do maciço rochoso, para o itabirito.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabela IV.7-Resultados relativos aos ensaios de tração em itabirito.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabela V.1 – Parâmetros geomecânicos utilizados no modelamento feito com o programa UDEC.....</i>	<i>149</i>

LISTA DE NOTAÇÕES

Capítulo 1

Q = sistema Q de classificação do maciço rochoso

RMR = sistema RMR “Rock Mass Rating”

RQD = índice de qualidade de rocha “rock quality designation”

SMR = sistema SMR “Slope Mass Rating”

Capítulo 2

J_w = fator relativo à presença de água subterrânea

N = dureza de Schmidt

N_x = diâmetro equivalente a 54mm

Q = sistema Q de classificação do maciço rochoso

RAD = rocha medianamente alterada

RAM = rocha muito alterada

RCU = resistência à compressão uniaxial

RMR = sistema RMR “Rock Mass Rating”

RQD = índice de qualidade de rocha “rock quality designation”

RS = rocha sã ou praticamente sã

SMR = sistema SMR “Slope Mass Rating”

SRF = fator relativo ao campo de tensões (ou à presença de zonas de cisalhamento)

\emptyset = diâmetro do corpo de prova

Capítulo 3

D = distância até o ponto em que a descontinuidade intercepta a scanline

L = comprimento da descontinuidade, medido acima da scanline

x_i = espaçamento entre duas descontinuidades

x_{i0} = espaçamento verdadeiro

α = ângulo entre a normal à descontinuidade e a scanline

Capítulo 4

A = área inicial da seção transversal de corte

b = distância média entre os planos que compõem as famílias de descontinuidades (espaçamento entre as descontinuidades)

C_i = proporção em volume do mineral i na rocha

D = diâmetro

d = densidade relativa da amostra de rocha

e = abertura média das descontinuidades ou fissuras

E = módulo de elasticidade

F = força aplicada

g = aceleração da gravidade ($9,81 \text{ cm/s}^2$)

H = comprimento da amostra

$IQ\%$ = relação entre a velocidade das ondas longitudinais medida, e a velocidade calculada

k = condutividade hidráulica de uma família de descontinuidades

k_f = coeficiente de permeabilidade do material de preenchimento das descontinuidades

k_m = coeficiente de permeabilidade da rocha intacta

L = comprimento do corpo de prova

$n_p\%$ = porosidade da rocha não fissurada, expressa como uma porcentagem

P = carga aplicada até ruptura numa prensa apropriada

P_p = peso do picnômetro vazio

P_{p+a} = peso do picnômetro + água

P_{p+r} = peso do picnômetro + peso da rocha seca

P_{p+r+a} = peso do picnômetro + rocha + água

V_l = medida da velocidade de ondas sonoras em um corpo de prova de faces paralelas (m/s)

V_l^* = velocidade das ondas longitudinais que o corpo de prova teria, se não possuísse poros ou fissuras

$V_{l,i}$ = velocidade das ondas longitudinais do mineral constituinte das rochas i

Δt_l = tempo de percurso da onda longitudinal

ν = coeficiente de viscosidade cinemática

ν = coeficiente de Poisson

σ_c = resistência à compressão

σ_{xx} = resistência à tração

RESUMO

Esta tese apresenta os resultados de trabalhos relacionados à caracterização geológica-geomecânica realizada em maciços rochosos do Quadrilátero Ferrífero, MG. O capítulo 1 apresenta a introdução: relevância, justificativa, objetivos e breve revisão dos aspectos gerais do Quadrilátero Ferrífero. Nos capítulos 2 a 5, para cada assunto abordado no capítulo, tem-se a revisão bibliográfica, a metodologia utilizada, os resultados encontrados e as conclusões obtidas. No capítulo 2, a determinação do grau de alteração e do grau de coerência dos maciços é discutida. O potencial de aplicação do índice RQD ("rock quality designation") e dos sistemas de classificação de maciços rochosos RMR ("rock mass rating"), Q e SMR ("slope mass rating") é verificado. No capítulo 3, as dificuldades encontradas no estudo do espaçamento das descontinuidades são salientadas. No capítulo 4, alguns parâmetros necessários aos projetos de engenharia de taludes são estudados. A identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha é abordada. Os testes para caracterização da rocha intacta são discutidos: teste para determinação da resistência à compressão uniaxial, da resistência à tração e a medida da velocidade do som para avaliar o grau de fissuramento. As dificuldades encontradas são salientadas. A avaliação da condutividade hidráulica em maciços rochosos é discutida. O estabelecimento de modelo geomecânico é estudado no capítulo 5 e um exemplo é apresentado. O capítulo 6 apresenta os comentários finais e sugestões para desenvolvimentos futuros.

ABSTRACT

This thesis presents the work results relating to geological-geomechanical characterization carried out for rock masses of the Quadrilátero Ferrífero, MG. The chapter 1 presents the introduction: importance, justificative, purposes and a brief review about general aspects of the Quadrilátero Ferrífero. In chapters 2 to 5, for each approached subject, the bibliographic review, the applied methodology, the found results and the obtained conclusions are presented. In chapter 2, the rock weathering grade and coherency grade classifications are discussed. The prospects of application of the RQD ("rock quality designation") index and of the RMR ("rock mass rating"), Q and SMR ("slope mass rating") rock mass classification systems are verified. In chapter 3, the problems concerning the spacing of discontinuities are emphasized. In chapter 4, some essential parameters to slope engineering projects are studied. The identification of failure mechanisms in rock slopes is approached. The characterization tests for rock materials are discussed: the uniaxial compressive strength test, the tensile strength test and the determining of sound velocity to evaluate the fissuring grade. The problems concerning this work are emphasized. The hydraulic conductivity evaluation in rock masses is discussed. The elaborating of a geomechanical model is studied in chapter 5. A case example from an iron ore mine is presented. The chapter 6 presents the final comments and some suggestions for works in the future.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a relevância e justificativa de realização deste trabalho, bem como seus objetivos. Uma breve descrição de características gerais do Quadrilátero Ferrífero também é apresentada.

1.1 - Relevância e Justificativa

Os trabalhos relacionados à geomecânica e mais especificamente à estabilidade de taludes e encostas são essenciais no Estado de Minas Gerais, especialmente na região do Quadrilátero Ferrífero, onde a atividade de mineração é intensa, a topografia é acidentada, o clima apresenta estação chuvosa marcante, e a densidade demográfica é alta.

Além disso, deve-se considerar o próprio conhecimento da geomecânica regional. Observa-se que, em geral, não existem estudos geomecânicos nas pequenas minas e pedreiras. O mesmo pode acontecer em empresas que possuem um grupo de trabalho que assegura a utilização de uma abordagem de engenharia apropriada à solução dos problemas (Gripp & Nonato, 1996). A falta de uma abordagem de engenharia em pequenas minas tem sido observada ao longo das décadas e constitui problema grave, com grandes implicações ambientais e para a segurança.

A estabilidade de taludes é um dos problemas que conduzem ao estudo geomecânico, já que, para a elaboração do projeto de engenharia de taludes este estudo é essencial. No contexto das atividades de mineração, aspectos relevantes como a segurança dos operários e equipamentos, a operacionalidade e economicidade do processo de lavra dentre outros, estão diretamente relacionados à questão da estabilidade de taludes. A viabilidade de um empreendimento de mineração é condicionada pelo projeto dos taludes finais, que, por sua vez, é essencial no desenho da cava final. Pequenas modificações no ângulo dos taludes podem implicar em uma diferença de milhões de toneladas na quantidade de estéril a ser removido, envolvendo somas da ordem de milhões de dólares. Havendo falha no projeto de engenharia, acidentes podem acontecer. As implicações dos escorregamentos podem

ser pequenas e locais, ou assumirem grandes proporções. Estas implicações devem ser avaliadas.

Na mineração a céu aberto, comumente se utiliza o grau de alteração/coerência na avaliação das condições de resistência dos maciços. Foi possível examinar vários relatórios das principais empresas mineradoras de ferro do Estado de Minas Gerais, e observar que esta abordagem é utilizada desde a década de 70. Porém, apesar da facilidade de classificação das rochas segundo esta abordagem, muitas empresas não a utilizam, nem qualquer uma das outras formas de se avaliar as características geomecânicas dos maciços.

Normalmente, a operação de sondagem é realizada na fase de pesquisa do depósito mineral. Os dados obtidos são analisados e considerados para o maciço rochoso durante longo tempo após a abertura da mina. Furos de sonda esparsos normalmente são realizados posteriormente mas, tanto na primeira fase de execução dos furos quanto algum tempo depois, não há preocupação (com raras exceções) de se avaliar os parâmetros geomecânicos a partir dos testemunhos obtidos.

O RQD (Deere, 1967) é determinado em alguns locais (exemplo: Mina de São Bento, localizada em Santa Bárbara, MG). Ensaios de laboratório são feitos esporadicamente. Entretanto, o número de amostras coletadas (cerca de 5 ou 6 para cada tipo de rocha, o que não comporta um tratamento estatístico) e o número de corpos de prova não são suficientes para se fazer considerações em toda a área abrangida pela mina (exemplo: Mina de Águas Claras, pertencente à MBR - Minerações Brasileiras Reunidas S.A). Ensaios "in situ" raramente são executados.

A ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia) reúne um grupo de profissionais que atua nesta área e tem desenvolvido um trabalho relevante nas últimas décadas. Ela é responsável pela divulgação das recomendações da ISRM (International Society of Rock Mechanics), aplicadas em muitos casos para a caracterização e classificação dos maciços rochosos e determinação de suas propriedades. Embora a metodologia básica seja conhecida, vários trabalhos foram realizados para a obtenção de melhores resultados na região do Quadrilátero Ferrífero.

Pode-se citar, dentre outros, o trabalho de Almeida & Fontoura (1993), que avalia a

estabilidade de taludes exclusivamente em itabiritos, a partir de sistemas de classificação; o trabalho de Chapadeiro (1993), que estuda a estabilidade de taludes a partir de classificação geomecânica em área metropolitana; o trabalho de Scarpelli (1994), que estuda a aplicação de classificações geomecânicas em minas de minério de ferro; o trabalho de Nonato (1994), que estuda a utilização de classificações de maciços rochosos na avaliação da estabilidade de taludes em pequenas minas, pedreiras e em taludes urbanos; e o trabalho de Durand (1995) que estuda a estabilidade de taludes a partir de classificação geomecânica na mineração. Ressalta-se ainda a importância dos trabalhos de Franca (1997), que analisou a estabilidade de taludes usando métodos numéricos e de equilíbrio-limite, na Mina de Águas Claras (MBR); Pimenta (1999), que elaborou um programa de computação para a aplicação de classificações de maciços rochosos na avaliação da estabilidade de taludes, e de Lana (2000), que utiliza métodos probabilísticos e geoestatísticos para a estimativa da probabilidade de ocorrência dos mecanismos de ruptura na Mina de Timbopeba, em Mariana, MG.

Destaca-se a importância da experiência adquirida nos trabalhos anteriormente citados, para a realização desse trabalho.

1.2 - Objetivos

A literatura apresenta diversas abordagens para determinação das características geológicas e geomecânicas do maciço rochoso. Entretanto, estas abordagens não têm se mostrado satisfatórias. Do período de 1992 até o momento temos desenvolvido estudos que permitiram entender melhor esta questão. Temos também trabalhado na coleta, tratamento e análise de dados.

Este trabalho se propõe a:

1) Aumentar o nível de conhecimentos para projetos de engenharia de taludes no Quadrilátero Ferrífero, MG, através da caracterização geológica-geomecânica de maciços rochosos, estudo de banco de dados e análise dos resultados obtidos.

Para isso, pretende-se utilizar os seguintes meios:

- dados de campo provenientes de trabalhos de levantamento geomecânico efetuado

Excluído: mapeamento

tanto em uma mina de grande porte (Águas Claras, Minerações Brasileiras Reunidas S.A.), em pequenas minas (Minerações Itanorte, Rio Bravo, Água Santa e Pedreira 12) e em taludes urbanos, localizados em Belo Horizonte/MG ;

- classificações de maciços rochosos, mais especificamente os sistemas RMR (Bieniawski, 1973), Q (Barton, 1974) e SMR (Slope Mass Rating - Romana, 1988), com destaque para uma melhor avaliação do parâmetro espaçamento das descontinuidades (capítulos 2 e 3) ;

2) Estudar os parâmetros básicos para os projetos de engenharia de taludes, e a importância de se estabelecer um modelo geomecânico adequado ao maciço rochoso avaliado (capítulos 4 e 5);

1.3 - O Quadrilátero Ferrífero: características gerais na Região Metropolitana de Belo Horizonte

1.3.1 - Aspectos geomorfológicos

Segundo Silva et al (1995), as principais características da sucessão de camadas de rochas metassedimentares representadas por itabiritos, dolomitos, quartzitos e xistos são a diversidade morfológica e o relevo acidentado. Tem-se, comumente, espigões grosseiramente orientados para noroeste e sucessões de cristas e patamares com direção NE/SW, truncados por vertentes ravinadas e vales encaixados com perfil em "V". Com relação às altitudes, estas superam os 1100 metros podendo chegar a 1500 metros (Pico do Rola Moça).

Nas áreas gnáissicas, predominam as colinas de topo plano a arqueado com encostas côncavo-convexas e altitudes entre 800 e 900 metros, formadas por dissecação fluvial.

1.3.2 - Clima

O clima da região é moderadamente quente e úmido, e vem sofrendo alterações no decorrer dos anos. A média anual é de 21,5° C, segundo Ribeiro & Mól (1985), e tem-

se evidências de aumento de temperatura no mês de julho. As alterações são devidas a causas naturais e ao rápido processo de urbanização.

De acordo com Ribeiro & Mól (op.cit.), cerca de 89% das chuvas se distribuem entre outubro e março (meses mais quentes do ano), concentrando-se nos meses de dezembro e janeiro. Grande parte desta água escoar superficialmente, constituindo um eficaz agente erosivo e de risco geológico.

1.3.3 - Situação dos taludes naturais

É muito grande a variabilidade de situações. Um talude exposto ao sol, chuva e vento frequentemente exibe uma vegetação diferente da apresentada por um talude que sofre menos influência destes fatores.

1.3.4 – Hidrologia na Região Metropolitana de Belo Horizonte

1.3.4.1- Drenagem Superficial

O sistema de drenagem das áreas onde ocorrem rochas gnáissico-migmatíticas percorre amplos vales de fundo chato resultantes da acumulação de sedimentos aluviais. Pode-se perceber que, em várias áreas, os cursos d'água adquirem padrões ortogonais, manifestando o condicionamento da drenagem à estrutura do substrato.

Nas áreas onde predominam as seqüências metassedimentares, os talwegues da drenagem principal se orientam para norte e noroeste, enquanto parte da drenagem secundária apresenta direção NE-SW, encaixando-se segundo o acamamento das rochas.

1.3.4.2 - Águas subterrâneas

A partir da década de 80, as principais minas atingiram os níveis dos lençóis freáticos. Somente após este fato é que as mineradoras iniciaram os primeiros estudos técnicos das características hidrogeológicas do subsolo.

A reserva explotável total estimada para os principais aquíferos (Moeda, Cauê e Cercadinho) atinge aproximadamente 5×10^9 metros cúbicos, sendo que cerca de 80% desta se encontra na Formação Cauê (hematitas e itabiritos). É importante destacar que a recarga é rejeitada em decorrência da saturação dos reservatórios (Silva et al., 1994).

1.3.5 - Alteração - Espessura do Manto de Intemperismo - Tipos de Solos

Na região onde predominam as rochas gnáissico-migmatíticas, as formações superficiais são representadas por solos residuais de espessura variada: o solo é delgado ou ausente nas áreas de exposição dos maciços rochosos, e espesso, maduro e silto-argiloso nas áreas de relevo muito suave. Localmente, tem-se solos imaturos, essencialmente arenosos e de alta erodibilidade, nas áreas de relevo acidentado. A espessura do manto de intemperismo atinge valores de até 100 metros.

As rochas pouco resistentes ao intemperismo (dolomitos, filitos dolomíticos) dão origem a áreas aplainadas com espessa cobertura laterítica. Percebe-se, ainda, a ausência de solo em áreas de ocorrência de quartzito, e a presença de litossolo pouco espesso em regiões onde ocorre o filito, além de saprólito, menos resistente à erosão.

As regiões onde ocorrem xistos apresentam solos pouco espessos (ou ausentes), imaturos e, frequentemente, do tipo litossolo. As camadas de itabirito encontram-se protegidas da erosão por couraças ferruginosas.

1.4 Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (ABGE). Métodos para Descrição Quantitativa de Descontinuidades em Maciços Rochosos. São Paulo: ABGE, 1983. 132p. Tradução de "Suggested Methods for the Quantitative

Description of Rock Masses". In: **Intern. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, Oxford, v. 15, n.6, 1978. p. 319-368.

ALMEIDA, R. R. & FONTOURA, S.A.B. **Estudo para Estabilidade de Taludes em Itabiritos a Partir de Sistemas de Classificação**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica, Departamento de Engenharia Civil, 1993. 43 p. (Relatório Final).

BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support - **Rock Mechanics**, n. 6, 1974. p. 183-236.

BIENIAWSKI, Z.T. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. **Trans. South African Institute of Civil Engineering** 15, 1973. p. 335-344.

BROWN, E.T. **Rock Characterization Testing & Monitoring – ISRM Suggested Methods**. Pergamon Press, Oxford, 1981. 211p.

CHAPADEIRO, E., CELESTINO, T.B., BORTOLUCCI, A.A. Classificação Geomecânica Aplicada à Estabilidade de Taludes em Área Metropolitana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA,7, Poços de Caldas. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, v.2 , 1993. p.137-144.

DEERE, D. U., HENDRON, A. J., PATTON, F. D. and CORDING, E.J. Design of Surface and Near Surface Construction in Rock. In: **U.S. Symposium of Rock Mechanics**, 8 , AIME, New York, 1967. p. 237-302.

DURAND, A. **Estudo da Estabilidade de Taludes em Mineração a Partir de Classificação Geomecânica**. Brasília: UnB. 192 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Instituto de Tecnologia. Universidade de Brasília, 1995.

FRANCA, P. R. B. **Analysis of Slope Stability Using Limit Equilibrium and Numerical Methods With Case Examples From The Águas Claras Mine, Brazil**. Ontario: Queen's University. 204p. Thesis (For the degree of Master of Science) – Department of Mining Engineering. Queen's University, Canada, 1997.

- GRIPP, M.F.A. , NONATO, C.A. Caracterização Geológica-Geomecânica na Mineração de Ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 8, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: ABGE, v.1, 1996. p. 95-104.
- LANA, M. S. **Estudo dos Mecanismos de Ruptura em Taludes de Grande Altura num Maciço Rochoso de Geologia Estrutural Complexa.** Belo Horizonte: UFMG, 184p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.
- NONATO, C. A. **Utilização de Classificações de Maciços Rochosos no Estudo da Estabilidade de Taludes Pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero, MG.** Belo Horizonte: UFMG, 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1994.
- PAULINO, R. P. **Programa Computacional para Determinação dos Parâmetros Geomecânicos dos Maciços Rochosos com o Uso de Classificações Geomecânicas.** Belo Horizonte: UFMG, 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1999.
- RIBEIRO, C.M. , MÓL, C.R.F. Avaliação das mudanças climáticas em Belo Horizonte: análise dos parâmetros temperatura e precipitação. In: SIMPÓSIO SITUAÇÃO AMBIENTAL E QUALIDADE DE VIDA NA RMBH-MG, 1, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABGE/IGC-UFMG, 1985. p.67-77.
- ROMANA, M.R. Aplicacion de la classificacion SMR, basada en la de Bieniawski, para prever los metodos adecuados de correccion de taludes. In: II SIMPOSIO SOBRE TALUDES Y LADERAS INESTABLES, Madrid. **Volumen de Comunicaciones...** Madrid: 1988. p.535-558.
- SCARPELLI, A.G. **Classificação Geomecânica Aplicada à Avaliação da Estabilidade de Taludes em Minas de Ferro do Quadrilátero Ferrífero.** São Carlos: USP, 187p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 1994.

SILVA, A.B.; SOBREIRO NETO, A.F.; BERTACHINI, A.C. Potencial das Águas Subterrâneas do Quadrilátero Ferrífero. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8, Recife. **Anais...** Recife: ABAS, 1994. p. 264-273

SILVA, A.B., CARVALHO, E.T., FANTINEL, L.M., ROMANO, A.W. , VIANA, C.S. **Estudos Geológicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos e Geoambientais Integrados no Município de Belo Horizonte** (Projeto Estudos Técnicos para o Levantamento da Carta Geológica do Município de Belo Horizonte). Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, MG, 1995. 150p. (Relatório)

CAPÍTULO 2: CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

Neste capítulo, são estudados os parâmetros comumente usados para caracterização geomecânica de maciços rochosos. São apresentados a metodologia escolhida para a realização dos trabalhos, os resultados encontrados e as conclusões pertinentes.

2.1 – Introdução

Pode-se definir um *maciço rochoso* como um conjunto de blocos de rocha justapostos e articulados (Serra Jr. & Ojima, 1998). A rocha intacta constitui a matriz do maciço rochoso, sendo ela o material que forma os blocos. As superfícies que os delimitam são denominadas de *descontinuidades*.

A porção do maciço analisada, relativamente à obra considerada define a validade de se admitir o meio homogêneo ou heterogêneo, isótropo ou anisótropo, contínuo ou descontínuo. Não se pode dizer que os maciços rochosos são essencialmente heterogêneos, anisótropos e descontínuos.

Excluído: escala da

A caracterização **geológico-geomecânica**¹ de um maciço rochoso constitui-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.

Neste trabalho, são considerados a litologia, o grau de alteração, o grau de coerência, o grau de fraturamento e propriedades relativas às descontinuidades, dentre outros atributos, para caracterizar os maciços nas áreas em estudo.

¹ Utiliza-se o termo “**geológico-geomecânica**” por considera-lo mais geral, na prática de Geologia de Engenharia, Mecânica de Solos e de Rochas e Engenharia de Solos e de Rochas. O termo “Geotecnia” se refere , em um número muito grande de casos, a trabalhos relacionados a solos.

2.2 – Revisão da Literatura

2.2.1 - Litologia

Segundo Clerici et. al. (1990), a descrição litológica do maciço rochoso deve incluir, de forma sintética, a cor, composição mineralógica básica, a presença de dobras, falhas (estruturas importantes) na escala do **levantamento**, a presença de estratificação e xistosidade. Deve-se ter claros, portanto, o grupo genético, estruturas principais e textura.

Excluído: mapeamento

Para Serra Jr. & Ojima (op.cit), uma descrição litológica ou petrográfica para aplicação em engenharia deve se apoiar em conceitos petrográficos de uso corrente na geologia, porém deve ser simplificada e objetiva, evitando-se nomenclaturas complexas cujo emprego não proporcione resultados práticos.

É importante destacar que nem sempre a classificação litológica expressa a variabilidade que uma rocha apresenta em um mesmo local. É necessário, em certos casos, discriminar variedades de um mesmo litotipo, com o objetivo de melhor expressar o comportamento do meio rochoso, para fins de engenharia.

2.2.2 - Grau de alteração dos maciços rochosos

A alteração se caracteriza por mudanças nas características da rocha ocasionadas pela ação de agentes de intemperismo físico e químico. Este processo leva à formação dos solos.

2.2.2.1 – Classificações de rochas e solos

Neste item, os termos solo e rocha são definidos, tanto do ponto de vista da engenharia das obras de terra, quanto do ponto de vista geológico. A Terminologia Brasileira (TB-3, 1958), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), classifica os **materiais de superfície** da seguinte maneira:

- **Rochas:** materiais constituintes da crosta terrestre, provenientes da solidificação do magma ou de lavas vulcânicas, ou da consolidação de depósitos sedimentares, tendo ou não sofrido transformações metamórficas. Esses materiais apresentam elevada resistência, somente modificável por contatos com o ar ou a água, em casos muito especiais. Com relação às suas dimensões, classificam-se em *bloco de rocha* (diâmetro superior a 1 metro), *matacão* (diâmetro compreendido entre 1m e 25cm), e *pedra* (diâmetro compreendido entre 25cm e 7,6cm).
- **Rocha alterada:** é a que apresenta, pelo exame macroscópico ou microscópico, indícios de alteração de um ou vários de seus elementos mineralógicos constituintes, tendo geralmente diminuídas as características originais de resistência.

Excluído: essenciais

Excluído: ,

- **Solos:** materiais constituintes da crosta terrestre provenientes da decomposição das rochas pelos diversos agentes geológicos, ou pela sedimentação não consolidada dos grãos elementares constituintes das rochas, com adição eventual de partículas fibrosas de material carbonoso e matéria orgânica coloidal. Classificam-se, com relação à granulometria, em *pedregulho, areia, silte e argila*. Além destes, tem-se ainda alteração de rocha e solos superficiais.
- *Alteração de rocha:* é o solo proveniente da desagregação das rochas *in situ* pelos diversos agentes geológicos. Será descrito pela respectiva textura, plasticidade e consistência ou compacidade, sendo indicados ainda o **grau de alteração** e, se possível, a rocha de origem.
- *Solos superficiais:* a zona abaixo da superfície do terreno natural, igualmente constituída de mistura de areias, argilas e matéria orgânica, exposta à ação dos fatores climáticos e de agentes de origem vegetal e animal será designada simplesmente como *solo superficial*.

Excluído: especiais

Excluído: *in situ*

Para Ricardo & Catalani (1990), uma rocha classificada sob o ponto de vista geológico poderá apresentar diferentes resistências ao desmonte, segundo o grau de alteração que já sofreu. Mesmo conservando bem nítida a estrutura da rocha matriz, a sua resistência mecânica poderá ser bastante reduzida, devido à alteração sofrida pelos seus minerais constituintes. A mesma observação pode ser feita com relação às classificações da Mecânica dos Solos, pois um solo caracterizado como argiloso poderá, apenas pela variação do teor de umidade, apresentar comportamentos diferentes com relação à resistência oferecida ao desmonte.

Se é necessário classificar os materiais de superfície relativamente à escavação, o principal critério que influencia é a maior ou menor dificuldade ou resistência que oferecem ao desmonte, seja ele manual ou mecanizado. A classificação geológica não se aplica nesse caso, pois não traz dentro de si implícita a aptidão à escavação ou ao desmonte.

Na época em que se fazia terraplenagem manual, adotava-se a ferramenta utilizada na escavação para se obter a classificação correspondente do material escavado (*terra comum: pá ou enxada; moledo ou picarra; picareta; rocha branda: explosivos e rocha dura: explosivos de alta potência*). Com o surgimento da mecanização, a

Excluído: ,

Excluído: ,

Formatado: Fonte: Itálico

Formatado: Fonte: Itálico

Formatado: Fonte: Itálico

Formatado: Fonte: Itálico

classificação passou a se basear no equipamento capaz de realizar economicamente o desmonte, agrupando-se os materiais de superfície em “categorias de materiais de escavação”:

1ª Categoria: os solos que podem ser escavados com o auxílio de equipamentos comuns: trator de lâmina, “motoscaper”, pás carregadeiras;

2ª Categoria: são os materiais removidos com os equipamentos já citados, mas que pela sua maior consistência, exigem um desmonte prévio feito com escarificador ou emprego descontínuo de explosivos de baixa potência;

3ª Categoria: materiais de elevada resistência mecânica, que podem ser **escavados após o** emprego de explosivos de alta potência.

Excluído: tratados com

Excluído: exclusivo

Segundo Vaz (1996a), a **classificação geológica dos solos** é feita a partir da rocha de origem e do processo de formação do solo, sendo por isso também denominada de classificação genética. Os solos são produzidos através de apenas dois processos geológicos, dos quais o mais comum é o processo de intemperismo, através da desagregação e decomposição *in situ* da rocha subjacente, dando origem aos, propriamente denominados, **solos residuais**. O segundo processo de formação dos solos envolve a erosão, transporte e a deposição de materiais existentes na superfície, em geral os próprios solos residuais, produzindo os chamados **solos transportados**.

Daí, classifica-se os solos residuais como *S1- solo eluvial* e *S2 – Solo de alteração*. Os solos transportados são classificados como aluviões, coluviões, tálus, sedimentos marinhos e solos eólicos (ver figura 2.1)

2.2.2.2 – Caracterização do estado de alteração

A avaliação do estado de alteração dos maciços é normalmente feita usando-se critérios definidos a partir da predominância de processos pedogênicos ou intempéricos, nos horizontes de solo; de *graus de alteração mineralógica*, nos horizontes de rocha e das porcentagens relativas de solo e rocha para definir horizontes de transição. De acordo com Vaz (1996b), os perfis de intemperismo disponíveis na bibliografia seguem duas escolas: a americana, de Deere & Patton (1971), onde o perfil de intemperismo é constituído por dois horizontes com subdivisões, resultando em três horizontes de solo e três de rocha, com diferentes

propriedades físicas e que permanecem recobrimdo o maciço rochoso; e a européia, de Dearman (1976), cujo perfil de intemperismo possui seis horizontes (dois de solo e quatro de rocha), sendo aplicado para todos os tipos de rocha, apesar de ter sido desenvolvido para rochas graníticas. No Brasil, os trabalhos geralmente seguem a linha proposta por Deere & Patton (ver figura 2.2).

A ISRM (1983), considera que a intemperização ou alteração geralmente afeta as paredes das descontinuidades mais do que o interior do maciço, e produz tanto a desintegração mecânica quanto a decomposição química do mesmo. Geralmente, os dois efeitos atuam conjuntamente, mas dependendo do regime climático, um dos efeitos pode ser dominante. A **desintegração mecânica** causa a abertura de descontinuidades e a formação de **trincastrincastrincastrincastrinca**, pelo fraturamento da rocha. A **decomposição química** causa a descoloração da rocha e pode levar a eventual decomposição de minerais silicáticos em minerais argilosos.

Excluído: novas
descontinuidades

Como o Brasil é um país de clima tropical, a ação intempérica química pode afetar os maciços rochosos também em profundidade, e ocasionar uma acentuada anisotropia destes, já que os mesmos podem ser constituídos por camadas ou porções mais ou menos susceptíveis à alteração. Segundo Pastore & Fontes (1998), o topo do maciço

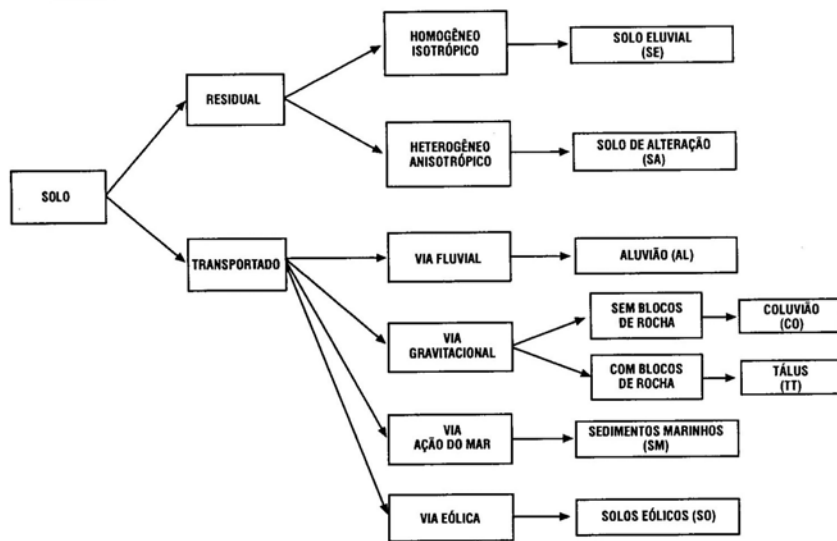
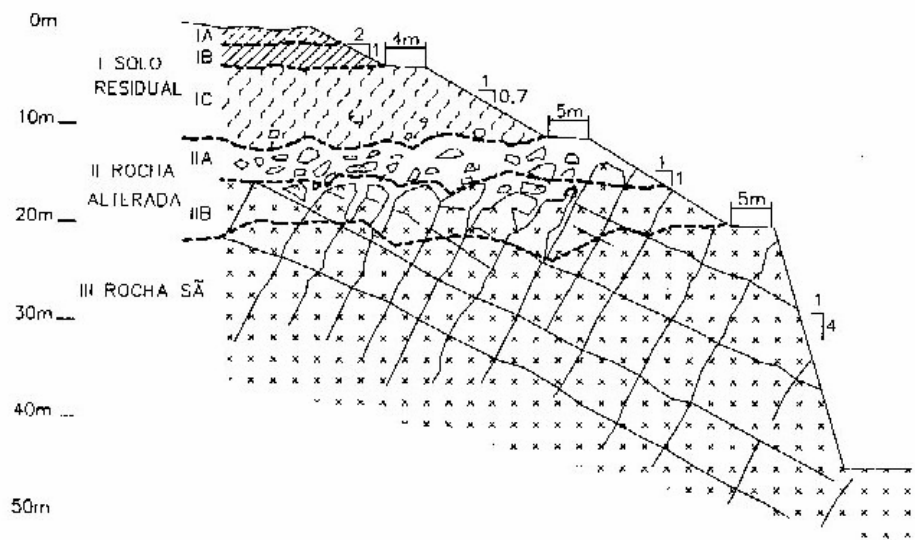


Figura 2.1 – Fluxograma para identificação dos tipos de solo. In: Vaz (1996a)



	ZONAS	DESCRIÇÃO	ROD (%) (Ø=NX)	Recuper. Provável (Ø=NX)	Permeabilidade Relativa	Resistência Relativa
I Solo Residual	IA Horiz. A	Solo superficial, com raízes e matéria orgânica; zona de lixiviação e eluviação, pode ser porosa.	-	0	Média a alta	Baixa a média
	IB Horiz. B	Zona tipicamente rica em argila; concentrações de Fe, Al e Si, possibilidade de cimentação; ausência de estruturas reliquias.	-	0	Baixa	Baixa (alta cimentado)
	IC Horiz. C	Presença de estruturas reliquias; graduação para materiais siltosos e arenosos; menos de 10% de matações; freqüentemente micáceo.	0 ou não aplicável	0 a 10, em geral	Média	Baixa a média (influência das estruturas reliquias)
II Rocha Alterada (de solo residual ou saprólito até rocha parcialmente alterada)	IIA Transição	Altamente diversificada, desde materiais terrosos e rochosos; areia comumente fina a grossa; 10 a 95% de matações; alteração esferoidal presente.	Variável, em geral 0 a 50	Variável, em geral 10 a 90%	Alta (perdas d'água comuns)	Média a baixa (se as estruturas reliquias forem de baixa resistência)
	IIB Rocha Parcialmente Alterada	Material rochoso, rocha branda a dura; descontinuidades em diversos graus de alteração; feldspatos e micas parcialmente alterados.	50 a 75, em geral	>90, em geral	Média a alta	Média a alta**
III Rocha Sã	-	Descontinuidades sem alteração e películas de óxidos de ferro; feldspatos e micas inalteradas.	>75 (>90 em geral)	100, em geral	Baixa a média	Muito alta**

Notas: * Descrição de cada zona é a única forma viável de distinção entre elas.
 ** Considerando apenas o maciço intacto, sem estruturas geológicas com atitudes desfavoráveis.

Figura 2.2 – Características principais dos horizontes de um perfil de alteração de rochas ígneas e metamórficas e respectivas soluções típicas para taludes de corte, segundo Deere & Patton (1971). In: Augusto Filho & Virgili (1998).

Excluído: ¶

ZONAS

IA-HORIZ. A

I-SOLO RESIDUAL

IB-HORIZ. B

IC-HORIZ. C

II-ROCHA ALTERADA (de solo residual ou saprólito até rocha parcialmente alterada)

IIA-TRANSIÇÃO

IIB-ROCHA PARCIALMENTE ALTERADA

III-ROCHA Sã

Notas: * Descrição de cada zona é a única forma viável de distinção entre elas.
 ** Considerando apenas o maciço intacto, sem estruturas geológicas com atitudes desfavoráveis.

¶

Formatado: Fonte: 10 pt

rochoso, caracterizado pelo horizonte de rocha muito alterada, pode estar a uma profundidade de cerca de 50 metros, num perfil de alteração típico de rochas metamórficas e graníticas em regiões de serra.

Excluído: ¶
¶

O estado de alteração pode ser caracterizado tátil-visualmente, baseando-se em variações do brilho e cor dos minerais e da rocha, e também na friabilidade da mesma. Destaca-se que os critérios de avaliação são relativos, devendo-se comparar variedades de um **mesmo** tipo litológico.

2.2.2.3 – Exemplos de avaliação da alteração de maciços rochosos

A tabela II.1 apresenta critérios, denominações e siglas comumente utilizadas na avaliação do estado de alteração e do grau de intensidade deste, nas rochas. As características da rocha observadas no campo, no momento da descrição da mesma, definem o estado de alteração. Os graus de intensidade são determinados a partir dessas características, e variam de *rocha sã* a *rocha extremamente alterada*.

Para que se reduzissem as dificuldades de avaliação do grau de alteração em rochas brandas, devido à própria natureza e gênese de tais rochas, Guidicini et al (1972) criaram o conceito de **grau de coerência**, considerado um índice complementar de caracterização, baseado nas seguintes propriedades físicas: resistência ao impacto (consistência), resistência ao risco (dureza) e friabilidade (ver tabela II.2). Este conceito foi adaptado para uso nas minas de ferro lavradas pela MBR (Minerações Brasileiras Reunidas S.A. – ver tabela II.3) e pela CVRD (Cia. Vale do Rio Doce S.A. - ver tabela II.4). Ambas utilizam a abordagem clássica também adotada pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), que considera quatro graus de alteração e os associa aos graus de coerência. A equipe da MBR vai um pouco além, pois relaciona o grau de alteração à dureza de **Schmidt** (N), e estabelece o conceito de **consistência**, que permite classificar as rochas de “soft” a “hard”.

Excluído: coesão ou

Excluído: Schmidt

Um perfil de intemperismo que pode ser aplicado tanto em sondagens como em levantamentos, aos mais diferentes tipos de rocha e de clima, foi elaborado por Vaz (op cit). Ele apresenta horizontes definidos a partir dos métodos de escavação e de perfuração de rocha, e é uma alternativa aos critérios de alteração mineralógica e porcentagem relativa de solo/rocha (ver fig. 2.3). Percebe-se que as classes RS, RAD

Excluído: mapeamentos

e RAM correspondem exatamente aos graus A1, A2 e A3, citados anteriormente. Para o grau A4, Vaz (op.cit.) propõe uma pequena modificação: denomina-o de solo residual ao invés de “rocha extremamente alterada” ou “rocha alterada mole”, e subdivide-o em três tipos: solo de alteração (saprólito), solo eluvial e solo vegetal.

Existe também, nesse caso, uma referência aos processos de alteração, sendo considerados da seguinte maneira:

- Incipientes ou ausentes: quando se tem rocha sã;
- Intempéricos físicos: associados à rocha alterada dura. Exemplos (Leinz & Amaral, 1980): variação da temperatura, cristalização de sais em descontinuidades abertas, congelamento da água que preenche poros das rochas e também descontinuidades, e a ação de agentes físico-biológicos (pressão do crescimento de raízes vegetais, atividades de minhocas, formigas, cupins e vários roedores que abrem buracos);
- Intempéricos químicos: associados à rocha alterada mole e ao solo de alteração. Exemplos: decomposição por oxidação, decomposição por hidrólise e hidratação, decomposição pelo ácido carbônico e dissolução de alguns minerais;
- Pedológicos: associados aos solos eluvial e vegetal. Tem-se a decomposição da rocha com intensidade decrescente com relação à profundidade, a partir da combinação de processos relacionados às variações climáticas (temperatura, chuva, umidade do ar, evaporação) e a composição mineral da rocha matriz.

Os critérios adotados permitem que se faça a associação de parâmetros de resistência mecânica aos diferentes horizontes de rocha.

Tabela II.1 – Graus de alteração das rochas segundo o IPT(1984). Modificado de: Serra & Ojima (1998)

SIGLAS			INTENSIDADE DE ALTERAÇÃO	DESCRIÇÃO DO ESTADO DE ALTERAÇÃO
A1	W1	RS	Rocha sã ou praticamente sã	Apresenta minerais primários sem vestígios de alterações ou com alterações físicas e químicas incipientes. Neste caso, a rocha é ligeiramente descolorida.
A2	W2	RAD	Rocha medianamente alterada	Apresenta minerais medianamente alterados e a rocha é bastante descolorida.
A3	W3	RAM	Rocha muito alterada	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.
A4	W4	REA	Rocha extremamente alterada	Apresenta minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo.

Tabela II.2 – Classificação de rochas quanto ao grau de coerência. In: Guidicini & Nieble (1984)

ROCHA	SÍMBOLO	CARACTERÍSTICAS
Muito Coerente	C1	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo. O fragmento possui bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina de aço. Superfície dificilmente riscada por lâmina de aço.
Coerente	C2	Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo. O fragmento possui bordas cortantes que podem ser abatidas pelo corte com lâmina de aço. Superfície riscável por lâmina de aço.
Pouco Coerente	C3	Quebra facilmente ao golpe do martelo. As bordas do fragmento podem ser quebradas pela pressão dos dedos. A lâmina de aço provoca um sulco acentuado na superfície do fragmento.
Friável	C4	Esfarela ao golpe do martelo. Desagrega sob pressão dos dedos.

Tabela II.3 - Graus de alteração/coerência considerados na caracterização geomecânica da Mina de Águas Claras. In: Estudos de Estabilidade do Morro do

Patrimônio - MAC - Relatório Interno, 1992, Figueiredo Ferraz.

GRAU	TERMO DESCRITIVO	CARACTERÍSTICAS	N	CONSISTÊNCIA MBR
A4	<i>Saprolito ou rocha extremamente alterada mole</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Foliação preservada - Juntas, mascaradas pelo intemperismo - Matriz extremamente alterada - Minerais resistentes fragmentados e os demais em argilo-minerais - Desagrega pela pressão dos dedos - Moldada nas mãos - Facilmente penetrada pelo martelo de geólogo e canivete - Escavável por escavadeiras, pás, moto scraper 	0	Soft (S) Medium-Soft (M/S)
A3	<i>Rocha alterada dura</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Foliação proeminente, realçada pelo intemperismo - Juntas abertas (< 2,0 mm), oxidadas, com leve preenchimento - Matriz alterada dura, descolorida - Minerais resistentes, pouco alterados e os demais alterados - Fragmentos quebrados manualmente - Desagregável ao golpe do martelo e sulcadas pelo canivete - Escavável por escarificador 	10 a 25	Medium (M) Medium-Soft (M/S)
A2	<i>Rocha medianamente alterada dura</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Foliação pouco proeminente - Juntas de paredes pouco oxidadas, sem preenchimento, fechadas (< 1,0 mm) - Matriz medianamente alterada - Minerais com alteração parcial, resistentes, mantêm brilho - Fragmentos de bordas cortantes, que não podem ser quebrados manualmente - Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, sem esfarelar - Pouco riscada pelo canivete - Escavável somente por desmonte a fogo 	25 a 35	Medium-Hard (M/H)
A1	<i>Rocha sã a pouco alterada</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Foliação pouco proeminente, estrutura penetrativa na matriz - Juntas fechadas, com paredes sãs - Matriz pouco alterada a sã, com brilho - Fragmentos de bordas cortantes, não quebrados manualmente - Quase não quebra ao golpe do martelo e não riscável por canivete - Escavável somente por desmonte a fogo 	> 35	Hard

Nota: Os valores de N correspondem ao “Schmidt Hammer Rebound Number”

Excluído: Schmidt

Tabela II.4 – Metodologia adotada pela Cia. Vale do Rio Doce para a avaliação do grau de alteração das rochas. In: Ferreira (1998)

SIGLAS	DENOMINAÇÕES	CARACTERÍSTICAS DAS ROCHAS
A4	Rocha alterada mole	Desagrega-se e esmaga-se sob a pressão dos dedos. Quando úmida, facilmente moldada nas mãos. Facilmente indentada e penetrada por martelo de geólogo. Facilmente penetrável por lâmina de aço. Escavável por picaretas, pás e moto-scaper. Rocha extremamente alterada, mascarando a cor da rocha original.
A3	Rocha alterada dura	As bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos. Quebra-se ao golpe do martelo do geólogo. A lâmina de aço provoca sulcos acentuados na superfície dos fragmentos. Desagregável e escavável somente se tiver passado por escareficador, ou rompedor, ou ainda desmonte por explosivo. Foliação realçada pelo intemperismo. Fraturas oxidadas com indelével preenchimento. Rocha alterada dura, com coloração modificada com relação à rocha sã.
A2	Rocha pouco alterada	Os fragmentos apresentam bordas que quase não podem ser quebradas pela pressão dos dedos. Os fragmentos possuem bordas cortantes que podem ser abatidas pela lâmina de aço. Quebra-se com relativa facilidade ao golpe do martelo. Relativa dificuldade em riscar a superfície dos fragmentos por lâmina de aço. Somente escavável com a utilização de desmonte por explosivos. Fraturas com paredes pouco ou quase não oxidadas, praticamente sem preenchimento. Rocha pouco alterada, não apresentando brilho, material descolorindo ou mascarando a cor original da rocha.
A1	Rocha sã	Os fragmentos apresentam bordas cortantes que não podem ser quebradas pela pressão dos dedos e abatidas por lâmina de aço. Quebra-se com dificuldade ao golpe do martelo. Praticamente impenetrável e não riscável por lâmina de aço. Somente escavável se tiver sido executado o desmonte por explosivos. Foliação não é predominante. Fraturas com paredes sãs, sem evidência de oxidação.

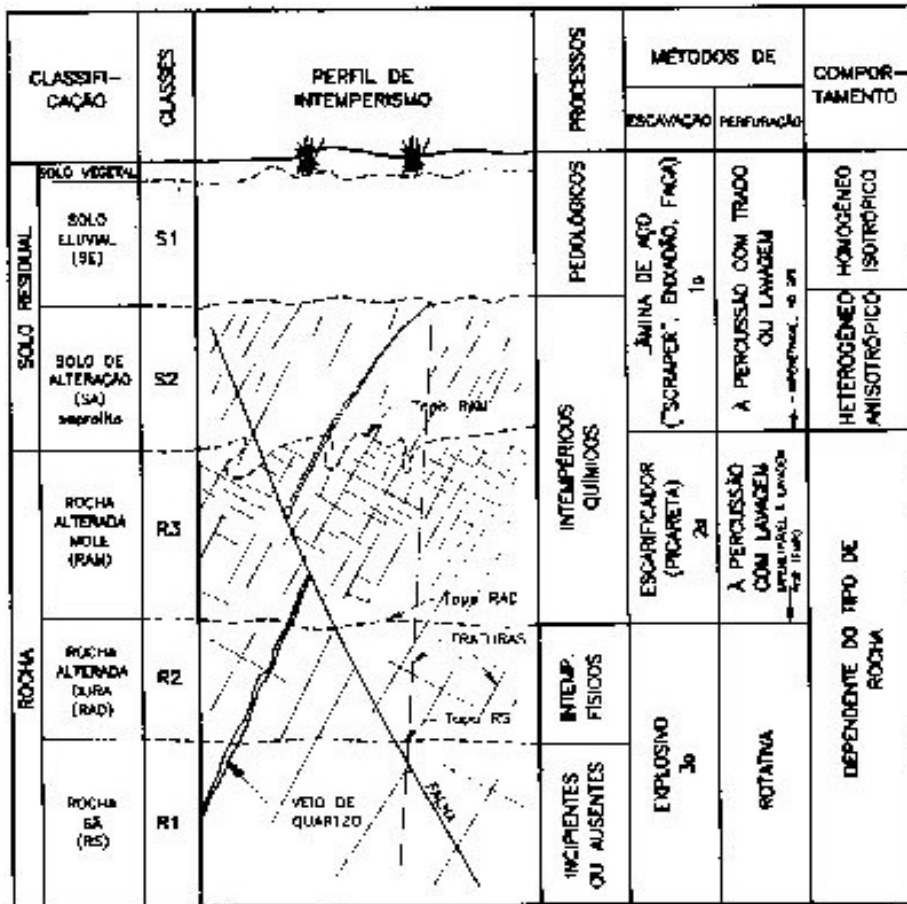


Figura 2.3 – Perfil de intemperismo para regiões tropicais, segundo Vaz (1996a).

2.2.2.4 – Relação entre a resistência à compressão uniaxial e as classes de alteração

A abordagem tradicional para a determinação do grau de alteração das rochas é baseada na alteração de seus minerais, melhor dizendo, na porcentagem de minerais alterados presentes. Como a alteração mineral não acontece de forma homogênea, num afloramento pode-se encontrar porções mais resistentes à alteração, e porções menos resistentes. Devido a este fato, pode-se encontrar dificuldades no momento da classificação. Segundo Vaz (op.cit.) essas dificuldades são maiores nas rochas metamórficas de baixo grau e nas rochas sedimentares brandas, uma vez que certas rochas, como as sedimentares com cimento argiloso, sequer apresentam minerais são.

Entretanto, a utilização de classes de alteração associadas aos processos de escavação e perfuração, permite universalizar sua aplicação, uma vez que qualquer rocha em qualquer estágio de alteração, sempre será enquadrada em determinado processo de escavação e perfuração. Assim, rochas resistentes como os granitos e gnaisses apresentarão as três classes de alteração (RS ou R1, RAD ou R2 e RAM ou R3), enquanto outras, menos resistentes, como um arenito mal cimentado, poderão apresentar apenas a classe R3 (RAM). Certas rochas sedimentares muito brandas, como os evaporitos, sequer apresentam a classe R3, por serem escaváveis com lâmina de aço, o que as coloca na classe S2, correspondente aos solos de alteração.

Excluído: solo

Para orientar a aplicação das classes de alteração aos vários tipos de rocha foram definidos grupos de rocha e limites entre as classes através da **resistência à compressão uniaxial (RCU)**. Este parâmetro foi escolhido uma vez que, as propriedades da rocha que determinam sua resistência à alteração estão intimamente ligadas àquelas que definem sua resistência mecânica.

Vaz (op.cit.) compilou dados da bibliografia e de outras fontes, abrangendo mais de sessenta referências, com um total de mais de 2000 resultados de ensaios de resistência à compressão uniaxial. Ao analisar os resultados os dados anômalos foram desconsiderados, definindo-se valores mínimos e máximos de resistência para vários tipos de rocha. As faixas de variação são apresentadas no primeiro quadro da figura 2.4. Os maiores valores de resistência à compressão uniaxial foram encontrados para

as rochas mais densas e maciças, o que inclui a maioria das rochas magmáticas e metamórficas de alto grau, pois a textura (tamanho dos grãos) e as estruturas internas (estratificação e xistosidade) afetam sensivelmente a resistência mecânica das mesmas.

O autor avaliou várias classificações de rochas, segundo suas características de resistência mecânica, para estabelecer os limites de resistência à compressão para as classes de alteração. A classificação mais conhecida é a proposta pela ISRM (1983). Segundo esta, o campo aproximado de variação da resistência à compressão uniaxial pode ser avaliado no campo, para solos e rochas (ver tabela II.5), a partir da determinação do *grau de coerência* ou *consistência* dos mesmos. Esta propriedade é muito usada na caracterização de maciços, porém sem quase nenhuma associação a valores de resistência à compressão uniaxial, conforme visto anteriormente.

Hoek (1995) propôs uma adaptação à mesma, que foi aproveitada na definição dos limites das classes ou graus de alteração (ver tabela II.6), e identificação dos grupos de rocha no campo. A partir daí, foram estabelecidos grupos de rocha em função da resistência, indicando-se as classes ou graus de alteração presentes em cada grupo (ver tabela II.7). A classe S1, solo eluvial, não é considerada por se tratar de diferenciação da classe S2, solo de alteração. Além dos três grupos de rocha definidos, foi introduzido outro, com resistência à compressão uniaxial superior a 100 MPa.

Os dois últimos quadros da figura 2.4 mostram os grupos de rocha para a aplicação do perfil de intemperismo, como vistos na tabela II.7, e os limites de resistência entre as classes ou graus de alteração. A reta inclinada, que limita a parte superior da classe, indica que a mesma tende a desaparecer, à medida em que a resistência diminui.

Esta abordagem de avaliação do grau de alteração pode ser de difícil utilização, nas situações em que se tem grande variabilidade de valores para a resistência à compressão uniaxial. Nesses casos, o maciço rochoso deve ser dividido em setores, para que a metodologia possa ser melhor aplicada.

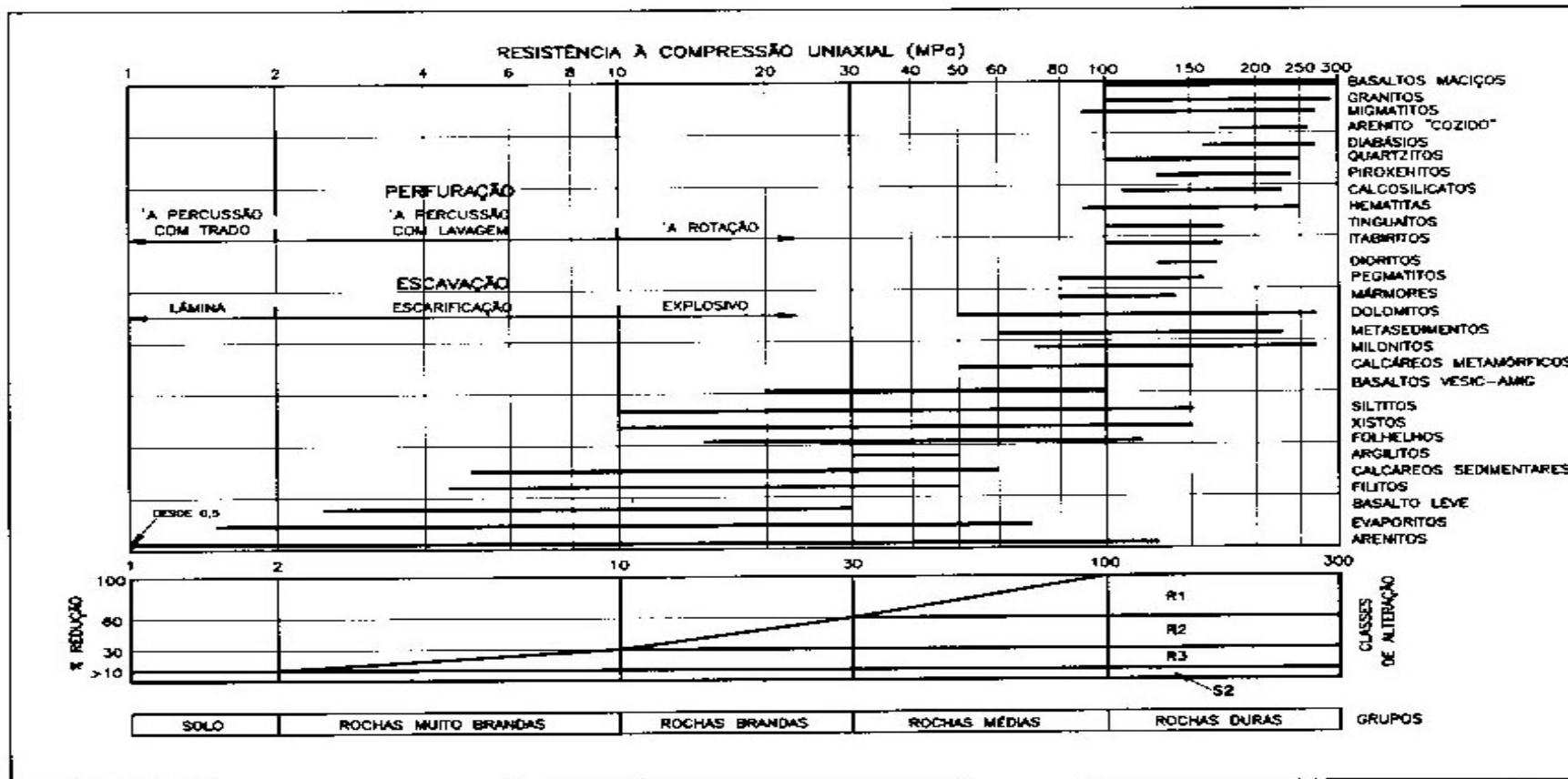


Figura 2.4 – Resistência à compressão uniaxial e classes de alteração, segundo Vaz (1996a).

Tabela II.5 - Determinação do campo de variação da resistência à compressão uniaxial de solos e rochas, segundo a ISRM (1983).

GRAU	DESCRIÇÃO	IDENTIFICAÇÃO DE CAMPO	CAMPO APROXIMADO DE VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL (MPa)
S1	Solo muito mole	Facilmente penetrado por várias polegadas com o pulso	<0,025
S2	Solo mole	Facilmente penetrado por várias polegadas com o dedo polegar	0,025 – 0,050
S3	Solo firme	Pode ser penetrado com o dedo polegar , por várias polegadas com moderado esforço	0,050 – 0,10
S4	Solo rígido	Prontamente amolgado pelo dedo polegar mas penetrado somente com grande esforço	0,10 – 0,25
S5	Solo muito rijo	Prontamente recortado pela unha	0,25 – 0,50
S6	Solo duro	Recortado com dificuldade pela unha	> 0,50
R0	Rocha extremamente fraca	Marcada pela unha	0,25 – 1,0
R1	Rocha muito fraca	Esmigalha-se sob impacto da ponta do martelo de geólogo, pode ser raspada por canivete	1,0 – 5,0
R2	Rocha fraca	Pode ser raspada por canivete com dificuldade, marcada por firme pancada comcomcomcomcom a ponta do martelo de geólogo	5,0 – 25
R3	Rocha medianamente resistente	Não pode ser raspada por canivete, amostras podem ser fraturadas com um único golpe do martelo de geólogo	25 – 50
R4	Rocha resistente	Amostras requerem mais de um golpe de martelo para fraturar-se	50 – 100
R5	Rocha muito resistente	Amostras requerem muitos golpes de martelo para fraturar-se	100 – 250
R6	Rocha extremamente resistente	Amostras podem somente ser lascadas com o martelo de geólogo	> 250

Excluído: coma

Tabela II.6 – Reação ao martelo para os grupos de rocha, segundo Hoek (1995) . In: Vaz (1996a)

GRUPO	RCU (MPa)	REAÇÃO AO MARTELO (para rochas intactas em amostras de mão)
DURAS	> 100	Vários golpes para partir. Para RCU > 200, somente lascas e som de sino;
MÉDIAS	30 a 100	Um ou dois golpes para partir. Para RCU < 50, a ponta do martelo penetra levemente e a lâmina do canivete raspa;
BRANDAS	10 a 30	Um golpe fragmenta. A ponta do martelo penetra facilmente. A lâmina do canivete risca mas não corta.
MUITO BRANDAS	2 a 10	Um golpe esmigalha. A ponta do martelo penetra até 2cm. A lâmina do canivete corta superficialmente.

Tabela II.7 – Grupos de rocha para aplicação do perfil de intemperismo. Modificada de Vaz (1996a)

GRUPO	RCU (MPa)	CLASSES DE ALTERAÇÃO PRESENTES
DURAS	> 100	R1, R2, R3 e S2
MÉDIAS	30 a 100	R2, R3 e S2
BRANDAS	10 a 30	R2, R3 e S2
MUITO BRANDAS	< 10	R3 e S2

Obs.: As classes são: R1 = rocha sã; R2 = rocha alterada dura; R3 = rocha alterada mole; S2 = solo de alteração.

2.2.3 - Grau de fraturamento dos maciços

A forma de se avaliar o grau de fraturamento de maciços rochosos desenvolvida pelo corpo técnico da Cia. de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN, 1986) é apresentada na tabela II.8. Esta tabela é levada ao campo para a determinação da frequência de ocorrência de fraturas nas rochas. O grau de fraturamento classifica as rochas de *ocasionalmente fraturadas* a *fragmentadas*.

2.2.4 - Caracterização geomecânica das discontinuidades

O termo *descontinuidade* é comumente usado para caracterizar quaisquer superfícies que ocasionem a interrupção da continuidade de uma rocha, dentre as quais destacam-se as superfícies de acamamento, clivagem e xistosidade, falhas e fraturas.

Excluído: as dobras,

Magalhães & Cella (1998), definem as *descontinuidades geomecânicas* como feições tabulares ou planares com propriedades de resistência e rigidez muito inferiores às da rocha encaixante. Os corpos rochosos que se destacam por sua litologia mais branda ou intensidade de alteração ou deformação podem ser descritos como *unidades de comportamento geomecânico diferenciado*. Dependendo da geometria que estes corpos possuam, relativamente à rocha encaixante, eles podem ser considerados **descontinuidades geomecânicas**.

Excluído: possuem

Na elaboração do projeto de engenharia de taludes em maciços rochosos fraturados, é necessário que se avalie a forma e o tamanho dos blocos isolados por discontinuidades, a partir de dados resultantes de levantamentos estruturais. Dentre estes dados, deve-se destacar o espaçamento das superfícies de discontinuidades, a direção de mergulho e o mergulho das mesmas. Para que se possa avaliar a existência de porções do maciço rochoso potencialmente instáveis deve-se também comparar o tamanho dos blocos à dimensão da face do talude examinado.

Excluído: mapeamentos

Uma classificação das discontinuidades de acordo com a escala de ocorrência das mesmas foi proposta por Duncan & Goodman (1968), sendo exibida na tabela II.9.

Tabela II.8 - Grau de fraturamento dos maciços rochosos, considerando número de fraturas por metro linear dos afloramentos, In: Manual Técnico da CDTN, 1986

Excluído: .

Grau de Fraturamento	Rocha ocasionalmente fraturada	< 1 fratura /metro
	Rocha pouco fraturada	1 a 5 fraturas / metro
	Rocha medianamente fraturada	6 a 10 fraturas / metro
	Rocha muito fraturada	11 a 20 fraturas / metro
	Rocha extremamente fraturada	> 20 fraturas / metro
	Rocha fragmentada	---

Tabela II.9 - Caracterização das discontinuidades com base na escala de observação (Duncan & Goodman, 1968). Modificada de Giani, G.P. (1992).

<u>Tipo</u>	<u>Escala de Observação</u>	<u>Escala</u>	<u>Espaçamento</u>
<u>Macro e micro fissuras</u>	<u>2,5cm</u>	<u>Corpo de prova</u>	<u>s < 0,25cm</u>
<u>Superfícies de clivagem e acamamento</u>	<u>60cm</u>	<u>Bloco de rocha observado “in situ”</u>	<u>0,25cm < s < 5cm</u>
<u>Fraturas e diques</u>	<u>6m</u>	<u>Escavação para exploração</u>	<u>5cm < s < 6m</u>
<u>Falhas menores e zonas fraturadas</u>	<u>60m</u>	<u>Escavação</u>	<u>6m < s < 60m</u>
<u>Falhas regionais</u>	<u>600m</u>	<u>Cadeias de montanhas</u>	<u>S > 60m</u>

Excluído: Tipo

... [1]

Segundo os autores, as fissuras podem ser geradas por tração e alteração, e o espaçamento entre as mesmas é normalmente inferior a 0,25cm. As fraturas podem estar espaçadas de 5cm a 6m, e as zonas fraturadas, de 6 a 60m.

2.2.4.1 - Parâmetros comumente usados na descrição das descontinuidades e maciços

Pode-se destacar, além dos parâmetros citados, a persistência, rugosidade, resistência das paredes ou da superfície das descontinuidades, abertura, preenchimento, percolação de água e número de famílias.

A **persistência** ou **continuidade** pode ser definida, segundo a ISRM (1983), como a extensão ou tamanho exposto da superfície da descontinuidade. Ela é quantificada de forma grosseira, pela observação do comprimento do traço da descontinuidade ao longo do plano de exposição da mesma. De acordo com Scarpelli (1994), é uma das propriedades mais difíceis de ser determinada, principalmente devido à incerteza da geometria de sua porção interna no maciço rochoso.

A presença ou ausência de **persistência** determina o padrão de compartimentação dos maciços rochosos. De forma geral, são necessários ao menos três famílias de descontinuidades, razoavelmente persistentes, para a formação de blocos rochosos bem definidos (Magalhães & Cella, 1998).

As paredes das descontinuidades podem ser irregulares, lisas ou polidas. As **irregularidades** são elementos ligados à gênese dos maciços rochosos, e influenciam o mecanismo de cisalhamento e a percolação de água através das descontinuidades. Elas se manifestam na escala de grandeza de alguns metros sendo, neste caso, de primeira ordem (Magalhães & Cella, op.cit) e denominadas **ondulações**. As irregularidades de segunda ordem possuem dimensões milimétricas a centimétricas e são identificadas como **rugosidades** ou **asperezas** que afetam, por sua vez, o ângulo de atrito da descontinuidade.

A **resistência das paredes** é definida, segundo a ISRM (op.cit.), como a resistência à compressão da rocha que constitui as paredes de uma descontinuidade. Tal propriedade poderá ser estimada através de testes manuais utilizando o martelo de geólogo ou o esclerômetro de Schmidt.

A **abertura** é definida como sendo o espaço vazio ou preenchido, que separa as paredes das descontinuidades. Pode-se considerar o **preenchimento** como qualquer material que ocorre entre os planos das descontinuidades e que possui propriedades

Excluído: por água

distintas do material da rocha. Ele é importante porque pode modificar ou controlar completamente a resistência ao cisalhamento e a condutividade hidráulica das descontinuidades. Onde as paredes opostas não se tocam e o preenchimento ocupa todo o espaço vazio entre as mesmas, a resistência, a deformabilidade e a permeabilidade do material que preenche a descontinuidade condicionam o comportamento do maciço rochoso (Magalhães & Cella, op. cit.)

A **percolação de água**, também denominada de **permeabilidade secundária**, ocorre quando se tem fluxo de água através das descontinuidades presentes no maciço rochoso.

As atitudes das descontinuidades num maciço rochoso normalmente não ocorrem de forma aleatória, e sim formando famílias. As famílias podem ser consideradas como conjuntos de descontinuidades com atitudes subparalelas. Na maioria dos casos, é possível agrupar superfícies de descontinuidades em famílias. O **número de famílias** de descontinuidades que se interceptam pode ser, segundo a ISRM (op.cit.), o fator dominante na estabilidade de taludes em rocha, pois a orientação das descontinuidades com relação à face dos taludes é de grande importância.

Excluído: Também destaca-se o fato de que, quando existem poucas famílias, sua importância é praticamente nula.

2.3 – Metodologia

Este item aborda a metodologia empregada na descrição litológica, avaliação do grau de alteração, avaliação do grau de coerência e de fraturamento dos maciços, e na caracterização geomecânica das descontinuidades identificadas nas áreas estudadas.

Os dados foram coletados através de **levantamento** das frentes de lavra, na *Mineração Itanorte*, localizada na porção norte da Serra do Curral, em Belo Horizonte /MG, na *Mineração Rio Bravo*, localizada em Igarapé/MG e na *Mineração Água Santa*, localizada em Sarzedo, distrito de Ibirité/MG.

Excluído: mapeamento

2.3.1 – Descrição litológica

Na descrição **litológica** foram considerados os seguintes parâmetros:

- cor;

- composição mineralógica básica;
- presença de estruturas na escala de levantamento;
- textura da rocha.

Excluído: mapeamento

2.3.2 – Avaliação do grau de alteração

Esta avaliação foi feita no momento em que foram mapeadas as frentes de lavra. Para tal, utilizou-se a metodologia adotada pela MBR (tabela II.3), por considerá-la mais abrangente, e também o perfil de intemperismo proposto por Vaz (figura 2.3), para os casos em que se encontrou rocha sã, alterada dura e alterada mole. Não foi considerada a abordagem que determina o grau de alteração a partir da resistência à compressão uniaxial das rochas.

2.3.3 – Avaliação do grau de coerência e de fraturamento dos maciços

O grau de coerência foi determinado no momento da avaliação do grau de alteração, utilizando-se a tabela II.3. O grau de fraturamento foi avaliado segundo a tabela II.8.

2.3.4 – Caracterização geomecânica das discontinuidades

Nesta etapa, optou-se por utilizar as propostas originais (Bieniawski, 1989) dos seguintes sistemas de classificação de maciços rochosos (ver anexo I): Q (Barton, 1974), RMR (Bieniawski, 1973) e SMR (Romana, 1988), utilizando-se dados também obtidos nos levantamentos, realizados nas áreas em estudo.

Excluído: mapeamentos

Para a aplicação destes sistemas, é necessária a determinação do índice RQD (ver anexo I). Como não havia testemunhos de sondagem disponíveis, utilizou-se o método proposto por Palmstrom (1975) e também o proposto por Priest & Hudson (1976).

Considerando o sistema **Q**, é importante ressaltar que os valores dos parâmetros parâmetros parâmetros parâmetros, **Jw** (fator relativo à presença de água subterrânea) e **SRF** (fator relativo ao campo de tensões ou à presença de zonas de cisalhamento) foram tomados, a priori, como 1,0. Isto corresponde a não atribuir peso a estes dois parâmetros.

Excluído: parâmetros

2.4 – Resultados e Discussão

2.4.1 – Descrição das áreas mapeadas

Na *Mineração Itanorte*, a lavra se faz em encosta, com bancos regulares de cerca de dez metros de altura. A diferença total de cota é de cerca de cem metros. Os taludes foram mapeados em três bancos consecutivos do nível mais alto para o nível mais baixo (ver figura 2.5).

Na *Mineração Rio Bravo*, as frentes de lavra se encontram dispersas, numa área de cerca de 5km². O relevo é acidentado. A largura e a altura dos bancos não é padronizada. Podem ser contados cinco níveis, sem continuidade, ao longo da mina. Foram mapeados quatro taludes subverticais, todos num mesmo nível, possuindo cerca de quinze metros de altura (ver figura 2.6).

Excluído: A topografia é acidentada.

O talude avaliado na *Mina de Água Santa* se posiciona na porção nordeste da mesma. Compõe-se de cinco bancos, com altura variando entre oito e doze metros, totalizando cerca de cinquenta metros (ver figura 2.7).

Os maciços rochosos avaliados encontram-se posicionados estratigraficamente no Super-Grupo Minas, Grupo Itabira, Formação Cauê, do Quadrilátero Ferrífero. Constituem-se basicamente de itabirito dolomítico, itabirito silicoso e filito. Localmente, o itabirito se encontra intercalado ora por lentes de hematita compacta, ora por lentes de hematita pulverulenta.



Figura 2.5 - Talude 05, mapeado na Mineração Itanorte. Constitui-se por itabirito mole, que se rompe tanto em placas quanto em blocos (porção inferior direita da foto), evidenciando processos de ruptura planar. Encontra-se muito alterado, o que é evidenciado pela coloração avermelhada das superfícies de xistosidade/acamamento, e pela ausência dos leitos de quartzo, que gera espaços vazios entre as camadas de hematita. Na porção superior da foto nota-se saprólito, provavelmente originário de filito.

Excluído: ¶



Excluído: .

Excluído: percebe

Excluído: Nota-se ainda a presença de vegetação rasteira, cobrindo tanto este talude quanto o talude em saprólito.



Figura 2.6 - Talude 01, mapeado na Mineração Rio Bravo. Constitui-se de itabirito mole, intercalado por blocos de itabirito duro delimitados pelas superfícies de descontinuidade. Observa-se a ocorrência de ruptura planar, segundo a xistosidade, e a presença de blocos parcialmente sem apoio, na altura da crista do talude, ocasionados, provavelmente, por ruptura no banco superior da mina.



Figura 2.7 - Parte do talude constituído por itabirito mole, intercalado por hematita compacta e hematita pulverulenta, mapeado na Mina de Água Santa. Observa-se que o equipamento de escavação possui dimensões pequenas, relativamente à altura do banco lavrado. Nota-se que a altura do banco em operação é maior do que a altura do banco superior. Esta diferença também pode ser observada com relação aos bancos inferiores.

2.4.2 – Mineração Itanorte

Excluído: Os maciços rochosos avaliados encontram-se posicionados estratigraficamente no Super-Grupo Minas, Grupo Itabira, Formação Cauê, do Quadrilátero Ferrífero. Constituem-se basicamente de itabirito dolomítico, itabirito silicoso e filito. Localmente, o itabirito se encontra intercalado ora por lentes de hematita compacta, ora por lentes de hematita pulverulenta.¶

Foram descritos oito taludes. No primeiro deles, identificou-se itabirito mole, coberto por camada de cerca de 2m de canga. Encontra-se muito alterado (grau A4, consistência M/S), fraturado e dobrado, o que dificulta a identificação de famílias de descontinuidades. Esta alteração é evidenciada pela cor cinza avermelhada, pelo aspecto poroso exibido pela rocha e pela ausência dos leitos de quartzo, já eliminados no processo de intemperismo. Pode-se observar os espaços vazios antes ocupados por eles, entre as camadas de hematita (ver figura 2.5). Pela classificação de Vaz, posiciona-se na classe R3.

Excluído: intercalado em alguns pontos por limonita, e

Nos taludes posteriores, não há variação na litologia identificada. Percebem-se leitos de quartzo desagregados. A xistosidade é proeminente, e coincide com o acamamento. Nestes pontos, o itabirito rompe-se em placas, podendo ser caracterizado como tipo s-tectonito (Davis, 1984). As fraturas identificadas compoem duas famílias distintas.

O quinto talude identificado (ver figura 2.8) já exhibe algumas porções endurecidas (itabirito duro), blocos soltos, e uma fenda extensa atingindo a crista do banco, e se prolongando pela praça do banco de cima. Encontra-se desmoronado. Observam-se fraturas aproximadamente perpendiculares à xistosidade, sem preenchimento, e micro-falhas por todo o afloramento, estando muito nítidos os pequenos deslocamentos sofridos pela rocha. Pode ser classificado como tipo l-tectonito (Davis, op.cit.), pois são muito evidentes as pequenas rupturas que geram 'bastonetes' ou 'charutos'. O grau de alteração observado é o A3, a consistência equivalente é M e, segundo Vaz, sua classe é a R2.

No sexto talude, o itabirito volta a se romper em placas, retornando também à classe R3. No sétimo talude, percebe-se a presença de hematita mole/pulverulenta e de hematita dura, em lentes concordantes com a xistosidade. Esta hematita encontra-se intercalada por lentes finas de limonita e, quando se apresenta dura, mostra-se extremamente fraturada. Pode ser classificada como R2/R3, grau de alteração A3/A4, consistência M – M/S. Os veios de quartzo continuam presentes, porém agora

Formatado: Normal, Espaçamento entre linhas: simples, Tabulações: 241 pt, À esquerda



Figura 2.8 - Vista parcial do talude 05, na Mineração Itanorte. Nota-se grande fenda na porção direita da foto, provocada pela ação de água superficial. O tom avermelhado da rocha evidencia avançado estado de alteração da mesma. A xistosidade/acamamento é nítida.

discordantes. O oitavo talude apresenta-se como os quatro primeiros taludes já descritos.

Ao se determinar o *RQD* para os taludes em itabirito utilizando-se a abordagem de Palmstrom (1975), pode-se observar uma grande variação nos valores obtidos, os mesmos se estendendo de 49% até 97%. Nos taludes 01, 03, 04 e 05, tal abordagem não se aplica, pois os valores encontrados são muito altos. Ao se utilizar a relação de Priest & Hudson (1976), encontramos valores de *RQD* entre 52% e 79%, o que é coerente com as observações de campo, exceção sendo feita para o talude 05. Neste caso, o valor encontrado foi 95%, que não corresponde à situação encontrada. As dificuldades detectadas na coleta de dados (material lançado dos bancos superiores na face do talude, por exemplo) talvez possam explicar os resultados inconsistentes obtidos.

Para o talude em hematita, tem-se o *RQD* de 69%, segundo Palmstrom, e 27%, segundo Priest & Hudson. O segundo valor é o que corresponde às observações de campo.

Na determinação dos índices *RMR*, *SMR* e *Q*, os seguintes resultados foram encontrados (ver anexo II):

TALUDE	RMR	SMR	Q
01	44	02	0.30
02	48	05	1.05
03	44	26	14.41
04	45	27	7.27
05	52	52	1.60
06	44	44	0.80
07	41	26	0.69
08	59	23	0.99

Excluído: No sexto talude, o itabirito volta a se romper em placas, retornando também à classe R3. No sétimo talude, percebe-se a presença de hematita mole/pulverulenta e de hematita dura, em lentes concordantes com a xistosidade. Esta hematita encontra-se intercalada por lentes finas de limonita e, quando se apresenta dura, mostra-se extremamente fraturada. Pode ser classificada como R2/R3, grau de alteração A3/A4, consistência M – M/S. Os veios de quartzo continuam presentes, porém agora

← Tabela formatada

O índice **RMR** varia de 41 a 59, e o maciço é classificado como **regular** (classe III). A coesão determinada a partir deste índice se encontra entre 200 e 300 kPa. O ângulo de atrito varia de 25 a 35°. Estes valores são coerentes com a realidade observada no campo, excetuando-se, neste caso, os taludes 05 e 06.

Aplicando o índice **SMR**, o maciço é classificado como muito ruim e totalmente instável (taludes 01 e 02); ruim e instável (taludes 03, 04, 07 e 08); e normal e parcialmente

Excluído: ¶

estável (taludes 05 e 06). Ocorre aí uma inversão de classificação, ao compararmos estes resultados com a situação observada em campo, onde onde onde onde, os taludes 01, 02, 03, 04, 07 e 08 podem ser considerados normais e parcialmente estáveis. Também neste caso, a abordagem proposta pelo sistema SMR não foi apropriada.

Excluído: pois

O índice **Q** varia de 0,30 a 14,41. O maciço é classificado como muito pobre (taludes 01, 06, 07 e 08); pobre (taludes 02 e 05); regular (talude 04) e bom (talude 03). Os taludes 01, 07 e 08 não se enquadram na classificação recebida, podendo ser considerados como regulares. Os demais apresentam classificação coerente com o que foi observado no campo. O ângulo de atrito residual, determinado a partir deste índice, encontra-se também entre 25 e 35°, com exceção para o talude 01, onde o ângulo de atrito varia entre 8 e 16°. Ressalta-se que, segundo este sistema, tem-se um maior detalhamento na caracterização dos maciços, havendo mais classes de qualidade (nove, no total) do que nos demais sistemas, que apresentam somente cinco classes.

Excluído: para o maciço se

Excluído:

2.4.3 – Mineração Rio Bravo

Os quatro taludes descritos são constituídos por itabirito mole, silicoso, intercalado por grandes blocos de itabirito duro. O *itabirito mole* encontra-se extremamente fraturado, quebradiço e muito alterado (grau A4, consistência M/S, classe R3). O *itabirito duro* (ver figura 2.6) encontra-se medianamente alterado (grau A2, consistência M/H, classe R2) e pouco fraturado. Rompe-se em blocos de dimensões métricas. Nota-se a presença de limonita, nas superfícies de xistosidade/acamamento, e hematita preenchendo fraturas, por todos os afloramentos. Observa-se que as camadas de quartzo se desfazem ao toque do martelo, caracterizando o quartzo 'sacaróide', e se acumulam ao pé do talude, como exibido na figura 2.9. Nota-se ainda, a presença de veios de quartzo discordantes.

Os valores obtidos para o RQD utilizando-se a relação de Palmstrom são superiores a 90%, sugerindo a presença de maciço rochoso quase sem fraturas. Os valores encontrados a partir da equação de Priest & Hudson são: para o talude 1, 60%, e para os demais taludes, cerca de 75%, que correspondem melhor à realidade. Ressalta-se que, nesta área, o índice Q não foi determinado.

Para os índices **RMR** e **SMR**, tem-se os seguintes valores:

- ✧ O **RMR** varia de 45 a 49 (classe III);
- ✧ Os valores para a coesão e para o ângulo de atrito, determinados a partir do RMR são 200 a 300 kPa e 25 a 35°, respectivamente;
- ✧ O valor do **SMR** se encontra próximo de 0 (classe V);

Estes valores de RMR classificam o maciço como regular, correspondendo ao que foi observado no campo. Segundo o índice SMR, o maciço é classificado como muito ruim, o que não corresponde ao observado no campo. Este fato pode ser devido à forma como é avaliada a relação entre a orientação das descontinuidades e a orientação dos taludes, ao se aplicar os sistemas de classificação.

2.4.4 – Mina de Água Santa

No único talude mapeado nesta mina, percebe-se a presença de hematita compacta extremamente fraturada, em grande parte do mesmo. Encontra-se praticamente sã (grau de alteração A1/A2, consistência H-M/H, classe R1/R2). Nota-se alteração somente no preenchimento das descontinuidades (constituído ora por caulim, ora por limonita, de espessura milimétrica a centimétrica). Identifica-se também itabirito compacto, hematita e itabirito friáveis. Bolsões e veios de quartzo discordantes podem ainda ser detectados, em toda a área do talude, correspondendo a zonas de fraqueza no maciço rochoso. Pode-se identificar, na hematita e itabirito compactos, e no itabirito friável, três famílias de descontinuidades. A hematita friável exibe uma única família. O itabirito compacto (duro), classifica-se como a hematita, com relação à alteração. A hematita e o itabirito friáveis são classificados como R3, sua consistência é M/S, e o grau de alteração é A3.

Excluído: Não encontramos explicação para este resultado.

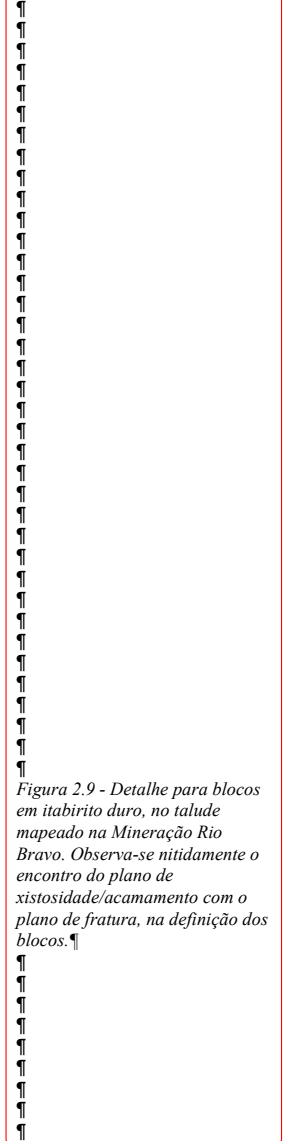


Figura 2.9 - Detalhe para blocos em itabirito duro, no talude mapeado na Mineração Rio Bravo. Observa-se nitidamente o encontro do plano de xistosidade/acamamento com o plano de fratura, na definição dos blocos.

Formatado: Tabulações: 18 pt, À esquerda + 241 pt, À esquerda

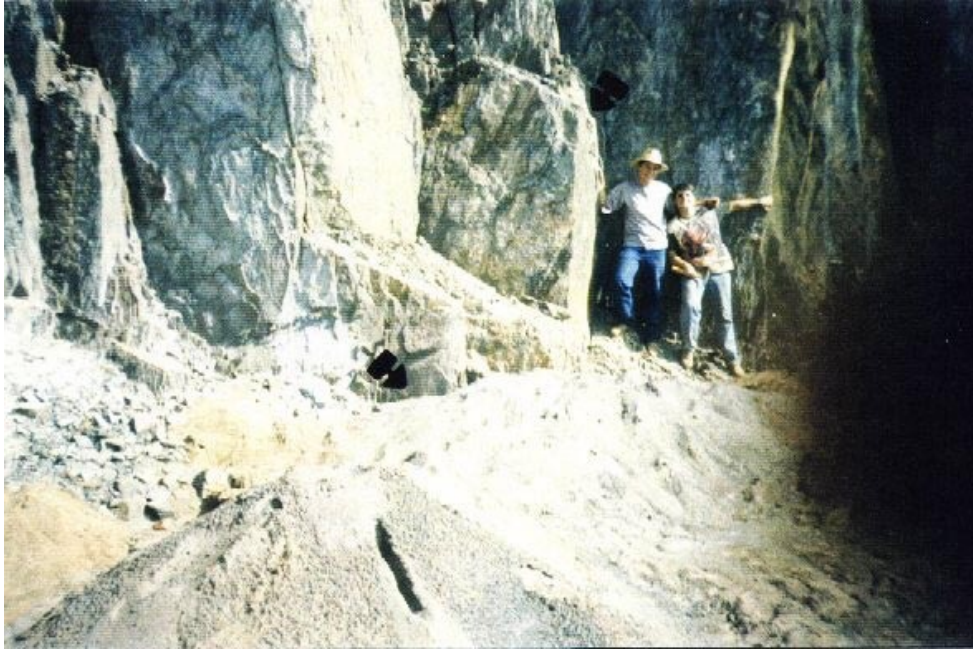


Figura 2.9 - Detalhe para blocos em itabirito duro, no talude mapeado na Mineração Rio Bravo. Observa-se nitidamente o encontro do plano de xistosidade/acamamento com o plano de fratura, na definição dos blocos.

Foi identificada ruptura planar na hematita e itabirito compactos, gerando blocos de dimensões centimétricas a métricas. No itabirito e hematita friáveis, há a predominância da ruptura planar, com placas cujas dimensões são da ordem de centímetros, geradas a partir das superfícies de xistosidade. O tombamento de blocos também pode ser observado no banco 3, onde predomina a hematita compacta. Existem porções mais estáveis no itabirito duro e menos estáveis na hematita e

itabirito friáveis, e em uma parte da hematita compacta. A hematita friável é a litologia mais problemática, pois apresenta alta densidade de descontinuidades e alto grau de alteração. O itabirito compacto é considerado como a litologia mais estável.

Para a determinação do índice **RQD**, foi considerada a abordagem de Priest & Hudson (op.cit.). Os resultados encontrados para os índices **RMR**, **SMR** e **Q** são:

LITOLOGIA	RMR	SMR	Q
Hematita compacta	66	42	2.65
Itabirito compacto	68	60	3.70
Hematita friável	48	44	2.22
Itabirito friável	63	62	4.85

Segundo o índice **RMR**, o maciço rochoso pode ser considerado como regular (hematita friável) a bom (itabirito compacto e friável e hematita compacta) cujas classes são III e II, respectivamente. Para os itabiritos e para a hematita compacta, os valores obtidos são altos se considerarmos o que foi observado no campo.

De acordo com o sistema **SMR**, o maciço é classificado como normal e parcialmente estável (classe III), e este resultado é coerente. Para o itabirito friável, que é considerado bom e estável, o resultado não é coerente.

Com relação ao índice **Q**, o maciço é considerado pobre, a única exceção sendo também o itabirito friável, qualificado como regular. Esta classificação é coerente com as observações de campo.

Os valores para ângulo de atrito e coesão, determinados a partir do sistema **RMR** são: 25 a 35° e 200 a 300 kPa ~~na~~ hematita friável, e 35 a 45° e 300 a 400 kPa, ~~nas~~ demais litologias. Os valores de ângulo de atrito determinados a partir do sistema **Q** são de 25 a 30° ~~o~~ itabirito friável e 20 a 25° ~~as~~ demais litologias.

Excluído: ¶

Excluído: para

Excluído: para

Excluído: para

Excluído: para

2.5- Conclusões

Os resultados apresentados neste capítulo mostram as dificuldades de determinação dos índices RQD, Q, RMR e SMR. Mostram a necessidade de estudar a consistência dos resultados encontrados com os dados obtidos no campo. Muitas vezes os índices levam a conclusões que não correspondem ao que é observado. Os parâmetros e características empregados nos sistemas de classificação geomecânica e os sistemas de ponderação constituem uma metodologia coerente.

É necessário ser cuidadoso na consideração dos resultados, pois pelo menos dois índices devem ser determinados: o primeiro, na época da escavação, podendo ser ou não relativo a rochas sãs; e o segundo, após a rocha estar exposta aos agentes intempéricos, tornando-se mais alterada do que na época em que foi escavada. Ressalta-se, portanto, a necessidade de novas avaliações, a serem realizadas com o passar do tempo. Deve-se executar uma avaliação sistemática das condições do talude, principalmente na estação chuvosa, devido à presença de descontinuidades preenchidas por argilas expansivas.

Verificou-se que os sistemas se aplicam bem em rochas como o gnaiss. Para os outros tipos de rocha avaliados neste trabalho, torna-se necessária a adaptação dos métodos utilizados, ou a utilização de métodos que forneçam resultados compatíveis com as situações observadas em campo.

2.6 – Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –ABNT – Solos e Pavimentação – **Normas Brasileiras** apud Ricardo, H.S. & Catalani, G. (1990). **Manual Prático de Escavação – Terraplenagem e Escavação de Rocha**. São Paulo: Pini, 1958. 668p.

AUGUSTO FILHO, O. & VIRGILI, J.C.– Estabilidade de Taludes. In:

OLIVEIRA, A.M.S, BRITO, S.N.A (ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. Cap.15, p. 243-269.

BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support - **Rock Mechanics**, n. 6, 1974. p. 183-236.

BIENIAWSKI, Z.T. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. **Trans.** South African Institute of Civil Engineering 15, 1973. p. 335-344.

BIENIAWSKI, Z.T. **Engineering Rock Mass Classifications - A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1989. 251p.

Formatado: Recuo: À esquerda: 0 pt

CLERICI, A., GRIFFINI, L., POZZI, R. Procedure for the execution of detailed geomechanical structural surveys on rock masses with a rigid behavior. In: ROSSMANITH (ed.). **Mechanics of Jointed and Faulted Rock**. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers, 1990. p. 87-94.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA NUCLEAR-CDTN. **Manual Técnico**. Rio de Janeiro. In: NONATO, C.A. (1987) **Geologia de Campo**. Ouro Preto: Escola de Minas da UFOP, [1986]. 13p. (Notas de aula)

DAVIS, G.H. **Structural Geology of Rocks and Regions**. Singapura: John Wiley and Sons, 1984. 492p.

DEARMAN, W.R. Weathering classification in the characterization of rock: a revision. **Bulletin IAEG**, Krefeld, n.13, 1976. p. 123-127 apud VAZ, L. F. (1996) **Grau de Alteração de Rochas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA,8, v.1, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABGE, 1996. p.71-84.

DEERE, D.U. , PATTON, F.D. Slope stability in residual soils. PACSMFE, 4, v.1, Puerto Rico. 1971. p. 87-170. C

DUNCAN, J.M. , GOODMAN, R.E. **Finite element analysis of slopes in jointed rock**. Berkeley: U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Contract

- DACW39-67-C-0091. Geotechnical Engineering, Univ. Califórnia, 1968 (Report) apud GIANI, G.P. (1992) **Rock Slope Stability Analysis**. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 361p.
- FERREIRA, F.M. **Estabilidade de Taludes em Solo e Rocha**. Carajás: Cia. Vale do Rio Doce-Diretoria de Ferrosos, 1998. 113p.
- FIGUEIREDO FERRAZ **Estudos de Estabilidade do Morro do Patrimônio**. Belo Horizonte: Minerações Brasileiras Reunidas S.A., 1992. 61p.(Relatório).
- GRIPP, M.F.A.; NONATO, C.A. Caracterização Geológica-Geomecânica na Mineração de Ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA 8, v.1, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1996. p.95-104.
- GRIPP, M.F.A. ; NONATO, C.A. ; NOGUEIRA, J. A. Aspectos Geomecânicos na Mineração de Ferro do Quadrilátero Ferrífero. **REM: Revista da Escola de Minas**. Ouro Preto: v.53, n.2, 2000. p.117-124.
- GUIDICINI, G., OLIVEIRA, A.M.S., CAMARGO, F.P., KAJI, N. Um método de classificação geotécnica preliminar de meios rochosos. **SPGA**, São Paulo, 4, 1972. p. 275-282 apud VAZ, L. F. (1996) **Grau de Alteração de Rochas**. In:CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA 8, v.1, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1996. p.71-84.
- GUIDICINI, G. & NIEBLE, C.M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984. 196p.
- HOEK, E. Strength of Rock and Rock Masses. **ISRM Newsjournal**, v.2, n.2, 1995. apud VAZ, L.F. (1996a) Classificação Genética dos Solos e dos Horizontes de Alteração de Rocha em Regiões Tropicais. In: **Solos e Rochas – revista brasileira de geotecnia**, São Paulo, v.19, n.2, p.117-136.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS Métodos para Descrição Quantitativa de Descontinuidades em Maciços Rochosos. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1983, 132p. Tradução de "Suggested Methods

for the Quantitative Description of Rock Masses". In: **Intern. Journal on Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, Oxford, v. 15, n.6, p. 319-368.

LEINZ, V. & AMARAL, S. E. **Geologia Geral**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1990. 397p.

MAGALHÃES, F.S. & CELLA, P.R.C. Estrutura dos Maciços Rochosos. In: OLIVEIRA, A.M.S, BRITO, S.N.A (ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. Cap.3, p. 39-55.

NONATO, C.A.; GRIPP, M.F.A. Utilização de Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos no Estudo da Estabilidade de Taludes em Minerações de Ferro do Quadrilátero Ferrífero. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE ENGENHEIROS GEOTÉCNICOS JOVENS 2, 1995. **Anais...**Rio de Janeiro: PUC, p. 219 - 231.

NONATO, C. A. **Utilização de Classificações de Maciços Rochosos no Estudo da Estabilidade de Taludes Pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero, MG**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da UFMG, 1994.

PALMSTROM, A. Characterizing the degree of jointing and rock mass quality. **Internal Report**. Berdal, Oslo, 1975.

PASTORE, E.L. , FORTES, R.M. Caracterização e Classificação de Solos. In: OLIVEIRA, A.M.S, BRITO, S.N.A (ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE, 1998. Cap.12, p. 197-210.

PRIEST, S.D., HUDSON, J.A. Discontinuity spacing in rock. **International Journal of Rock Mechanics**, Min. Sci. & Geomech., cap. 13, 1976. p.134-153.

RICARDO, H.S., CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação – Terraplenagem e Escavação de Rocha**. São Paulo: Pini, 1990.668p.

ROMANA, M.R. Aplicacion de la classificacion SMR, basada en la de Bieniawski, para prever los metodos adequados de correccion de taludes. In:

II SIMPOSIO SOBRE TALUDES Y LADERAS INESTABLES, Madrid. **Volumen de Comunicaciones...** Madrid, 1988. p.535-558

ROMANA, M.R. Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating. **Comprehensive Rock Engineering : Principles, Practice & Projects** . Oxford, vol.3, cap.23,1993. p.575-600.

SCARPELLI, A.G. **Classificação Geomecânica Aplicada à Avaliação da Estabilidade de Taludes em Minas de Ferro do Quadrilátero Ferrífero**. São Carlos: USP, 187p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 1994.

SERRA JR, E. ; OJIMA, L.M. Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. In: OLIVEIRA, A.M.S, BRITO, S.N.A (ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Cap.13, 1998. p. 211-226.

VAZ, L.F. Classificação Genética dos Solos e dos Horizontes de Alteração de Rocha em Regiões Tropicais. In: **Solos e Rochas – revista brasileira de geotecnia**, São Paulo, v.19, n.2, 1996.p.117-136.

CAPÍTULO 3: ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES

Este capítulo aborda o estudo do parâmetro espaçamento das descontinuidades, discutindo as formas usuais de coleta e tratamento de dados. As principais dificuldades encontradas são salientadas.

3.1 – Introdução

O espaçamento de descontinuidades (espaçamento médio ou modal de cada família de descontinuidades), condiciona o tamanho dos blocos individuais que compõem um maciço rochoso. Como a resistência ao cisalhamento de um maciço rochoso e os

mecanismos de ruptura e deformação atuantes dependem do tamanho dos blocos, os modos de ruptura de taludes em rocha estão diretamente relacionados à presença de descontinuidades.

As propriedades relacionadas à engenharia de rochas tais como “aptidão” à escavação, características de fragmentação e permeabilidade do maciço rochoso também variam com o espaçamento das descontinuidades.

Se o maciço se encontra intensamente fraturado, e este fraturamento é caracterizado por um espaçamento pequeno, o comportamento do maciço será similar ao comportamento de materiais granulares. Se os espaçamentos são grandes, o efeito condicionante da estabilidade será o tamanho de blocos.

A determinação, no campo, dos valores de espaçamento pode ser feita utilizando-se a técnica designada “scanline”, ou através de medidas efetuadas com o auxílio de uma trena e que consideram apenas as descontinuidades adjacentes que compõem famílias, num intervalo nunca menor do que 3m, em cada afloramento estudado (ISRM, 1983).

Após a fase de coleta de medidas faz-se necessário agrupá-las, de maneira que se possa determinar o valor médio e modal correspondente a cada família identificada, no maciço rochoso em estudo. De acordo com a ISRM (1983), a distribuição dos dados deve ser apresentada através de histogramas, devendo ser construído um histograma para cada família, em cada talude ou afloramento estudado. Este capítulo analisa os resultados da adoção de uma média global, como observado em algumas minerações da região, levando-se em conta os dados de todos os afloramentos ou taludes de uma só vez, e a adoção de médias locais determinadas para cada talude, afloramento ou zona, como recomendado.

3.2 – Revisão da Literatura

3.2.1 - Identificação das Descontinuidades

Segundo Hasui & Mito (1992), as descontinuidades devem ser identificadas a partir de:

1. definição de domínios homogêneos;
2. levantamento sistemático em cada um desses domínios;
3. tratamento dos dados levantados;
4. definição das famílias presentes;
5. definição do bloco unitário e de sua orientação.

Para as descontinuidades, um domínio homogêneo existe quando, em uma determinada área, elas apresentam a mesma atitude. A identificação destes domínios pode ser feita diretamente no campo, ou a partir de dados estruturais levantados, em pontos da porção do terreno considerada. Se são encontrados pontos sucessivos com o mesmo padrão, tem-se caracterizado um domínio. Se há mudança no padrão, tem-se indícios imediatos de mudança de domínio (Hasui & Mito, op.cit.)

Normalmente, o tratamento de dados é feito através de estereogramas, a partir dos quais pode-se definir as famílias de descontinuidades, suas orientações médias, e o bloco unitário. Este bloco representa o poliedro de fragmentação do maciço, e sua dimensão média é deduzida considerando os **espaçamentos médios** das famílias.

Se os espaçamentos são extremamente pequenos, a orientação das descontinuidades é, segundo a ISRM (1983), de pequena importância. A ruptura pode ocorrer tanto por rotação quanto por queda de pequenos pedaços de rocha.

Se o maciço rochoso apresenta várias famílias de descontinuidades que podem contribuir para que ocorram deslizamentos, e sua resistência ao cisalhamento é baixa, **a importância do espaçamento aumenta** (ISRM, 1983). As características de percolação também são diretamente afetadas pela frequência das descontinuidades no maciço.

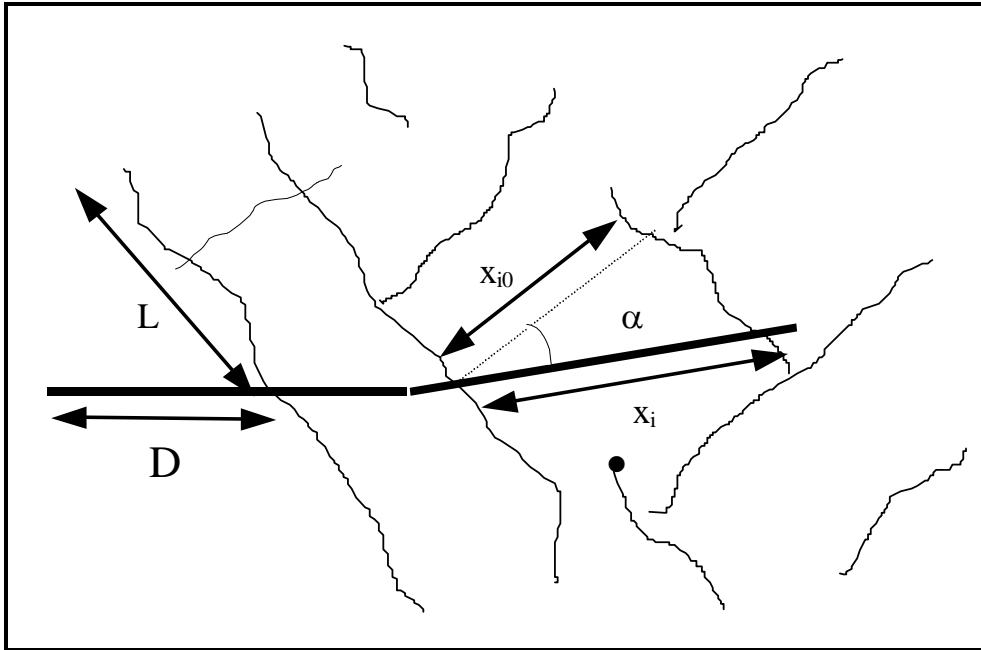
É importante destacar que o maciço rochoso deve ser dividido em zonas homogêneas, ou zonas dentro das quais ele apresenta estruturas e propriedades geomecânicas relativamente uniformes. Neste caso, no mínimo uma pesquisa utilizando scanline deve ser feita em cada zona.

3.2.2 – A Técnica “Scanline”

A “Scanline” é uma linha inserida na superfície do maciço rochoso. O levantamento de dados consiste na anotação dos valores de espaçamento para todas as descontinuidades que interceptam a scanline ao longo do seu comprimento.

Nos trabalhos práticos, uma trena presa na superfície da rocha através de pequenos pedaços de arame, fixos por pregos martelados na própria rocha é considerada uma “scanline” para levantamento de dados. Os pregos devem estar espaçados em intervalos de aproximadamente 3m ao longo da trena, que deve ser mantida tão esticada e tão reta quanto possível. É ideal que cada localização da scanline seja fotografada com seu número ou posição adequadamente identificado. Uma vez que a scanline esteja instalada, a pessoa responsável pela coleta de dados deve anotar as seguintes características, para cada descontinuidade que intercepte a scanline:

- a) a distância D , ao longo da scanline, a partir do seu início até o ponto em que a descontinuidade intercepta a scanline (ver figura 3.1);
- b) o comprimento L da descontinuidade, medido acima da scanline (ver figura 3.1);



Legenda

- D = distância até o ponto em que a descontinuidade intercepta a scanline;
 L = comprimento da descontinuidade, medido acima da scanline;
 x_{i0} = espaçamento verdadeiro;
 x_i = espaçamento entre duas descontinuidades;
 α = ângulo entre a normal à descontinuidade e a scanline;
 • = ponto de finalização da descontinuidade;
 ~~~~~ = traço das descontinuidades;  
 ——— = scanline

Figura 3.1. Coleta de dados de espaçamento utilizando a técnica da scanline, modificada de Brady & Brown (1985)

- c) o tipo de finalização T, da descontinuidade, como sendo: A = em uma outra descontinuidade; I = no material rochoso ou O = não visível ou estendendo-se além da extremidade da exposição;

Excluído: ¶

- d) a direção de mergulho e o mergulho da descontinuidade medidos no ponto de intersecção com a scanline, ou próximo a ele;
- e) o padrão de rugosidade;
- f) comentários, particularmente sobre a natureza de algum preenchimento presente, abertura da descontinuidade, origem ou tipo de descontinuidade.

Excluído: <#>a direção de mergulho e o mergulho da descontinuidade medidos no ponto de intersecção com a scanline, ou próximo a ele;¶¶<#>o padrão de rugosidade;¶¶

Se, como mostrado na figura 3.1, o espaçamento aparente entre duas descontinuidades é  $x_i$ , e o ângulo entre a normal à descontinuidade e a scanline é  $\alpha$ , o espaçamento verdadeiro  $x_{io}$  pode ser calculado da seguinte maneira:  $x_{io} = x_i \cdot \cos\alpha$ .

Tem-se o espaçamento verdadeiro medido, somente quando  $\alpha = 0$ . Nos casos extremos, quando a descontinuidade e a scanline são paralelas ( $\alpha = 90$ ), nenhuma intersecção será observada. É necessário, portanto, que levantamentos utilizando a scanline em uma face sejam efetuados em duas direções ortogonais, normalmente uma horizontal e uma vertical, e que os comprimentos da scanline sejam preferencialmente iguais.

### 3.3 – Metodologia

#### 3.3.1 – Identificação das descontinuidades

Este trabalho foi feito durante o levantamento de taludes urbanos, de acordo com a recomendação de Hasui & Miotto (op.cit.).

Excluído: mapeamento

#### 3.3.2 – Levantamento de dados

Excluído: ¶¶

Após a identificação das descontinuidades, foram coletadas medidas de direção de mergulho e mergulho das mesmas, com o intuito de se construir diagramas de frequência, que nos permitem definir as famílias presentes.

As distâncias entre as descontinuidades adjacentes foram medidas com a trena colocada perpendicularmente aos traços expostos das mesmas, de acordo com a ISRM (op.cit.). Este trabalho foi realizado em toda a extensão dos taludes mapeados,

Excluído: ¶¶

não sendo utilizada, portanto, a técnica “scanline”. O comprimento das amostragens foi de 7 a 24m para os quatro primeiros taludes, e 14 a 32m, para os demais.

### 3.3.3 – Construção de diagramas de freqüência e de histogramas com as medidas de espaçamento

Para a determinação da atitude preferencial das feições mapeadas, foi utilizado o programa DIPS 3.0 (“Data Interpretation Using Stereographic Projection”), que permitiu também a representação dos grandes círculos, correspondentes aos planos característicos de cada estrutura planar identificada.

A elaboração dos histogramas de freqüência se deu através de planilha de cálculo, que também permitiu determinar o espaçamento médio de cada família de descontinuidades, e o intervalo em que se encontra o espaçamento modal.

Excluído: do programa EXCEL 2000

Os intervalos de classe (0 a 6cm, 6 a 20cm, 20 a 60cm e 60 a 200cm) são sugeridos pela ISRM (op.cit.), e os histogramas foram construídos de duas formas:

- 1) Os dados coletados foram considerados para cada família de descontinuidades, por talude analisado, conforme sugestão da ISRM.
- 2) Os dados coletados foram considerados para cada família de descontinuidades, juntando-se todos os taludes mapeados.

Obs.: Não foram elaborados histogramas relativos à xistosidade, devido ao fato de que tais superfícies possuem espaçamento inferior a 6cm.

### 3.4 – Resultados e Discussão

Os dados utilizados foram coletados em 18 (dezoito) taludes urbanos, cuja altura varia de 10 a 30m, localizados na Av. Raja Gabaglia, sentido Centro/BH Shopping, nas proximidades do Bairro Novo Santa Lúcia (ver figura 3.2). Posicionam-se quase na esquina com a Rua José Rodrigues Pereira, que permite o acesso ao Bairro Estrela Dalva, Belo Horizonte, MG.

O maciço rochoso pertence à Formação Cercadinho, Grupo Piracicaba, Super-Grupo Minas, Quadrilátero Ferrífero e constitui-se basicamente por uma alternância de filito prateado e quartzito, ora branco amarelado e extremamente fraturado, ora ferruginoso (ver figuras 3.3 e 3.4).

Excluído: ¶

Foram identificadas no campo, além da xistosidade, três famílias de descontinuidades, denominadas de Família 1, Família 2 e Família 3 (ver tabela III.1). A orientação preferencial das mesmas, caracterizada pela direção de mergulho e pelo mergulho, foi determinada através de diagramas de freqüência (ver figura 3.5), sendo a seguinte:

- Xistosidade: 094/34;
- Família 1: 318/62;
- Família 2: 036/84;
- Família 3: 230/69.

Considera-se a existência de um único domínio estrutural.

Há uma grande diferença nos valores do espaçamento médio obtido quando se constrói o histograma por talude, média local (ver tabela III.1 e figuras 3.6, 3.7 e 3.8) e quando se constrói o histograma por tipo de rocha, considerando todos os taludes ao mesmo tempo, média global (ver tabela III.2 e figura 3.9)

Ao se analisar os histogramas que consideram todos os dados de uma só vez, percebe-se que as três famílias de descontinuidades apresentam comportamento semelhante (os histogramas são muito parecidos – [ver figura 3.9](#), e o intervalo em que se encontra o espaçamento modal é o mesmo).

Entretanto, quando se analisam os dados levantados para cada talude, observa-se o seguinte:

▲

▲

Formatado: Fonte: Itálico

Formatado: Fonte: Itálico

Formatado: Normal



Formatado: Fonte: Itálico

*Figura 3.2- Vista parcial de talude constituído pela alternância de filitos e quartzitos (Formação Cercadinho, Quadrilátero Ferrífero), onde foram coletados os dados de espaçamento entre famílias de descontinuidades. A cobertura superficial observada apresenta espessura de cerca de 0,5m. Ao pé do talude, percebe-se grande quantidade de material rolado, já encoberto por vegetação. Durante o período chuvoso (outubro a março), é possível observar a presença de blocos soltos na pista da avenida.*





*Figura 3.3 – Parte de talude em filito prateado, Formação Cercadinho, Grupo Piracicaba, localizado na Av. Raja Gabaglia – Belo Horizonte. Detalhe para blocos de dimensões centimétricas a decimétricas, soltos na porção inferior da foto. As superfícies de xistosidade são bastante evidentes.*



*Figura 3.4 – Porção de talude em quartzito (Formação Cercadinho, Grupo Piracicaba), localizado na Av. Raja Gabaglia, Belo Horizonte. Detalhe para o padrão de fraturamento exibido e para a construção de moradia, na região da crista do talude.*

Tabela III.1. Valores de espaçamento médio por família de descontinuidade, por talude analisado. Nos taludes ausentes não foram identificadas as respectivas famílias de descontinuidades.

| FAMÍLIA 1 |                   |                        | FAMÍLIA 2 |                   |                        | FAMÍLIA 3 |                   |                        |
|-----------|-------------------|------------------------|-----------|-------------------|------------------------|-----------|-------------------|------------------------|
| Talude    | Número de Medidas | Espaçamento Médio (cm) | Talude    | Número de Medidas | Espaçamento Médio (cm) | Talude    | Número de Medidas | Espaçamento Médio (cm) |
| 1         | 6                 | 61,7                   | 1         | 6                 | 11,8                   | -         |                   |                        |
| -         |                   |                        | 2         | 8                 | 28,2                   | -         |                   |                        |
| 3         | 19                | 34,5                   | 3         | 25                | 14,0                   | 3         | 6                 | 15,7                   |
| -         |                   |                        | 4         | 7                 | 36,5                   | 4         | 9                 | 20,9                   |
| 5         | 46                | 19,9                   | 5         | 9                 | 28,0                   | 5         | 10                | 17,0                   |
| 6         | 26                | 29,4                   | -         |                   |                        | -         |                   |                        |
| -         |                   |                        | 8         | 14                | 9,5                    | -         |                   |                        |
| -         |                   |                        | 8         | 14                | 11,7                   | 8         | 26                | 17,2                   |
| -         |                   |                        | 9         | 90                | 11,1                   | 9         | 44                | 9,3                    |
| -         |                   |                        | 10        | 10                | 11,7                   | 10        | 28                | 8,9                    |
| -         |                   |                        | -         |                   |                        | 11        | 25                | 13,6                   |
| 12        | 66                | 10,0                   | 12        | 37                | 7,0                    | 12        | 34                | 9,4                    |
| 13        | 14                | 9,9                    | -         |                   |                        | -         |                   |                        |
| -         |                   |                        | -         |                   |                        | -         |                   |                        |
| 15        | 7                 | 33,2                   | 15        | 107               | 27,9                   | -         |                   |                        |
| -         |                   |                        | -         |                   |                        | -         |                   |                        |
| 17        | 76                | 20,2                   | 17        | 61                | 22,2                   | -         |                   |                        |
| 18        | 64                | 14,3                   | 18        | 34                | 16,7                   | -         |                   |                        |

Formatado: Fonte: Itálico

Formatado: Fonte: 11 pt

Tabela III.2. Espaçamentos médios e modais das famílias de descontinuidades, considerando todos os taludes ao mesmo tempo.

| FAMÍLIA DE DESCONTINUIDADES | NÚMERO DE MEDIDAS | ESPAÇAMENTO MÉDIO (cm) | INTERVALO EM QUE SE ENCONTRA O ESPAÇAMENTO MODAL (cm) |
|-----------------------------|-------------------|------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1                           | 324               | 19,6                   | 6-20                                                  |
| 2                           | 419               | 18,6                   | 6-20                                                  |
| 3                           | 182               | 12,4                   | 6-20                                                  |

Formatado: Fonte: Times New Roman

Tabela formatada

Formatado: Fonte: Times New Roman

Formatado: Fonte: Times New Roman

Formatado: Fonte: Times New Roman

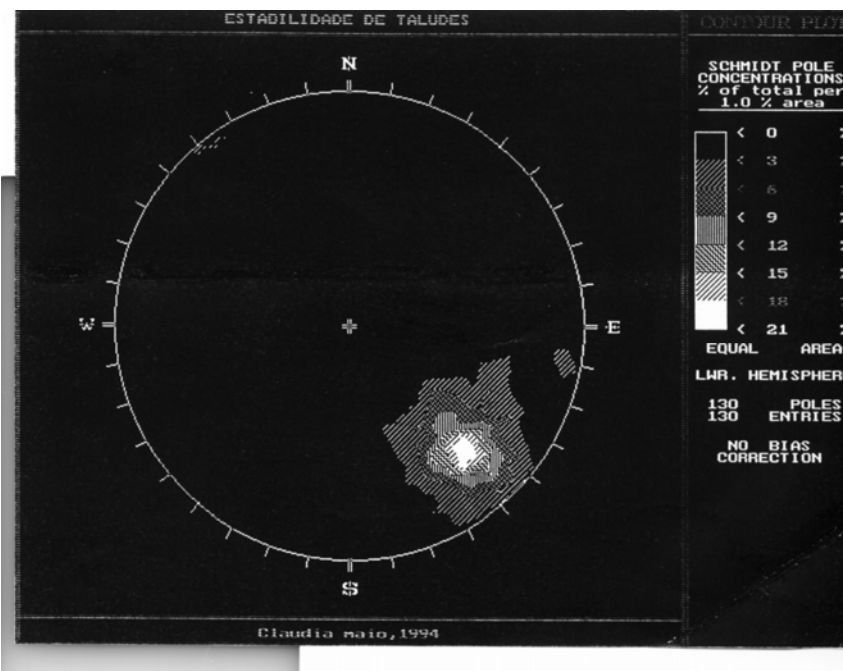
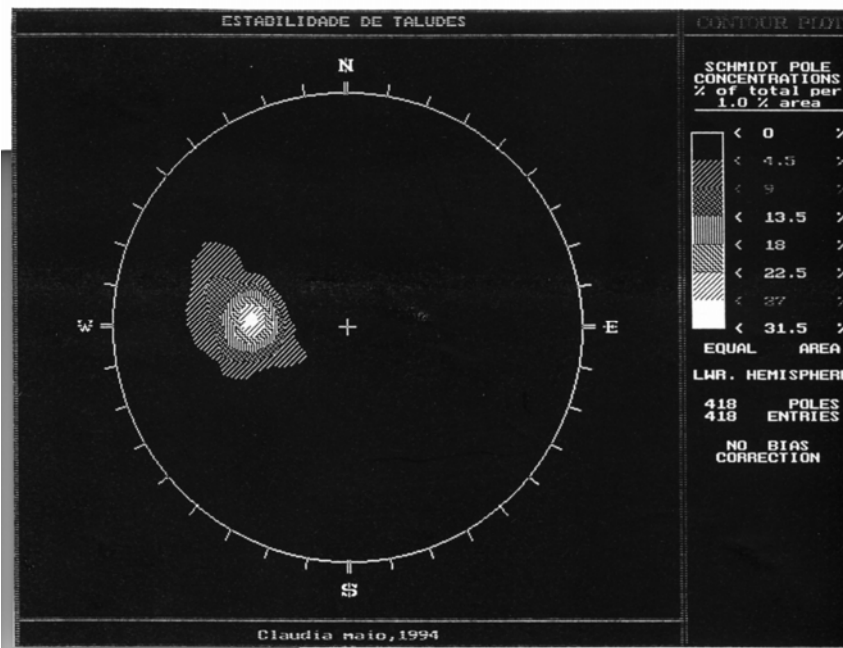


Figura 3.5 (a) – Diagramas de frequência elaborados para as superfícies de descontinuidade identificadas na Formação Cercadinho. Tem-se a xistosidade (acima), e a família de descontinuidades 1 (abaixo).

Excluído: -Quebra de página-

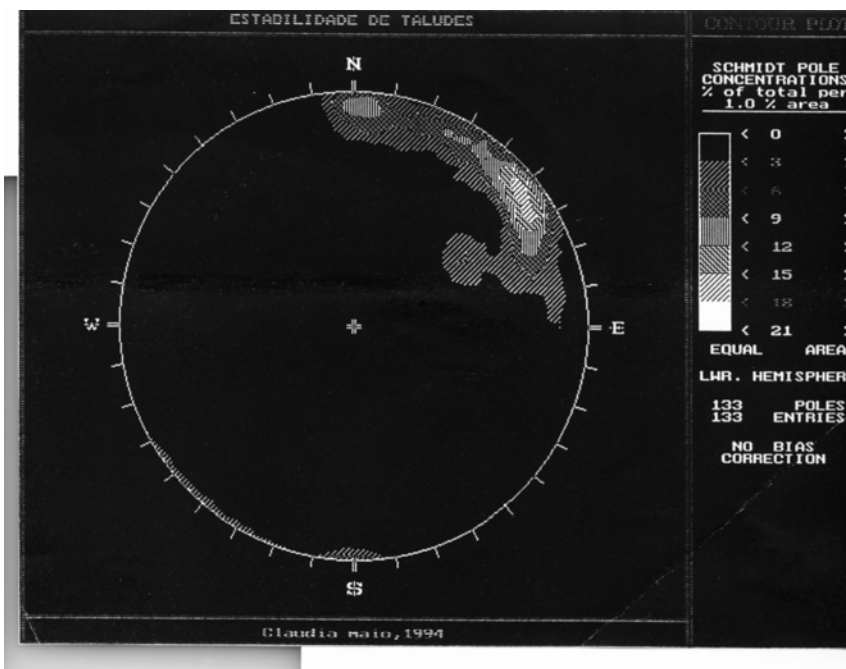
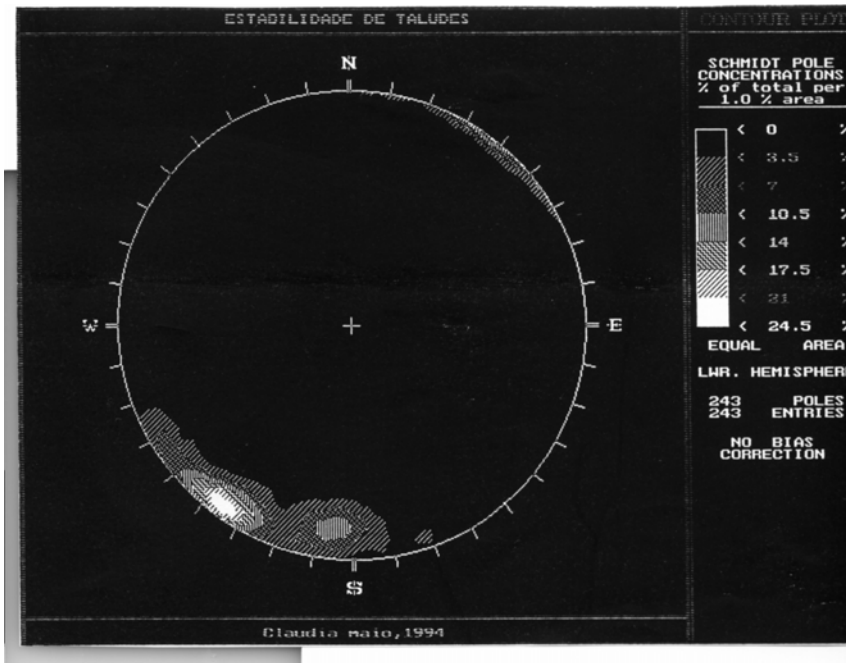


Figura 3.5(b) – Diagramas de frequência construídos para as superfícies de descontinuidade identificadas na área 6. Tem-se a família de descontinuidades 2 (acima) e a família de descontinuidades 3 (abaixo).

Excluído: -Quebra de página-

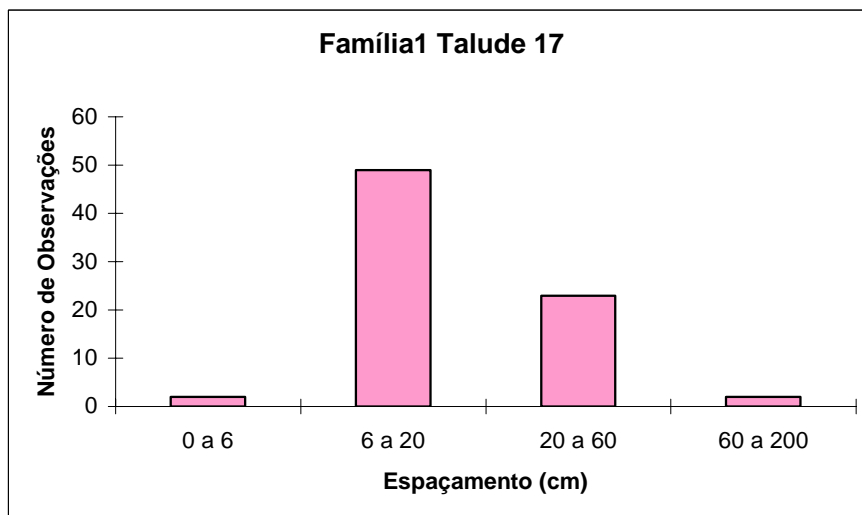
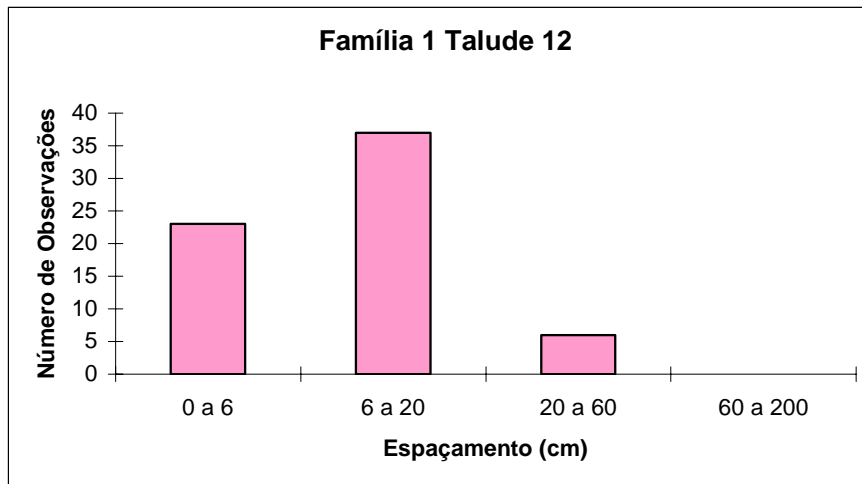
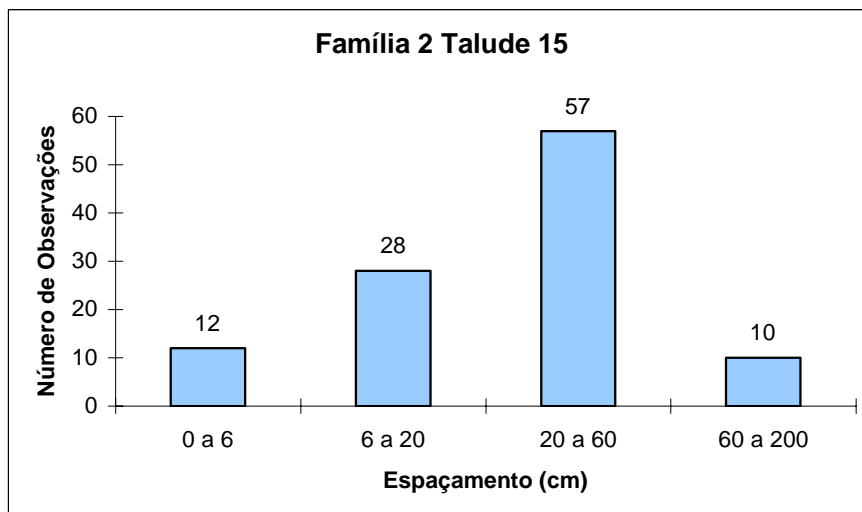
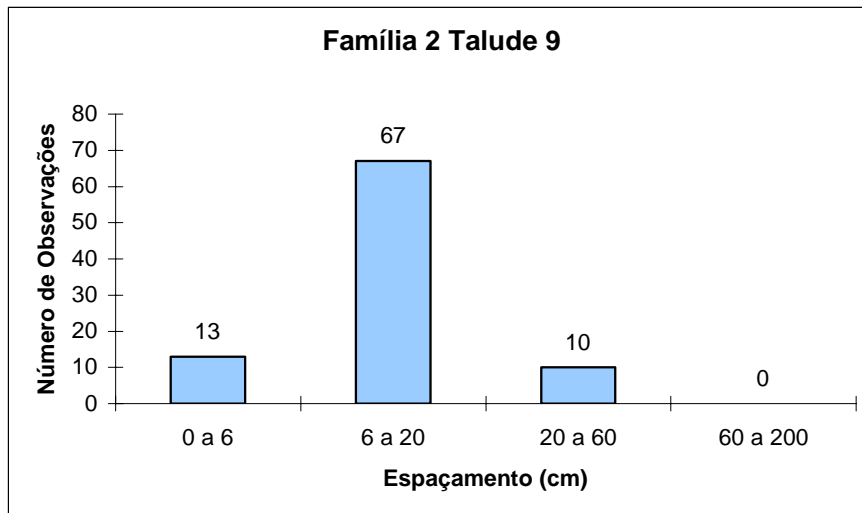
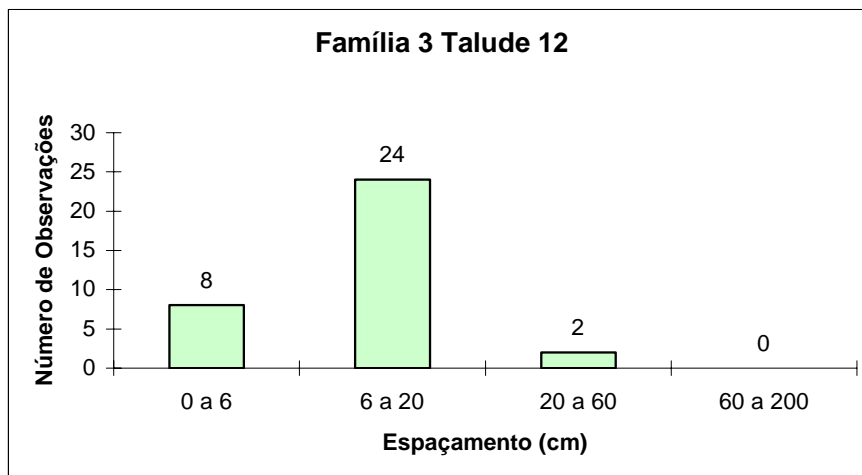
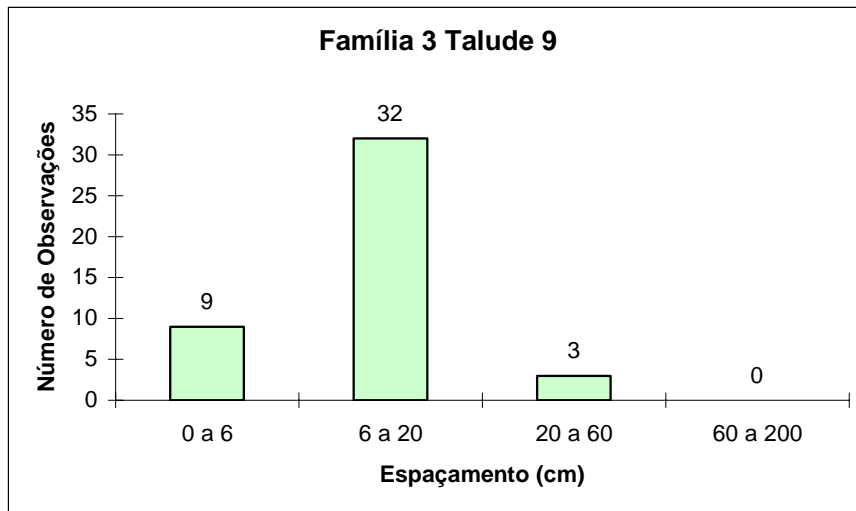


Figura 3.6 – Histogramas relativos ao espaçamento da família 1 de descontinuidades. Destaca-se o fato de o espaçamento modal estar no intervalo de 6 a 20cm.



*Figura 3.7 – Histogramas construídos para a família de descontinuidades 2, referentes aos taludes 9 e 15. Nesse caso, o espaçamento modal encontra-se em intervalos diferentes (6 a 20 e 20 a 60cm, respectivamente).*



*Figura 3.8 – Histogramas relativos aos taludes 9 e 12, para a família de descontinuidades 3. Percebe-se grande semelhança entre os dois, o que pode nos levar a concluir sobre a homogeneidade de valores encontrados.*



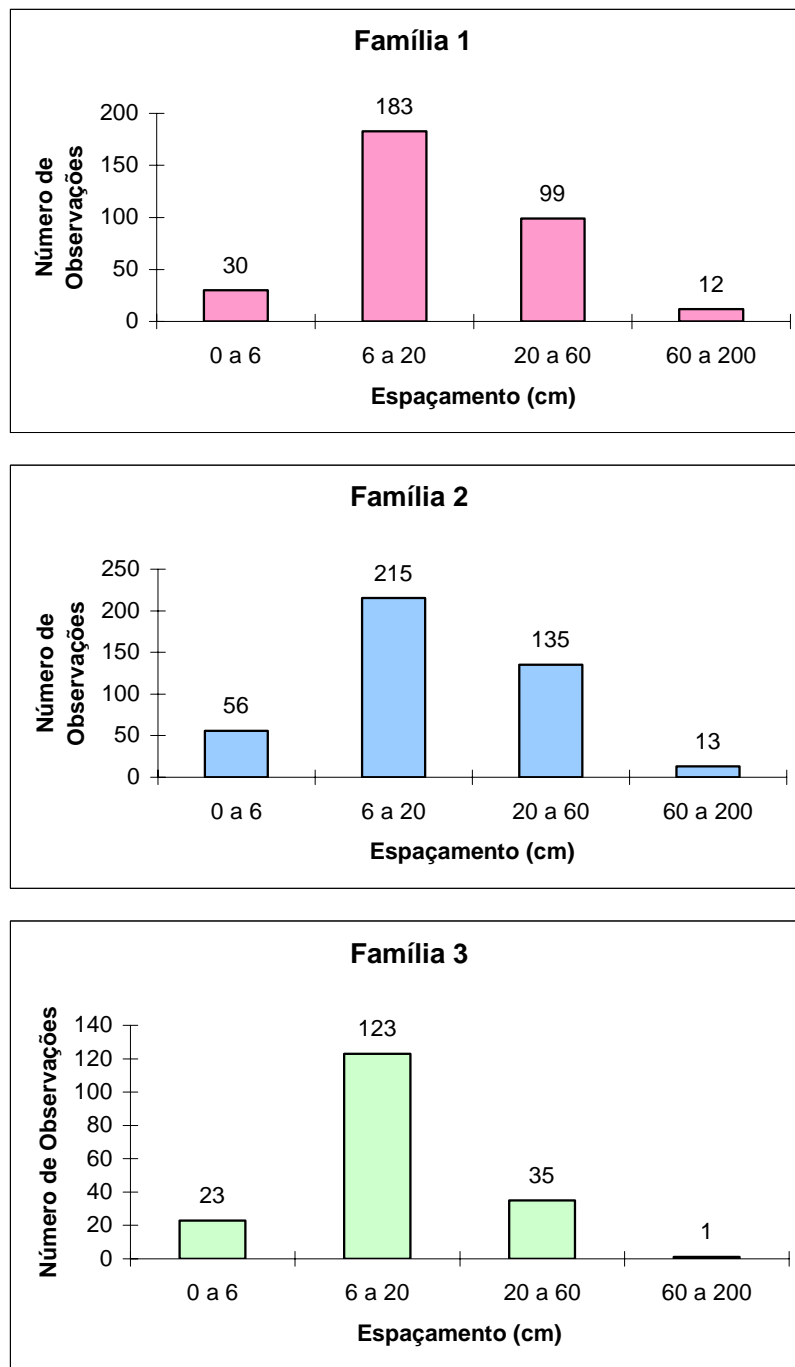


Figura 3.9 – Histogramas relativos aos espaçamentos medidos no campo para as famílias de descontinuidades 1, 2 e 3, considerando-se todas as medidas feitas em todos os taludes da área em estudo.

- *Família 1:*

- O espaçamento médio varia de 9,9cm a 61,7cm, valores muito distantes de 19,6cm, encontrado anteriormente;
- Os valores são maiores quando se tem um número menor de medidas disponíveis. Esta redução do número de medidas é devida às dificuldades encontradas no trabalho de levantamento, (faces dos taludes encobertas por material solto e lixo). Deve-se tomar cuidado quando não se tem um número razoável de medidas, pois as diferenças são grandes;
- Quando o número de medidas é semelhante, nota-se que os histogramas também se assemelham (ver figura 3.6).

**Excluído:** Entretanto, quando se analisam os dados levantados para cada talude, observa-se o seguinte:¶

**Excluído:** mapeamento

- *Família 2:*

- O espaçamento médio varia de 7,0 a 36,5cm, valores também distantes de 18,6cm, encontrado para todos os taludes;
- Mesmo onde foram feitas muitas medidas (exemplo do talude 15), o valor para o espaçamento médio é alto, relativamente aos demais. Não há correspondência de valores com o número de medidas;
- Novamente com relação ao talude 15, observa-se que o espaçamento modal ocorre num intervalo superior ao estabelecido anteriormente, o que pode estar ocorrendo para outros taludes, com relação a essa família.

- *Família 3:*

Apresenta o comportamento mais homogêneo, se compararmos com as outras duas famílias. O espaçamento médio varia de 8,9 a 20,9cm, não muito distantes de 12,4cm, valor encontrado para todos os taludes.

### 3.5 – Conclusões

Alguns pontos devem ser salientados ao final deste trabalho :

- a necessidade de divisão em zonas e subzonas com estruturas e propriedades geomecânicas relativamente homogêneas, tendo em vista o fato de que o espaçamento das discontinuidades é um parâmetro importante no estabelecimento de domínios homogêneos ;

- (ii) a necessidade de medida sistemática dos espaçamentos ao longo dos afloramentos, independentemente de quão tediosa ou inútil possa parecer esta atividade;
- (iii) a necessidade de determinação de valores médios de espaçamento para cada zona ou subzona estudada.

A utilização de média global para uma grande área ou região estudada pode levar a resultados enganosos, já que os valores reais de um talude ou zona podem ser bastante diferentes.

### **3.6 – Referências Bibliográficas**

BRADY, B. H. G. , BROWN, E. T. **Rock Mechanics for Underground Mining**. London: Allen & Unwin, 1985. 527p.

**DIPS, version 3.0. User Manual**. Rock Engineering Group, University of Toronto, 1989, 138p.

HASUI, Y. , MIOTO, J.A) **Geologia Estrutural Aplicada**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia: Votorantim, 1992. 459p.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1983. 132p. Tradução de “Suggested Methods for the Quantitative Description of Rock Masses” In: **Intern. Journal on Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.15, n.6, p.319-368.

NONATO, C. A. **Utilização de Classificações de Maciços Rochosos no Estudo da Estabilidade de Taludes Pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero, MG**. Belo Horizonte: UFMG, 162p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1994.

## CAPÍTULO 4: PARÂMETROS PARA PROJETOS DE ENGENHARIA DE TALUDES

Neste capítulo, alguns parâmetros necessários aos projetos de engenharia de taludes são estudados. A identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha é abordada. Os testes para caracterização da rocha intacta são discutidos: teste para determinação da resistência à compressão uniaxial, da resistência à tração e a medida da velocidade do som para avaliar o grau de fissuramento. As dificuldades encontradas são salientadas. A avaliação da condutividade hidráulica em maciços rochosos é discutida.

### 4.1- Introdução

Os fenômenos que se relacionam aos movimentos de rochas e de solos são estudados geralmente com a finalidade de aumentar o nível de conhecimento do problema em regiões específicas, tomadas como objeto de estudo por constituírem, por exemplo, áreas expostas em zonas urbanas, e áreas expostas pela atividade de mineração. Os fatores condicionantes da estabilidade dos taludes são, segundo Constanzo Jr. (1994), os fatores geológico-geomecânicos, os fatores geométricos e os fatores operacionais.

Os *fatores geológico-geomecânicos*, já vistos no Capítulo 2, dizem respeito ao conjunto de características do terreno relevantes para o projeto de engenharia de solos e rochas.

Os *fatores geométricos* vão determinar as dimensões dos taludes e encostas. Estes fatores são a altura, o ângulo de inclinação, a orientação dos taludes em relação às feições estruturais (direção de corte), e a concavidade ou convexidade dos mesmos.

Os *fatores operacionais* relacionam-se ao método construtivo ou de escavação dos taludes. Pode-se citar as vibrações de fogo de desmonte, a velocidade de avanço das escavações, o rebaixamento e o esgotamento do nível de água subterrânea, etc. O método construtivo, os equipamentos, as operações unitárias e a seqüência de

Excluído: cadência

operações devem ser estabelecidas em função das características geológicas-geomecânicas.

No projeto de engenharia, a análise destes fatores se justifica por questões econômicas e de segurança. As análises de estabilidade tanto na mineração quanto em áreas urbanas têm, segundo Giani (1992), o objetivo de subsidiar um projeto seguro e funcional de taludes tanto em rochas quanto em solos. Os *estudos preliminares* podem ser executados com a finalidade de se determinar os parâmetros críticos de um trabalho de estabilidade. *Estudos paramétricos* permitem-nos avaliar a influência dos parâmetros físicos e geométricos na estabilidade dos taludes.

Numa mina a céu aberto, a definição dos ângulos de talude para um nível de segurança preestabelecido tem grande importância na economicidade do empreendimento. Essa importância é maior, quanto maior for a altura do talude.

Para se estabelecer o nível de segurança mínimo, devem ser considerados vários fatores, dentre os quais:

- O provável prejuízo que a rupturaurpturaurptura, de algum talude poderá causar, em se tratando de perdas de vidas humanas, equipamentos e não atendimento a contratos de fornecimento já feitos;
- O aumento do custo causado pela retirada de estéril adicional, necessário para se aumentar o atual nível de segurança.

Excluído: queda

Excluído: assinados

A partir dos resultados dos estudos acima citados, pode-se obter elementos importantes para estabelecer a seqüência ótima de operações e o tempo de escavação do talude. No entanto, em mineração, a seqüência ótima e o tempo de vida da mina são determinados por critérios técnico-econômicos de engenharia, e não por critérios geomecânicos. Pode-se estabelecer os parâmetros de projeto tais como o ângulo e o modo de escavação do talude, ou a altura das bancadas e as medidas de prevenção, tais como muros de contenção e sistemas de drenagem ou atirantamento que podem estabilizar um talude. Uma análise de estabilidade pode também ser executada para avaliar as condições de equilíbrio de um talude natural.

Excluído: de minas

## 4.2 – Revisão da Literatura

### 4.2.1 – Identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha

A identificação dos tipos de ruptura de taludes de rocha é necessária para que o projeto de engenharia de um talude possa ser realizado. É com base no mecanismo de ruptura que escolhemos o algoritmo de cálculo. Em rochas estratificadas ou foliadas cortadas por descontinuidades, há várias possibilidades de movimentação de blocos ou placas ao longo dos planos de fraqueza, e uma grande variedade de formas de ruptura pode ser identificada.

Excluído: ¶

Quando várias famílias de descontinuidades se interceptam em ângulos oblíquos, uma análise cinemática (Hoek & Bray, 1981) pode ser útil na previsão do mecanismo de ruptura. As rupturas envolvendo movimento de blocos ou placas de rocha a partir de superfícies de descontinuidades combinam um ou mais dos três tipos básicos: ruptura planar, ruptura em cunha e tombamento de blocos (Goodman, 1989).

A *ruptura planar* ocorre a partir da ação da gravidade, bem como da ação de outras forças, como pressão neutra e acelerações sísmicas, quando um bloco de rocha repousa sobre uma superfície de descontinuidade inclinada, que se encontra com liberdade cinemática de movimentomovimentomovimento, (ver fig. 4.1a). A inclinação da superfície de ruptura deve ser maior do que o ângulo de atrito correspondente. As condições para ruptura não se manifestam no talude até que as operações de escavação ou o movimento das camadas de rocha remova a barreira ao movimento dos blocos. O movimento de um bloco como ilustrado na figura 4.1a supõe que a restrição ao deslocamento tenha sido vencida não somente ao longo da superfície de deslocamento, mas também ao longo das margens laterais do bloco. Pode-se ter ainda a ruptura planar em estágios, quando existe uma combinação de várias descontinuidades conectadas entre si (ver figura 4.2).

Excluído: livre no espaço

A *ruptura em cunha* ocorre quando duas superfícies de descontinuidade se interceptam e definem um bloco tetraedral (ver fig. 4.1b). As rupturas planares ou em cunha serão mais prováveis na escala de bancada, em se tratando de taludes de mineração, do que na escala do talude global. Exceção existe quando ocorrem descontinuidades da mesma ordem de grandeza do talude global. De qualquer forma, este tipo de ruptura não deve ser desprezado, no estudo das possibilidades de ruptura de qualquer talude.

O *tombamento de blocos* envolve a rotação de colunas ou blocos de rocha sobre alguma base fixa (Hoek & Bray, op cit). Normalmente, tem-se descontinuidades que apresentam mergulhos altos (próximos a  $90^\circ$ ) cuja direção é paralela ou aproximadamente paralela à do talude, com mergulho vertical ou com mergulho para dentro do talude (ver fig. 4.1c). É muito comum observar-se, em minas a céu aberto, tombamento de blocos em taludes altos. Nestas situações, a superfície de escorregamento se desenvolve quase subparalela à face do talude, podendo ser côncava.

Excluído: de se

Os outros modos de ruptura podem ser identificados em rochas extremamente dobradas e fraturadas, em que a ruptura planar, em cunha e o tombamento de blocos ocorrem simultaneamente ou sucessivamente. Pode-se considerar, ainda, a ruptura circular ou rotacional, o sulco ou ravinamento e o colapso de blocos.

A *ruptura circular ou rotacional* pode aconteceraconteceracontecer, quando o material é friável, como em um talude em solo, ou quando o maciço rochoso está bastante fraturado e não há nenhuma predominância na orientação das descontinuidades.

Excluído: acontece

Neste caso, a superfície de ruptura será definida por uma superfície que tenderá a seguir um caminho circular (ver fig. 4.3 a).

Excluído:

O *sulco ou ravinamento* ocorre quando existem descontinuidades com ângulos de mergulho altos (próximos a  $90^\circ$ ), aproximadamente paralelosparalelosparalelos, à face do talude. Pode-se observar que os ravinamentos mais profundos se instalam ao longo de planos de foliação (ver fig. 4.3b).

Excluído: perpendiculares

O *colapso de blocos* se dá quando existem descontinuidades com ângulos de mergulho na faixa de  $45^\circ$  ou menores, que mergulham para dentro do talude e funcionam como teto dos blocos instáveis, individualizados também por outras descontinuidades, que desempenham o papel de laterais dos blocos (ver fig. 4.3c). Este processo é ocasionado geralmente pela erosão, que provoca o descalçamento dos blocos e resulta em colapsos remontantes (Riedel et al, 1995).

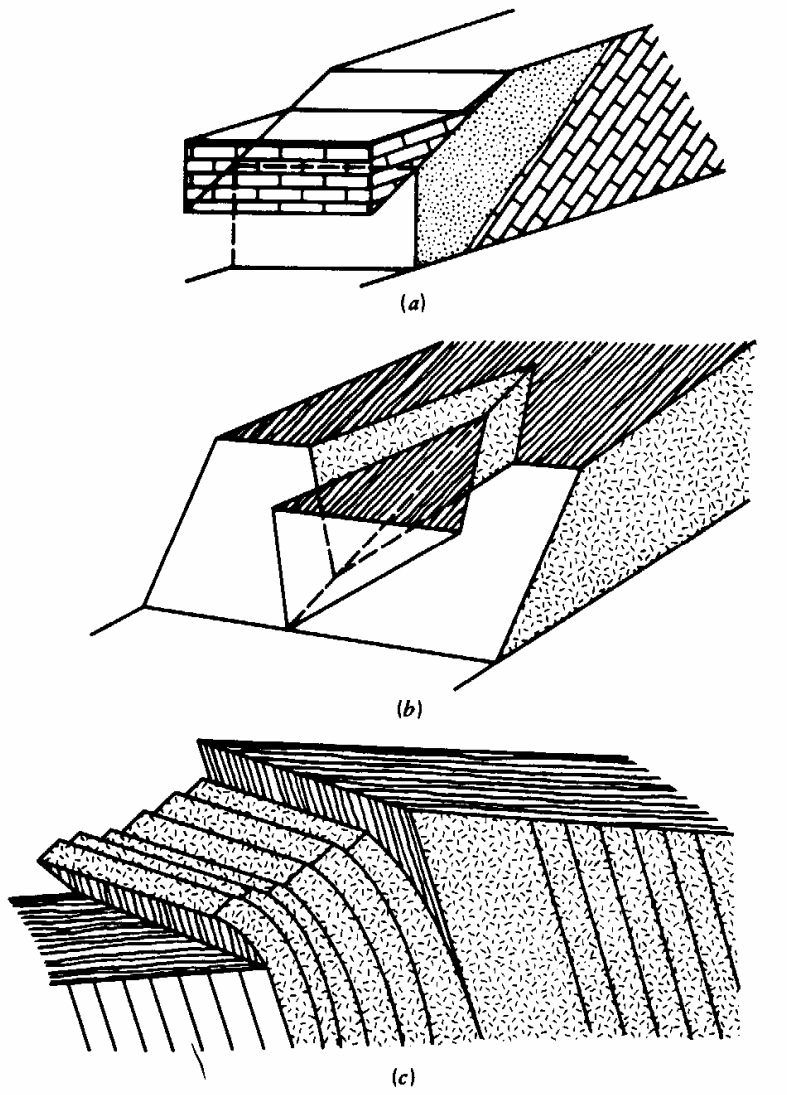


Figura 4.1 - Mecanismos de ruptura para taludes em rocha. a) ruptura planar; b) ruptura em cunha; c) tombamento de blocos. In: Goodman, (1989).



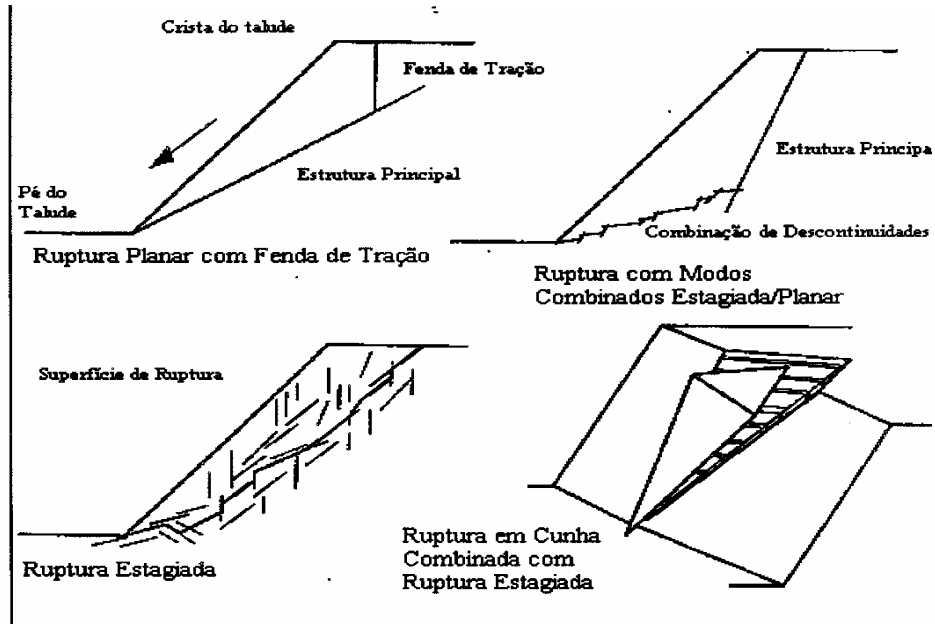
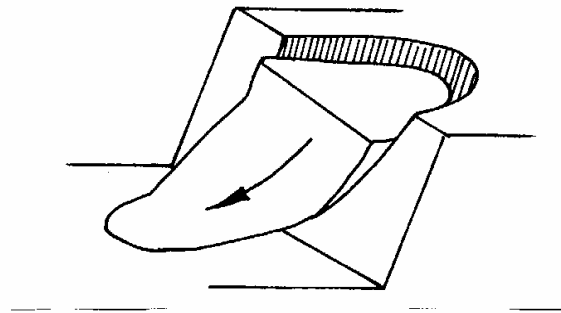
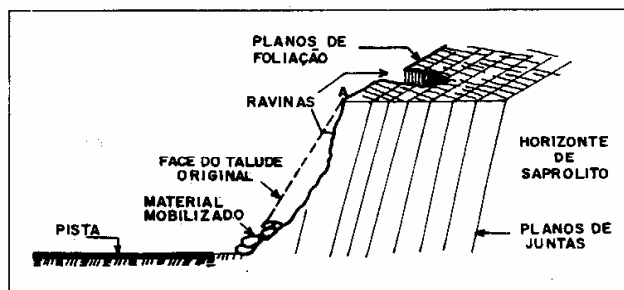


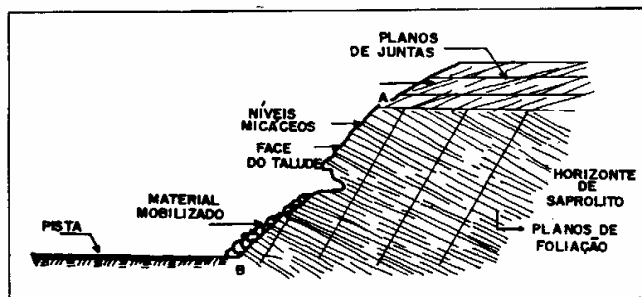
Figura 4.2 – Ruptura planar em estágios, resultante da combinação de várias descontinuidades conectadas entre si. In: Ferreira, 1998.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.3 - Esquemas de : a) ruptura circular; b) sulco ou ravinamento; c) colapso de blocos.  
 In: Hoek & Bray (1981) e Riedel et al, 1995.

No Quadrilátero Ferrífero, mais especificamente na Região Metropolitana de Belo Horizonte, pode-se observar todos os mecanismos de ruptura acima descritos. Como exemplos, tem-se:

- a ruptura em cunha identificada em taludes da Formação Cercadinho (Chapadeiro et al, 1993), além da ruptura planar (Nonato, 1994);
- o mecanismo de tombamento de blocos, observado em xistos e quartzitos do Grupo Sabará (Nonato & Gripp, 1994);
- a ruptura circular que pode ser identificada em taludes de quartzito da Formação Batatal, bastante intemperizados (Scarpelli, 1994);
- o ravinamento observado em taludes do Grupo Nova Lima (Chapadeiro, op cit);
- o colapso de blocos, identificado em taludes de gnaisses, do Embasamento Cristalino (Nonato, 1994).

Durante a realização de coleta de dados no campo, deve-se dar atenção especial à identificação da escala geométrica em que ocorrem as rupturas (se centimétrica, decimétrica, etc). A velocidade de ocorrência do processo de ruptura é outro fator importante a ser observado. Na tentativa de reconstituição do mecanismo de ruptura, é necessária a identificação das etapas de ruptura, levando-se em conta, por exemplo, as rupturas progressivas.

A abertura de fraturas de tração é, normalmente, o primeiro sinal de que um talude está se rompendo. O monitoramento do movimento de tais fraturas ou trincas normalmente dará uma indicação muito boa do comportamento geral do talude. Esta é uma ferramenta prática disponível para avaliar taludes em que um processo de ruptura progressivo tenha sido detectado. A avaliação precisa da movimentação através de uma fratura de tração estreita pode ser feita, por exemplo, por meio de um extensômetro mecânico. Medidas com essa precisão têm se mostrado muito úteis na realização de correlações com as chuvas diárias e o desmonte a explosivo (Hoek & Bray, op cit).

#### **4.2.2 – Determinação de parâmetros físicos através de testes de laboratório**

No projeto de engenharia de rochas também são considerados os parâmetros físicos da rocha intacta. Nesse trabalho, estuda-se a resistência à compressão uniaxial da

rocha intacta, a resistência à tração e a velocidade do som. Esses três parâmetros são básicos para a determinação da resistência mecânica da rocha intacta e do grau de fissuramento.

Admite-se que a resistência dos maciços rochosos é devida a dois elementos: a resistência ao longo das superfícies de descontinuidade e a resistência da rocha intacta. Os problemas associados à determinação da resistência da rocha intacta são bem conhecidos, os principais sendo:

- efeito da anisotropia devido à orientação de pequenas fraturas presentes no corpo de prova que está sendo testado;
- influência da heterogeneidade do maciço rochoso (levando a um problema diretamente ligado à amostragem);
- efeito do tamanho do corpo de prova que está sendo testado;
- influência da presença de umidade na amostra;
- influência da velocidade de aplicação de carga.

Formatado: À esquerda, Sem marcadores ou numeração

#### 4.2.2.1 - Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

Este parâmetro é necessário no projeto de engenharia de taludes, sendo determinado, com muito frequência. O corpo de prova deve ser uma amostra de rocha de forma cilíndrica, cujo diâmetro mínimo deve ser igual ao NX (54mm), com razão comprimento/largura variando de 2,0 a 2,5, (especificação ASTM – American Society for Testing and Materials D2938-71<sup>a</sup>) possuindo extremidades planas, lisas e paralelas, cortadas perpendicularmente ao eixo do cilindro (ver figura 4.4). Algumas variações são admitidas:

Excluído: realizado

- a) Com relação às irregularidades presentes nas amostras: todas as superfícies retas podem apresentar variação de até 0,127mm sobre o comprimento da amostra;
- b) As faces finais lisas podem apresentar variações de até 0,025mm. O desvio com relação ao eixo longitudinal pode ser de até 0,25mm;
- c) As variações de comprimento podem ser de até 0,051mm, após terem sido feitas 5 (cinco) medidas igualmente espaçadas sobre a amostra.

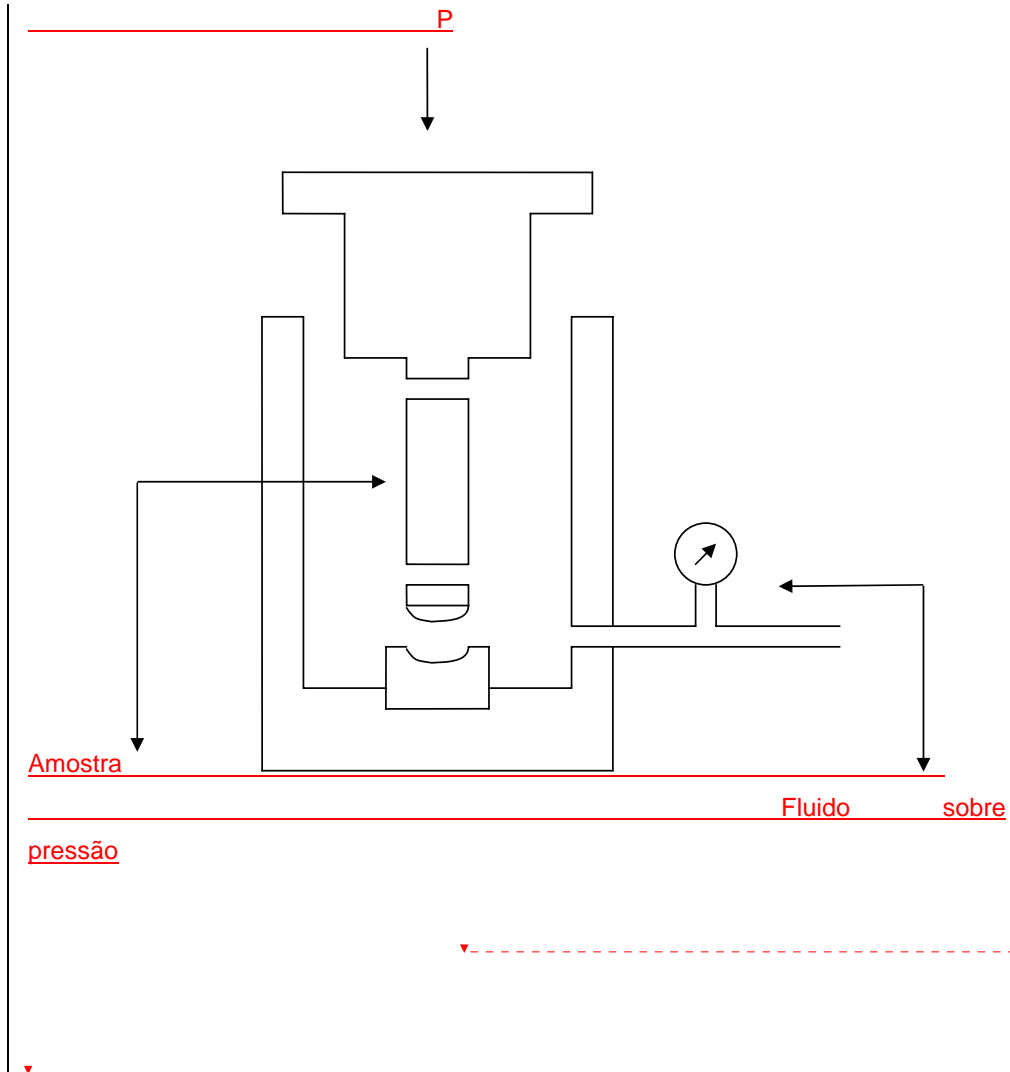


Figura 4.4 – Teste de resistência à compressão uniaxial. In: Nogueira (1999)

As normas para o teste são recomendadas também pela Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas (Brown, 1981), porém considerando a relação altura diâmetro entre 2,5 e 3,0.

Excluído: As regras para o teste são recomendadas também pela Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas (Brown, 1981), porém considerando a relação altura diâmetro entre 2,5 e 3,0.

Excluído: Amostra  
Fluido sob pressão

A resistência à compressão  $\sigma_c$  é expressa como a razão entre a carga aplicada até a ruptura numa prensa apropriada ( P ) e a área inicial da seção transversal de corte ( A ).

Excluído: ¶

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

4.1

Excluído:

A velocidade de aplicação de carga recomendada está entre 0,5 e 1,0 MPa/s. Os resultados são apresentados em MPa, com uma casa depois da vírgula. É importante destacar que os fatores que afetam a resistência das amostras de rocha não são os mesmos fatores considerados na elaboração das classificações geológicas. A resistência se relaciona à mineralogia (particularmente à presença ou não de quartzo e minerais argilosos), à porosidade, tamanho dos grãos, formato dos grãos e à presença de descontinuidades na escala das amostras. A tabela IV.1 mostra uma classificação das rochas com base na resistência à compressão uniaxial, citando exemplos de rochas típicas.

Além da resistência à compressão uniaxial, esse teste permite a determinação das propriedades elásticas, o módulo de elasticidade E e o coeficiente de Poisson  $\nu$ . As deformações da rocha são medidas por extensômetros mecânicos (relógios comparadores de 1/100mm) ou por extensômetros elétricos ("strain gage").

#### 4.2.2.2 - A velocidade do som na avaliação do grau de fissuramento do maciço rochoso

A medida da velocidade de ondas sonoras em um corpo de prova de faces paralelas, ( $V_i$ , em m/s) colocado entre dois pratos, é relativamente simples. No método mais comum são emitidas vibrações em uma das extremidades da amostra de rocha, com um cristal piezoelétrico. Estas vibrações são recebidas por um segundo cristal na outra extremidade. O tempo de percurso das ondas é determinado pela medida da

*Tabela IV.1 – Classificação das rochas com base na resistência à compressão uniaxial e à tração. Modificado de Farmer, 1983.*

Excluído: diferença de fase através de um osciloscópio equipado com uma linha de retardo variável. ¶

| <b>Classificação da rocha</b> | <b>Resistência (MPa)</b> | <b>Exemplos típicos</b>                                                                                             |
|-------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Muito Fraca                   | 10 – 20                  | Rochas sedimentares pouco compactas e/ou alteradas. Alguns tipos de rochas metamórficas. Ex.: xisto (5 a 10 MPa)    |
| Fraca                         | 20 – 40                  | Rochas sedimentares fracamente cimentadas.                                                                          |
| Resistência Média             | 40 – 80                  | Rochas sedimentares competentes. Algumas rochas ígneas grosseiras de baixa densidade. Ex.: calcáreo (30 a 250 MPa). |
| Forte                         | 80 – 160                 | Rochas ígneas competentes, algumas rochas metamórficas e arenitos de granulação fina.                               |
| Muito Forte                   | 160 - 320                | Rochas ígneas de granulação fina e algumas rochas metamórficas. Ex.: quartzito (150 a 300 MPa).                     |

diferença de fase através de um osciloscópio equipado com uma linha de retardo variável.

A velocidade de propagação varia com a presença de descontinuidades, em maior ou menor número. Existem modelos que permitem comparar as características de uma rocha às de um meio ideal de mesma composição mineralógica, mas sem descontinuidades. Nestes modelos o meio ideal tem um comportamento elástico linear e as descontinuidades são pequenas esferas, no caso de poros, e elipsóides de revolução achatados, no caso das fissuras. O comportamento elástico linear seria válido para as rochas no domínio das pequenas solicitações. A partir do conhecimento das características do meio ideal de referência, e medindo os parâmetros elásticos de uma rocha e a sua porosidade, pode-se caracterizar o seu grau de fissuramento.

Fourmaintraux (1976) sugere que se calcule a velocidade das ondas longitudinais que o corpo de prova teria se este não possuísse poros ou fissuras ( $V_1^*$ ). Este cálculo é feito com os dados relativos à composição mineralógica a partir de valores tabelados de medidas da velocidade do som em cristais.  $V_1^*$  pode ser calculada da seguinte maneira:

$$\frac{1}{V_1^*} = \sum_i \frac{C_i}{V_{1,i}} \quad 4.2$$

onde  $V_{1,i}$  é a velocidade das ondas longitudinais no mineral constituinte das rochas  $i$ , que tem proporção em volume  $C_i$  na rocha.

O índice de qualidade IQ é definido por Fourmaintraux (op.cit.). Trata-se da relação entre a velocidade das ondas longitudinais medida, e a velocidade calculada:

$$IQ\% = \frac{V_1}{V_1^*} \times 100\% \quad 4.3$$

O índice IQ é afetado pela porosidade da rocha, sendo:

$$IQ\% = 100 - 1.6 n_p\% \quad 4.4$$



onde  $n_p\%$  é a porosidade da rocha não fissurada, expressa como uma porcentagem. É importante destacar que, se há uma pequena fração de fissuras na amostra de rocha, esta equação não funciona.

Como base para a descrição do grau de fissuramento de uma amostra de rocha, Fourmaintraux (op cit) propôs que se plotasse IQ versus a porosidade, baseado em medidas de laboratório e em observações microscópicas de fissuras (ver figura 4.5). Desta forma, o grau de fissuramento pode ser determinado rapidamente e a um custo baixo. Embora seja melhor determinar o comprimento, distribuição e extensão das fissuras por técnicas microscópicas diretas, estas necessitariam de ferramentas e procedimentos que geralmente não são disponíveis.

#### 4.2.2.3 – Resistência à tração medida através do ensaio brasileiro

Este ensaio é também denominado de ensaio indireto para determinação da resistência a tração ou ensaio de compressão diametral. Um corpo de prova cilíndrico é disposto horizontalmente entre os pratos de uma prensa (ver fig. 4.6) e é comprimido segundo duas geratrizes opostas. O campo de tensões que se desenvolve é complexo. Obert & Duval (1967) demonstraram que as tensões principais horizontais que atuam ao longo do diâmetro DD' da amostra são constantes e seu valor é:

$$\sigma_{xx} = \frac{2F}{\pi DL} \quad 4.5$$

onde F é a força aplicada, D é o diâmetro e L é o comprimento do corpo de prova.

Para prevenir tensões de cisalhamento e moagem da amostra, no local de aplicação da carga é usado um dispositivo para a distribuição da carga. Este ensaio se diferencia do ensaio de tração direta pelo fato de a ruptura se iniciar necessariamente em um plano DD'. No ensaio de tração direta a ruptura tem lugar sobre a seção mais fraca da amostra, a resistência sendo, portanto, menor. Se a rocha é homogênea, a resistência a tração determinada através do ensaio brasileiro será igual à resistência a tração determinada pelo ensaio de tração direta.

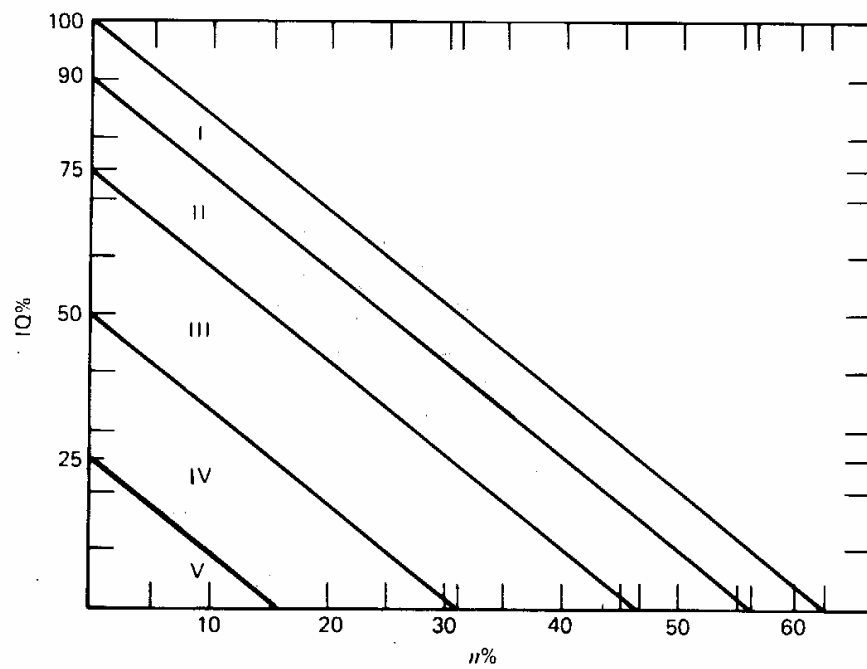


Figura 4.5 - Gráfico para classificação do grau de fissuramento em amostras de rocha. In: Fourmaintraux, 1976. I - Sem fissuras; II - Levemente fissurada; III - Moderadamente fissurada; IV - Fortemente fissurada; V - Extremamente fissurada.

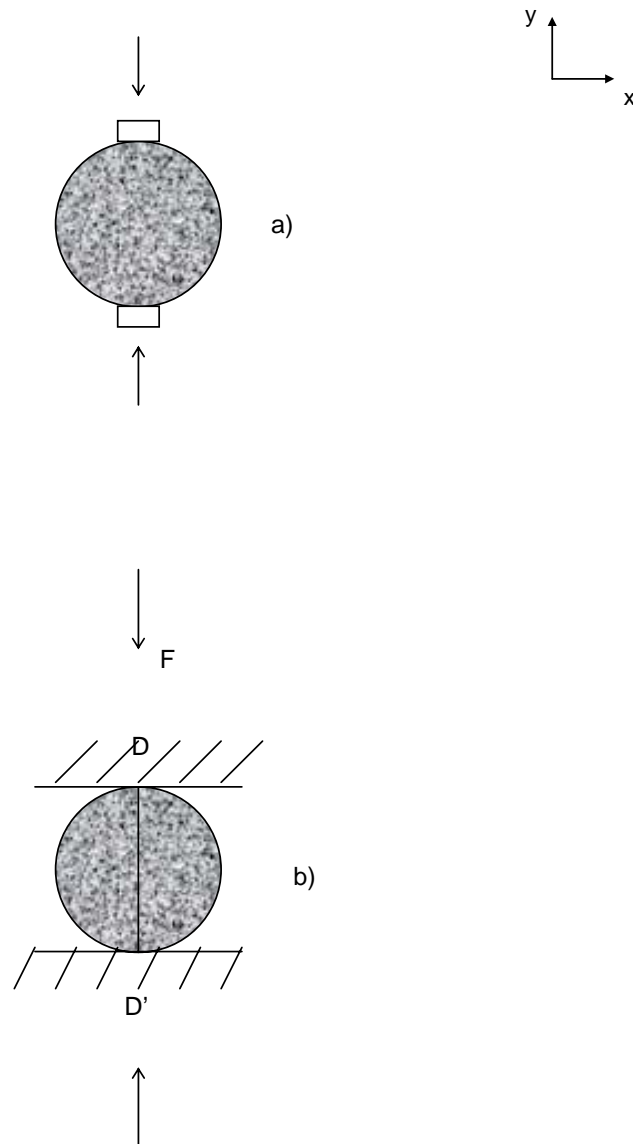


Figura 4.6 – Representação do ensaio brasileiro: a) disposição do corpo de prova; b) tensões aplicadas ao longo do plano diametral  $DD'$ . Modificado de Nogueira (1999).

Excluído: ¶

### 4.2.3 - Fluxo de água subterrânea em maciços rochosos

O fluxo de água subterrânea geralmente altera a condição de estabilidade dos taludes. Segundo Giani (op cit), as principais razões para este fato são:

- a) Variação da pressão que atua nas superfícies de descontinuidades, ocasionando a redução da resistência ao cisalhamento existente, e originando forças ativas que tendem a induzir as rochas ao deslizamento;
- b) Alteração da textura e estrutura da rocha ou mesmo destruição e alteração do seu grau de coesão ou consistência;
- c) Destruição, transporte ou mudança do grau de coesão do material de preenchimento.

De acordo com Hoek & Bray (1981), há duas maneiras de se obter os dados relativos às distribuições de pressão da água dentro de um maciço rochoso:

- 1) A dedução do padrão de fluxo de água subterrânea a partir da avaliação da permeabilidade do maciço rochoso e da avaliação das fontes de água;
- 2) Medida direta dos níveis de água em furos de sonda ou poços, ou a medida da pressão de água através de piezômetros instalados nos furos de sonda.

Quatro esquemas típicos (simplificados) da distribuição da pressão da água ao longo de superfícies de descontinuidade são exibidos na figura 4.7 com o objetivo de esclarecer o efeito da instabilização provocada pela água na condição dos taludes:

- 1) O maciço rochoso é extremamente fraturado, e o fluxo de água pode ser considerado como atuante em todo o maciço.
- 2) O maciço rochoso é extremamente fraturado, como na situação anterior, mas uma fratura de tração subvertical, completamente preenchida por água está também presente na crista do talude;
- 3) O maciço rochoso é drenado e a água somente flui através das descontinuidades quando ocorrem chuvas muito fortes;
- 4) O maciço é drenado como no caso anterior, mas o fluxo de água é obstruído no pé do talude, em situações excepcionais tais como pela presença de gelo.

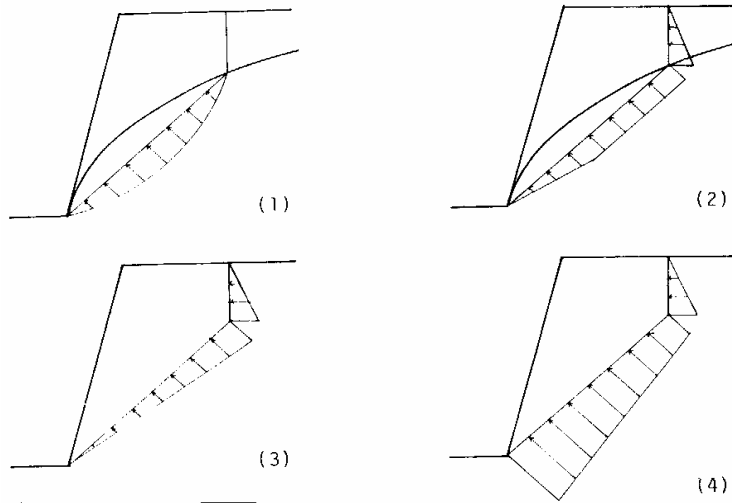


Figura 4.7- Esquemas simplificados da distribuição de pressão de água para a análise da estabilidade de taludes. In: Lembo Fazio & Ribacchi, 1988 apud Giani, 1992.

Pode-se dizer que as hipóteses clássicas para a análise do fluxo de água subterrânea em taludes em rocha são:

- 1) O fluxo ocorre somente através de fissuras ou descontinuidades, e a permeabilidade da rocha é considerada insignificante, como primeira aproximação.
- 2) O movimento do fluxo é laminar. Condições de fluxo turbulento somente ocorrem quando existem valores muito grandes em relação à abertura das descontinuidades e gradientes hidráulicos mais altos do que os normais.

O fluxo de água através de microfraturas da rocha e o fluxo turbulento em fissuras com superfícies rugosas são dois fenômenos que podem também ocorrer, quando existem problemas de estabilidade de taludes em rocha.

Quando as rochas são solúveis, as falhas e/ou fraturas ocasionam a formação de cavernas ao longo da zona de falhamento. Isto também pode ocorrer em rochas não solúveis, como um resultado da lavagem de rocha triturada e da abertura de fraturas de tração, oblíquas ao plano de falha, consideradas um sub-produto do movimento ao longo da superfície de falhamento. Em ambos os casos, identificam-se situações que propiciam a formação de zonas instáveis, localizadas na região em que são identificados os falhamentos e/ou fraturamentos.

#### *4.2.3.1 - Modelos de fluxo em maciços rochosos*

Segundo Louis (1976), tem-se cinco grupos de maciços rochosos, classificados segundo sua textura, estrutura e imperfeições (ver figura 4.8).

- a) Meio poroso, predominantemente homogêneo, contendo somente poros pequenos;
- b) Meio fraturado poroso, onde as fissuras determinam o comportamento hidráulico do maciço rochoso;
- c) Meio poroso contendo barreiras impermeáveis onde as descontinuidades são preenchidas por material composto de partículas impermeáveis;
- d) Meio poroso com pequenos canais em que descontinuidades preenchidas por material impermeável contêm canais através dos quais a água pode fluir;
- e) Meio cárstico contendo passagens largas e cavernas de várias formas geométricas, criadas pela dissolução e remoção da rocha pelo fluxo de água subterrânea.

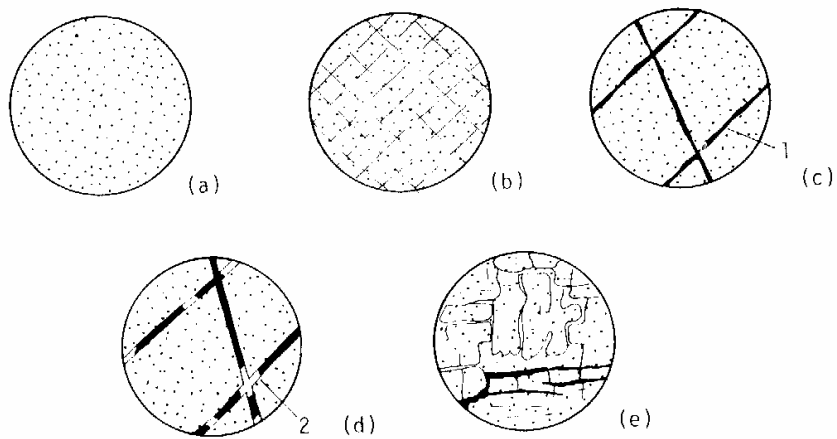


Figura 4.8 - Grupos de maciços rochosos, segundo Louis (1976). (a) Meio poroso *intergranular*; (b) meio poroso fraturado; (c) meio poroso com barreiras impermeáveis; (d) meio poroso contendo canais; (e) meio cárstico.

Excluído: ¶

É importante destacar que a definição de um maciço rochoso como sendo um meio contínuo ou descontínuo depende ainda da escala relativa em que se avalia o talude,

e de características das famílias de descontinuidades presentes, tais como espaçamento e persistência (ver figura 4.9).

Considera-se um meio fraturado como sendo um meio contínuo quando os tamanhos dos blocos unitários são desprezíveis com relação à escala do fenômeno examinado (figura 4.9-2). Neste caso, os métodos de análise para meios porosos podem ser adotados. Nos casos em que o tamanho unitário dos blocos é da mesma ordem de grandeza com referência à escala relativa do talude e das descontinuidades abertas, os métodos de análise do fluxo de água através das descontinuidades devem ser usados. As propriedades hidráulicas de um maciço rochoso fraturado dependem da condutividade hidráulica das famílias de descontinuidades presentes (Giani, op cit).

#### 4.2.3.2 - Condutividade hidráulica de uma família de descontinuidades

A determinação da condutividade hidráulica de uma família de descontinuidades é necessária para se caracterizar as propriedades hidráulicas do maciço rochoso considerado. A escala de observação do fenômeno é de grande importância pois em um dado volume, as descontinuidades podem ser contínuas ou não. Quando existem descontinuidades persistentes na escala de observação, a condutividade hidráulica da família de descontinuidades é definida, na direção de fluxo da descontinuidade como (Louis, 1976):

$$k = \frac{e}{b.k_f} + k_m \quad 4.6$$

em que (ver figura 4.10):

e = abertura média das descontinuidades;

b = distância média entre os planos que compoem as famílias de descontinuidades (espaçamento);

$k_f$  = coeficiente de permeabilidade do material de preenchimento das descontinuidades;

$k_m$  = coeficiente de permeabilidade da rocha intacta.

Quando se tem descontinuidades pouco persistentes na escala de observação do problema, os valores de condutividade são muito menores do que nas situações em que as descontinuidades são persistentes. Normalmente, as descontinuidades têm



uma extensão limitada e não se comunicam com outras descontinuidades, ocasionando a circulação de água somente através dos poros ou microfissuras presentes na rocha.

A determinação da condutividade hidráulica também pode ser feita da seguinte maneira:

$$k = \frac{g \cdot e^3}{12 \cdot \nu \cdot b} \quad 4.7$$

em que:

g = aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ );

e = abertura das descontinuidades ou fissuras;

b = espaçamento entre as descontinuidades;

$\nu$  = coeficiente de viscosidade cinemática ( $0,0101 \text{ cm}^2/\text{s}$  para água pura a  $20^\circ \text{ C}$ ).

Excluído: c

Segundo Louis (op.cit.), esta equação somente se aplica quando ocorre fluxo laminar através de descontinuidades paralelas e planares. Se a velocidade do fluxo é alta o suficiente para que ocorra fluxo turbulento, se as superfícies de descontinuidades são rugosas, ou se as descontinuidades são preenchidas, a abordagem sugerida acima não se aplica.

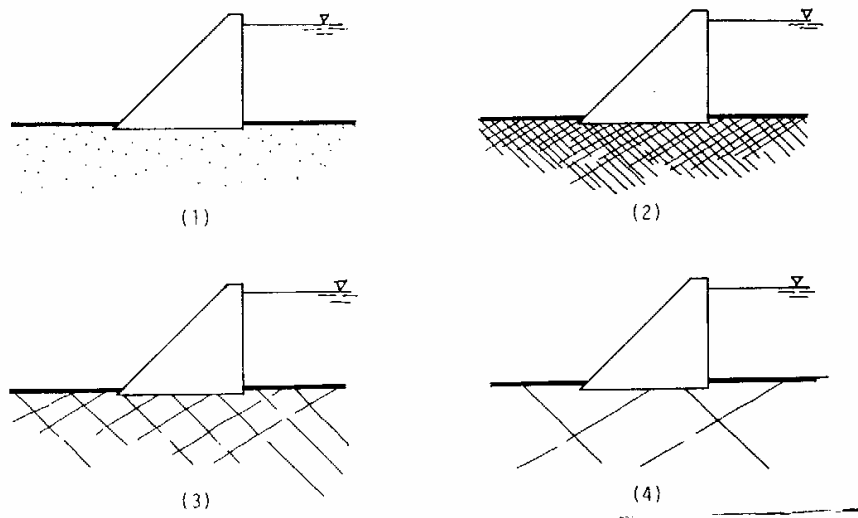


Figura 4.9 - Meios contínuos (1) e (2) e descontínuos (3) e (4) na avaliação dos problemas relacionados ao fluxo de água subterrânea. In: Giani, 1992

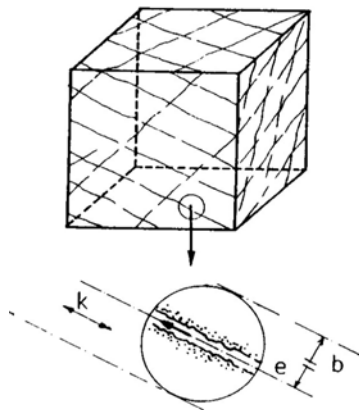


Figura 4.10 - Parâmetros hidráulicos de um maciço rochoso:  $b$  = espaçamento médio das superfícies de descontinuidade;  $k_f$  = condutividade hidráulica de uma única descontinuidade;  $k$  = permeabilidade da rocha intacta.

### 4.3 – Metodologia

#### 4.3.1 – Identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha

A identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha foi feita no campo, durante a realização do levantamento geológico. O comportamento das descontinuidades foi observado, e os indícios de prováveis rupturas (ou de rupturas já ocorridas, quando se tem cicatrizes de escorregamentos, por exemplo) foram identificados e descritos. Não foi realizada análise cinemática para os taludes.

Excluído: mapeamento

#### 4.3.2 – Determinação da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

##### 4.3.2.1 – Obtenção das amostras de rocha

As amostras foram obtidas no galpão de testemunhos da MBR (Minerações Brasileiras Reunidas S.A.), localizado em Miguelão (próximo a Belo Horizonte). Várias caixas de testemunho foram avaliadas, sendo selecionados alguns intervalos dos furos. Todo o material foi identificado e transportado imediatamente para o laboratório de Mecânica de Rochas da Escola de Engenharia da UFMG, onde os testes foram realizados pela engenheira Jacqueline Andrade Nogueira, com o auxílio do aluno de iniciação científica Leonardo Alves e do técnico Waldo Sepúlveda.

##### 4.3.2.2 – Preparação das amostras

Como as amostras devem estar secas, ter o formato de cilindros retos com diâmetro igual ou maior a 54mm, a relação altura/diâmetro entre 2,0 e 2,5, os lados lisos e livres de irregularidades e as faces paralelas e perpendiculares ao eixo longitudinal, alguns procedimentos foram necessários antes de se iniciar os testes:

- 1) As amostras foram medidas;
- 2) Estando com as dimensões necessárias, foram serradas e ambos os lados foram retificados no torno;
- 3) Novamente as amostras foram medidas (altura/diâmetro);
- 4) Os anéis foram fixos e a altura entre estes foi medida;

- 5) O relógio comparador foi fixado a um dos anéis, estando a amostra pronta para o teste.

#### 4.3.2.3 – Realização dos testes

As amostras já preparadas foram acondicionadas na prensa. A força de compressão foi aplicada até a ruptura. A velocidade de aplicação de força variou entre 0,19 e 0,61 MPa/s. Foram registrados o tempo gasto até a ocorrência da ruptura, a força de ruptura e as leituras feitas no relógio comparador.

#### 4.3.2.4 – Determinação da densidade relativa das amostras de rocha

Na apresentação dos resultados relativos à resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, devem-se incluir algumas características da rocha (ver resultados). Uma delas é a densidade relativa, determinada pelo clássico método do picnômetro (Dana, 1969). Para tal, é necessário utilizar a seguinte fórmula:

$$d = \frac{P_{p+tr} - P_p}{P_{p+a} + P_{p+tr} - P_p - P_{p+tr+a}} \quad 4.8$$

Onde:

$d$  = densidade relativa da amostra de rocha;

$P_{p+tr+a}$  = peso do picnômetro + rocha + água;

$P_{p+a}$  = peso do picnômetro + água;

$P_{p+tr}$  = peso do picnômetro + peso da rocha seca;

$P_p$  = peso do picnômetro vazio.

Foram realizados cinco ensaios para cada amostra de rocha disponível.

### 4.3.3 – Determinação da velocidade do som para se avaliar o grau de fissuramento do maciço rochoso

O método utilizado consiste na emissão de vibrações em uma das extremidades da amostra com um cristal piezoelétrico, e a captação dessas mesmas vibrações por um segundo cristal, instalado na outra extremidade. A figura 4.11 exibe o layout dos equipamentos necessários à realização do teste.

Excluído: recepção

O primeiro cristal é excitado por uma corrente elétrica de alta voltagem, que produz uma onda elástica que se propaga na amostra. Ao receber esta onda, o segundo cristal emite um sinal elétrico. Este primeiro sinal captado corresponde à chegada da onda longitudinal. A velocidade correspondente foi obtida da seguinte maneira:

$$V_l = \frac{H}{\Delta t_l} \quad 4.9$$

onde:

H = comprimento da amostra;

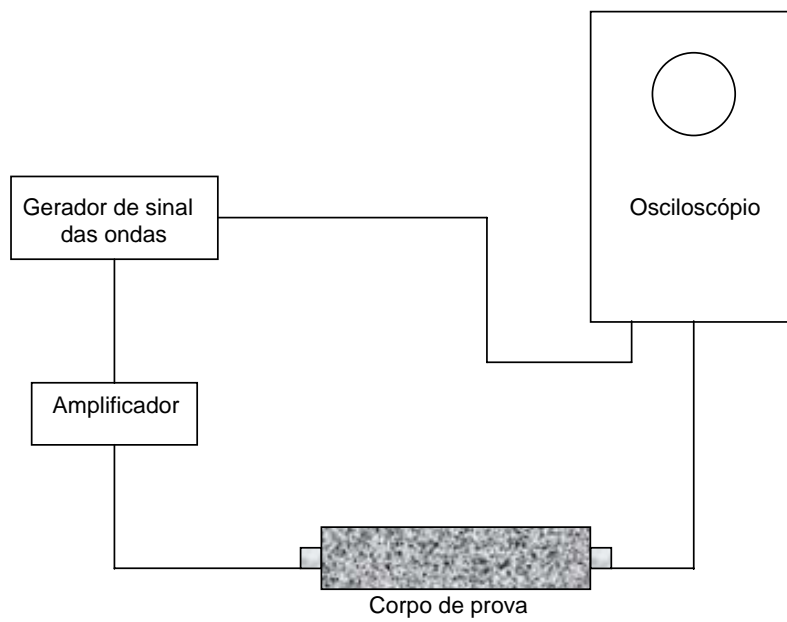
$\Delta t_l$  = tempo de percurso da onda longitudinal.

Foram feitas cinco medidas de tempo para cada amostra, sendo registrada a média destas medidas, conforme recomendação da ISRM (1978).

O índice IQ (índice de qualidade ou continuidade) foi determinado segundo as fórmulas 4.3 e 4.4 (ver revisão bibliográfica).

Para o cálculo de  $V^*_l$  (velocidade que o corpo de prova apresentaria se não possuísse poros ou fissuras) foi utilizada a equação 4.2.

O valor da porosidade da rocha obtido em relatório de propriedade da MBR (Minerações Brasileiras Reunidas S.A.), referente a testes de laboratório feitos pela Figueiredo Ferraz em 1992, não foi utilizado pois não corresponde à porosidade das amostras coletadas. Para a determinação do IQ, considerou-se a porosidade igual a 1 (rocha praticamente sem poros).



*Figura 4.11 – Layout simplificado dos componentes eletrônicos utilizados na medida da velocidade do som em amostras de rocha. In: ISRM (1978)*

#### **4.3.4 – Determinação da resistência à tração através do ensaio brasileiro**

Primeiramente, determinou-se o comprimento das amostras a serem submetidas ao teste, e as mesmas foram serradas.

Para a realização do teste, as amostras foram dispostas horizontalmente entre os pratos de uma prensa, e foram comprimidas segundo duas geratrizes opostas. A força foi aplicada sobre cada amostra, até que ocorresse a ruptura por fratura diametral vertical. A ruptura ocorre quando a força aplicada atinge o valor correspondente à resistência à tração.

Excluído: o

Excluído: carga

A resistência à tração foi calculada utilizando-se a fórmula 4.5 (ver revisão bibliográfica).

#### **4.3.5 – Apresentação dos resultados referentes aos itens 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4**

Foram construídos histogramas para os seguintes conjuntos de dados:

Excluído: através do programa EXCEL,

- 1) Resistência à ruptura e módulo de elasticidade obtidos nos testes de resistência à compressão uniaxial;
- 2) Velocidade das ondas longitudinais nos corpos de prova;
- 3) Resistência à ruptura por tração obtida no ensaio brasileiro.

#### **4.3.6 – Determinação da condutividade hidráulica de uma família de descontinuidades**

Foi utilizada a fórmula 4.7 na determinação da condutividade hidráulica.

### **4.4 – Resultados e Discussão**

#### **4.4.1– Tipos de ruptura de taludes em rocha**

A identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha foi realizada em 12 (doze) taludes urbanos, localizados na antiga estrada de acesso às cidades de Nova Lima e Sabará, na altura dos bairros Jonas Veiga e Pirineus, em Belo Horizonte, MG, no primeiro semestre de 1993. A extensão em que o levantamento foi feito é de cerca de 1km, todos os taludes estando dentro desse intervalo. Os taludes avaliados possuem extensão de 9,30 a 36,30m, altura de 5,5 a 10,0m, e inclinação de 47 a 60°, sendo, portanto, de pequena amplitude. O maciço rochoso pertence ao Grupo Sabará, Quadrilátero Ferrífero. Constitui-se basicamente de xisto rosado a amarelado e quartzo-xisto, ambos extremamente alterados (grau A4), intercalados por veios de quartzo centimétricos ou decimétricos, concordantes ou não com a foliação principal (nesse caso, a xistosidade). Percebe-se a presença de duas famílias de descontinuidades além da xistosidade, e de descontinuidades aleatórias pouco persistentes intercaladas entre essas famílias. O tipo de ruptura mais observado é a ruptura planar (ver figura 4.12). Nota-se a presença de placas centimétricas ao pé dos taludes. Em alguns locais, essas placas adquirem dimensões decimétricas.

Excluído: mapeamento

Na figura 4.12 já descrita, observa-se deslocamento e ruptura planar, associada basicamente à direção e mergulho das descontinuidades. Na figura 4.13, tem-se uma família de descontinuidades que mergulha para dentro do talude. Percebe-se nitidamente o tombamento de blocos e o colapso de blocos (ver figura 4.14). Nota-se que ambos ocorreram somente quando houve a transição do xisto para o quartzo-xisto (a rocha se tornou mais endurecida), e também porque a direção de corte dos taludes se modificou, acompanhando o traçado da estrada. Com essa alteração, uma das famílias de descontinuidades ficou evidente, o que não ocorria anteriormente, quando só se percebiam rupturas planares. Numa distância de cerca de 5m, percebe-se o tombamento e o colapso de blocos. Essa variação na direção de corte dos taludes permitiu também o aparecimento de ravinas (ver figura 4.15). Nota-se que, neste local, o xisto está mais amolecido. Quando isto acontece, o maciço tem a aparência de um solo e pouquíssimas estruturas podem ser observadas (ver figura 4.16). Nesses casos, o tipo de ruptura mais provável seria o circular.





*Figura 4.12 – Detalhe para ruptura planar em talude construído em xisto, próximo ao bairro Jonas Veiga, BH. O padrão de fraturamento é bastante nítido. Notam-se placas centimétricas (algumas cobertas por limo) soltas ao pé do talude. Na porção esquerda da foto, nota-se uma fenda, provavelmente originada pela ação da água das chuvas.*



*Figura 4.13 – Tombamento de blocos centimétricos ocorrido em talude construído em quartzoxisto, na altura do bairro Pirineus, BH. Uma família de descontinuidades que anteriormente estava mascarada pela direção de corte dos taludes mapeados, favoreceu o surgimento desse tipo de ruptura no talude. Em toda a foto percebem-se sinais de movimentação de blocos centimétricos a decimétricos (porção superior esquerda, porção central).*



*Figura 4.14 – Colapso de bloco em talude em quarzo-xisto, na altura do bairro Pirineus, BH. Nota-se, na porção direita da foto, como a xistosidade mergulha para dentro do talude, favorecendo o surgimento do colapso, no contato com superfície de descontinuidade (fratura) quase vertical.*



Figura 4.15 – Ravina surgida em talude em xisto multíssimo alterado, na altura do bairro Jonas Veiga, BH. Algumas superfícies de xistosidade ainda estão nítidas. No momento do levantamento, o talude se encontrava totalmente seco.



*Figura 4.16 – Saprólito de xisto, observado em talude construído em estrada, na altura do bairro Jonas Veiga, BH. Percebe-se maior quantidade de vegetação do que nos taludes anteriores.*

#### 4.4.2 – Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

As amostras de rocha, de uma forma geral, estavam muito alteradas e o padrão de fraturamento ocasionava a quebra em pedaços pequenos para a realização de ensaios de compressão uniaxial. Esse fato não ocorreu para o itabirito dolomítico, e um número suficiente de amostras foi coletado. As profundidades em que se encontravam as mesmas foram registradas. O itabirito dolomítico (ou carbonático) possui coloração cinza médio, encontra-se praticamente são e muito duro. Pertence à Formação Cauê – Grupo Itabira – Quadrilátero Ferrífero.

Os testes seguiram as recomendações da ISRM (1981) e foram feitos em 13 (treze) amostras provenientes do furo de sonda 03, realizado em 1984, e em 5 (cinco) amostras provenientes do furo de sonda 09, realizado em 1985. Estes furos se localizam na Mina de Águas Claras e foram indicados pelo corpo técnico da empresa. O furo 03/84 possui comprimento de 1122m, tendo sido amostrado o intervalo de 115 a 303m. O furo 09/85 possui comprimento de 1139m, e o intervalo amostrado se encontra entre 75 e 130m. Admite-se que o material amostrado nos dois furos é o mesmo. Todas as amostras se romperam de forma violenta (estouraram). Não se observou nenhuma superfície ou estrutura da rocha segundo a qual a ruptura tenha ocorrido. A tabela IV.2 é um quadro-resumo dos resultados, e inclui os valores encontrados para o módulo de elasticidade E.

O menor valor encontrado para a resistência à compressão foi de 100,00 MPa, e o maior valor foi 294,80 MPa. A moda obtida está entre 160 e 240 MPa (ver figura 4.17). Segundo a classificação de Farmer (1983), trata-se de uma rocha muito forte. O menor valor encontrado para o módulo de elasticidade foi de 60 GPa, e o maior, de 383,36 GPa. A moda se encontra entre 92 e 156 GPa (ver figura 4.18). As curvas tensão x deformação foram traçadas considerando todos os valores de resistência até 160 MPa (ver figura 4.19), os valores de resistência que variam de 160 a 240MPa, (ver figura 4.20), e os valores de resistência entre 240 e 320 MPa (ver figura 4.21).

Para a determinação da densidade relativa, foram utilizadas 4 (quatro) amostras de rocha. Cada uma delas foi ensaiada cinco vezes, e os valores resultantes dos testes encontram-se entre 2.58 e 3.39 (ver tabela IV.3).

Tabela IV.2 – Quadro-resumo exibindo os resultados dos testes de resistência à compressão uniaxial realizados em itabirito dolomítico da Mina de Águas Claras, BH. Observa-se a ocorrência de ruptura violenta (estouro) em todas as amostras.

| Furo de Sonda | Nº da Amostra | Profundidade da Amostra (m) | Nº do Teste | Resistência à Compressão (MPa) | Módulo de Elasticidade E (GPa) |
|---------------|---------------|-----------------------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 09/85         | 45            | 77,4                        | 1           | 253,3                          | 112,5                          |
|               |               | 77,5                        | 2           | 153,0                          | 76,9                           |
|               | 48            | 79,7                        | 3           | 182,2                          | 66,7                           |
|               | 50            | 80,8                        | 4           | 115,1                          | 117,7                          |
|               |               | 80,9                        | 5           | 110,5                          | 200,0                          |
| 03/84         | 56            | 198,6                       | 6           | 247,2                          | 112,5                          |
|               | 57            | 199,3                       | 7           | 153,4                          | 150,0                          |
|               |               | 199,4                       | 8           | 211,6                          | 75,0                           |
|               | 58            | 200,0                       | 9           | <b>100,0</b>                   | 156,3                          |
|               |               | 200,2                       | 10          | 173,4                          | 115,8                          |
|               | 59            | 200,5                       | 11          | 111,9                          | 165,2                          |
|               | 60            | 200,7                       | 12          | 234,8                          | 133,3                          |
|               |               | 201,0                       | 13          | 229,8                          | <b>383,3</b>                   |
|               |               | 201,3                       | 14          | 159,8                          | 300,6                          |
|               | 61            | 202,0                       | 15          | 263,3                          | -                              |
|               |               | 202,2                       | 16          | <b>294,8</b>                   | <b>60,0</b>                    |
|               | 62            | 202,5                       | 17          | 228,4                          | 266,7                          |
|               |               | 202,7                       | 18          | 216,5                          | 141,7                          |

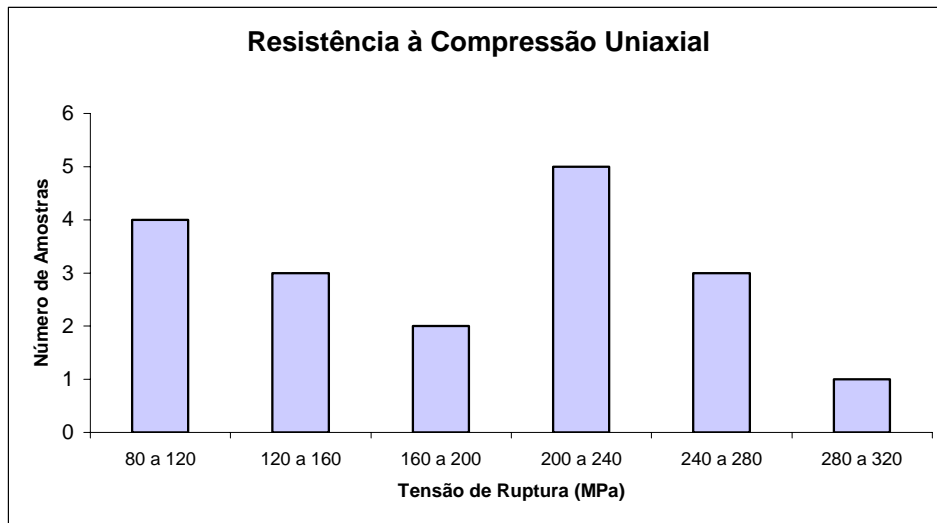


Figura 4.17 – Histograma relativo aos testes de resistência à compressão uniaxial, realizados em 18 amostras de itabirito dolomítico.

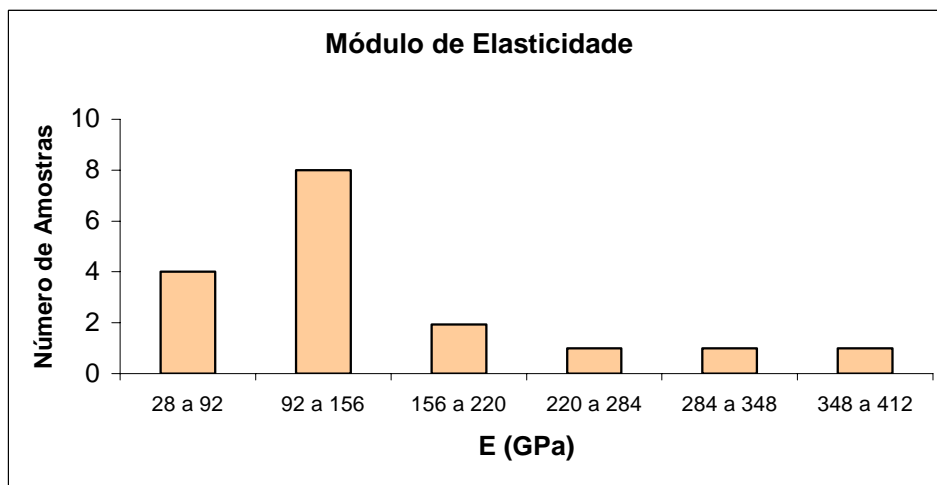


Figura 4.18 – Histograma relativo aos valores encontrados para o módulo de elasticidade em 18 amostras de itabirito dolomítico.



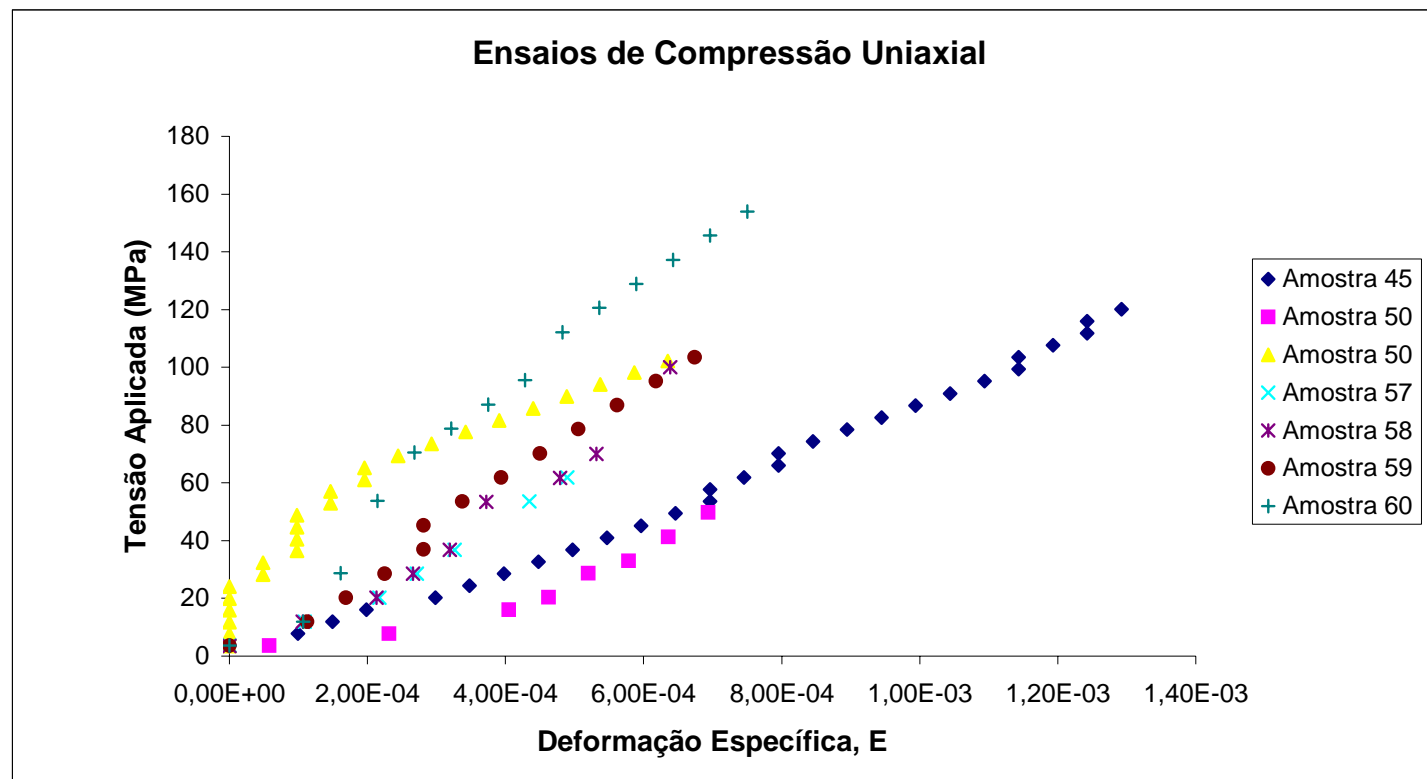


Figura 4.19 – Curvas resistência\_x deformação específica relativas a testes de resistência à compressão uniaxial realizados em 7 amostras de itabirito dolomítico. Os valores de resistência considerados estão abaixo de 160 MPa (ver tabela IV.2)

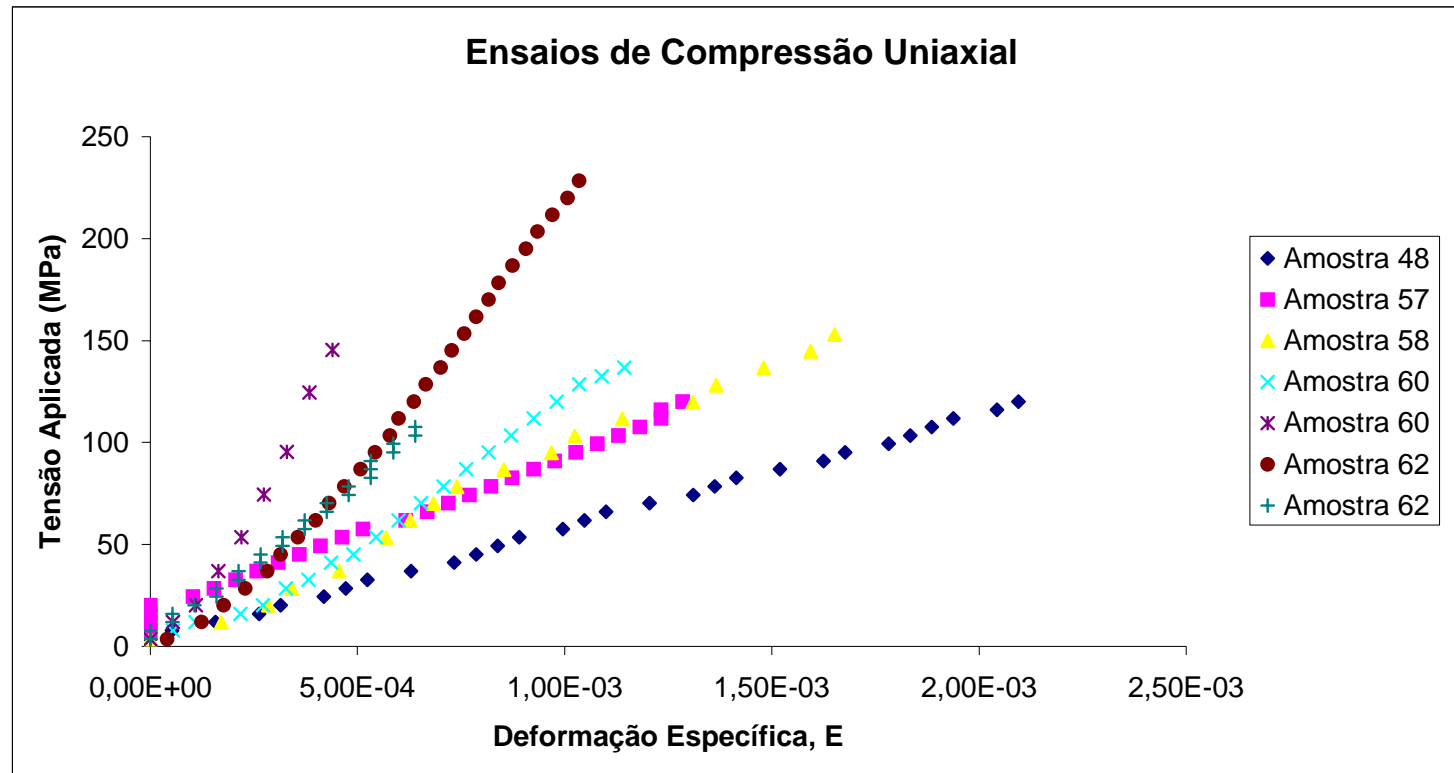


Figura 4.20 – Curvas resistência x deformação específica relativas a testes de resistência à compressão uniaxial realizados em 7 amostras de itabirito dolomítico. Os valores de resistência considerados estão entre 160 e 240 MPa (ver tabela IV.2)

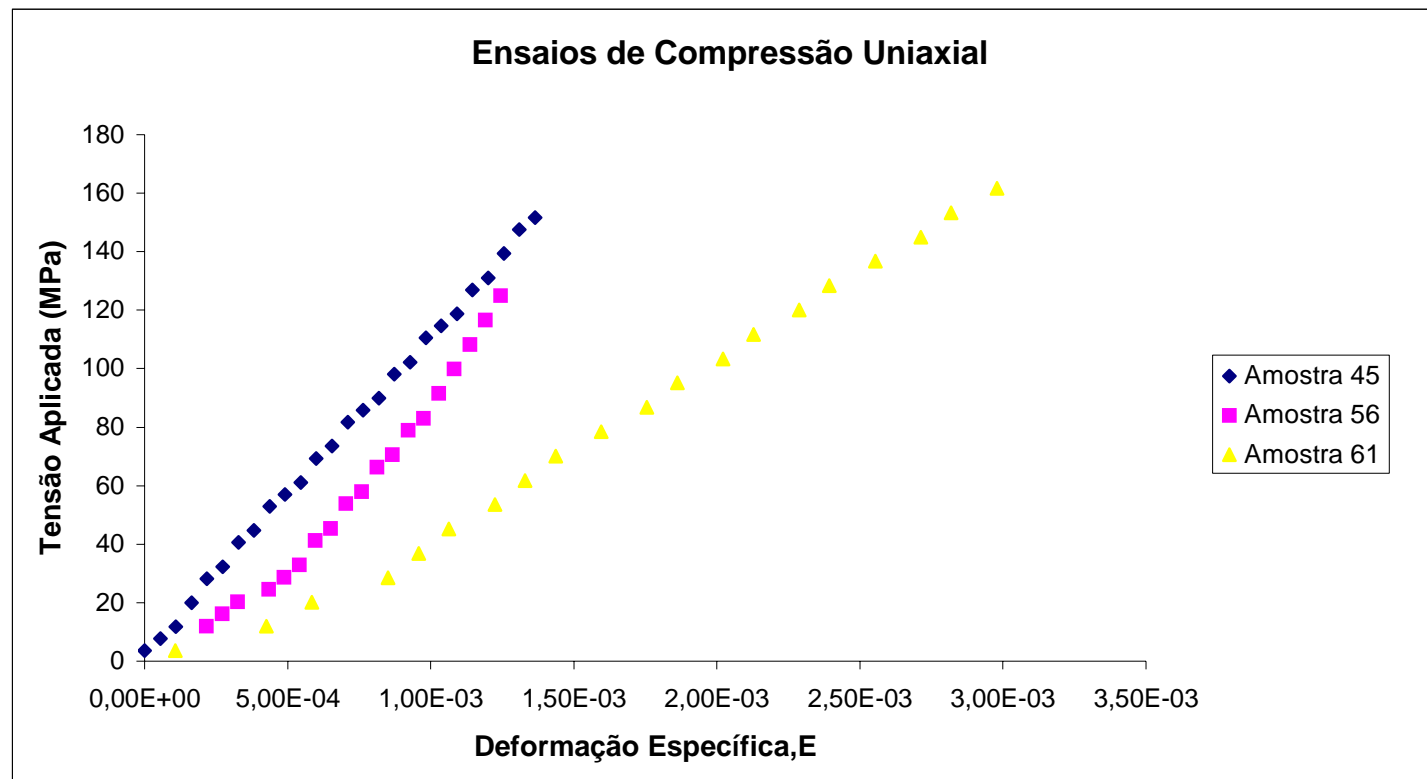


Figura 4.21 - – Curvas resistência x deformação específica relativas a testes de resistência à compressão uniaxial realizados em 3 amostras de itabirito dolomítico. Os valores de resistência considerados estão entre 240 e 320 MPa (ver tabela IV.2)

Tabela IV.3 – Densidade relativa do itabirito dolomítico, determinada pelo método do picnômetro (Dana, 1969)

| Amostra | Teste 1 |        |      | Teste 2 |        |      | Teste 3 |        |      | Teste 4 |        |      | Teste 5 |        |      | Média da Densidade |
|---------|---------|--------|------|---------|--------|------|---------|--------|------|---------|--------|------|---------|--------|------|--------------------|
|         | A       | B      | C    | A       | B      | C    | A       | B      | C    | A       | B      | C    | A       | B      | C    |                    |
| 1       | 34,42   | 99,99  | 3,22 | 39,17   | 103,73 | 3,39 | 42,21   | 106,03 | 3,33 | 43,63   | 107,15 | 3,36 | 36,13   | 101,32 | 3,27 | -                  |
| 2       | 35,95   | 100,80 | 2,63 | 39,59   | 103,49 | 2,68 | 35,65   | 100,61 | 2,67 | 36,61   | 101,24 | 2,58 | 37,37   | 101,83 | 2,63 | -                  |
| 3       | 36,56   | 101,44 | 2,91 | 34,24   | 99,73  | 2,95 | 35,27   | 100,50 | 2,95 | 33,76   | 99,37  | 2,94 | 32,44   | 98,38  | 2,93 | 2,94               |
| 4       | 37,59   | 101,96 | 2,60 | 39,06   | 103,11 | 2,69 | 37,26   | 101,78 | 2,67 | 41,98   | 105,26 | 2,71 | 36,68   | 101,40 | 2,72 | -                  |

A = peso do picnômetro + rocha (g);

B = peso do picnômetro + minério + água (g);

C = densidade aparente;

Peso do picnômetro = 26,66g

Picnômetro + água = 94,07g

Há grande variabilidade nos resultados de resistência à compressão uniaxial, o que dificulta a escolha de um único valor para o projeto de engenharia de taludes. No intervalo amostrado, qualquer valor pode ser usado, o que não é coerente. Para o módulo de elasticidade, há grande variabilidade. Porém, o intervalo entre 92 e 156 GPa pode ser definido como a moda dos valores.

#### **4.4.3 A velocidade do som na avaliação do grau de fissuramento do maciço rochoso**

Procurou-se verificar se ocorreria variação nos resultados, ao se fazer medidas de velocidade do som no sentido do comprimento e no sentido da largura das amostras. Para tal, 37 (trinta e sete) pedaços de testemunho foram testados. Todos eles tiveram o tempo de percurso da onda medido no sentido do comprimento dos mesmos. Porém, com relação à largura, conseguiu-se medir o tempo em 25 (vinte e cinco) amostras. Os resultados obtidos são apresentados na tabela IV.4.

Foram também elaborados histogramas considerando as medidas para cada sentido, e todas as medidas juntas (ver figura 4.22). Os três histogramas são bastante similares. Pode-se concluir que, na impossibilidade de se realizar ensaios no sentido longitudinal, as medidas realizadas no sentido transversal poderão ser utilizadas. Observando-se a moda, nota-se que 29,72% dos valores de velocidade da onda longitudinal se encontra entre 6400 e 6800 m/s, nas medidas segundo o comprimento, e que 36,00% se encontra também entre 6400 e 6800 m/s, nas medidas segundo a largura das amostras. Considerando-se todos os testes juntos, observa-se que 32,25% dos valores de velocidade estão entre 6400 e 6800 m/s, resultado muito próximo dos encontrados separadamente. Percebe-se também que não houve variação considerável na velocidade obtida para as amostras do furo de sonda 03/84 com relação às amostras do furo de sonda 09/85. Isto confirma a hipótese de que o material pode ser considerado um só.

Para a determinação do índice de qualidade IQ, foi necessário calcular o valor de  $V^*_1$ , que é a velocidade das ondas num meio ideal, de mesma composição mineralógica. A tabela IV.5 nos fornece a composição mineralógica estabelecida para o itabirito dolomítico e a velocidade de propagação da onda, para cada mineral constituinte, segundo Dana (1969). O valor encontrado para  $V^*_1$  foi de 6792,18 m/s, sendo

considerado 6792 m/s. Os valores de IQ foram obtidos a partir da fórmula 4.3, e os resultados são apresentados na tabela IV.6. Não foi possível determinar a porosidade da rocha. Supõe-se que a porosidade é quase nula (o material é pouco poroso). Considerou-se arbitrariamente o valor da porosidade igual a 1. Levando-se os resultados de IQ ao gráfico da figura 4.5, conclui-se que o itabirito dolomítico é uma rocha levemente fissurada, para a maioria das amostras testadas. A figura 4. 23 é um histograma construído para os valores de IQ.

#### 4.4.4 – Resistência à tração

Os testes foram feitos em 22 (vinte e duas) amostras do furo de sonda 03/84, e em 10 (dez) amostras do furo 09/85. Não foi difícil obtê-las já que, via de regra, é necessário que as amostras tenham forma cilíndrica reta, com no mínimo 20 mm de altura.

Para que o teste seja válido como recomenda a ISRM (1981), é necessário que a ruptura ocorra no plano diametral da amostra. Isto aconteceu para todas as amostras testadas. Os resultados são apresentados na tabela IV.7. Foram elaborados histogramas em separado, para os resultados relativos aos furos 03/84 e 09/85, e também um histograma com os resultados dos dois furos juntos. Estes histogramas são muito parecidos (ver figura 4.24). Nota-se que a moda dos valores de tensão de ruptura se encontra entre 8,0 e 16,0 MPa, nos três histogramas elaborados. A tensão mínima encontrada é de 6,0 MPa, e a máxima, 20,2 MPa.

#### 4.4.5 – Condutividade hidráulica de uma família de descontinuidades

Para a determinação desse parâmetro, foram utilizados os dados provenientes de levantamento, realizado na Pedreira 12, situada no km8 da BR-262, na altura do bairro Gorduras, em Belo Horizonte.

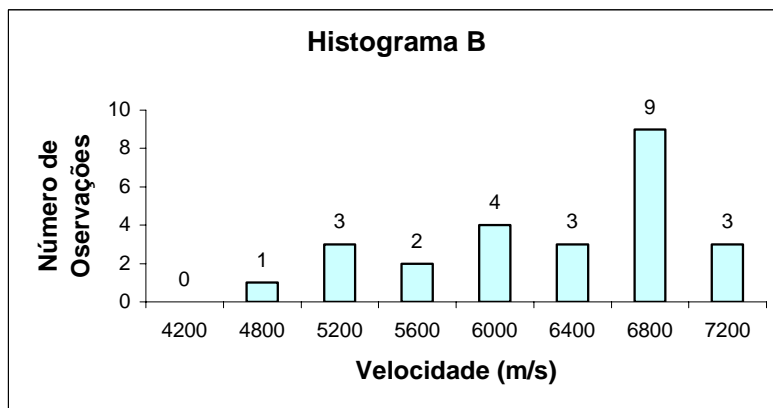
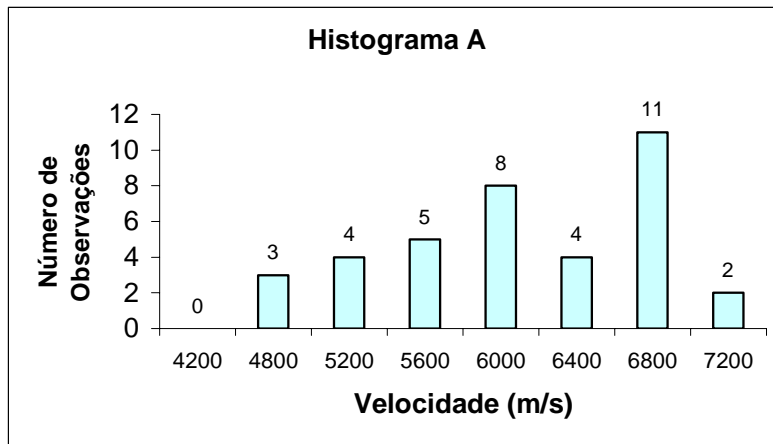
Excluído: mapeamento

O maciço rochoso é constituído de gnaisse cinza claro, muito duro, muito coeso, praticamente são (grau de alteração A1), pertencente ao Embasamento Cristalino, Quadrilátero Ferrífero. Encontra-se extremamente fraturado, (ver figura 4.25).

*Tabela IV.4 – Velocidade de onda sonora medida segundo a altura e o diâmetro de corpos de prova de itabirito dolomítico, provenientes dos furos de sonda 03/84 e 09/85 localizados na Mina de Águas Claras. No final da tabela são registrados resultados*

referentes a amostras coletadas de forma aleatória no galpão de testemunhos da MBR.

| <b>Amostra</b>             | <b>Profundidade (m)</b> | <b>Velocidade altura (m/s)</b> | <b>Velocidade diâmetro (m/s)</b> |
|----------------------------|-------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 43- A                      | 71,00                   | 6490                           | 6627                             |
| 43- B                      | 71,14                   | 5688                           | 5923                             |
| 44                         | 75,00                   | 6828                           | 6878                             |
| 45-A                       | 77,50                   | 6252                           | -                                |
| 45-B                       | 77,63                   | 6753                           | -                                |
| 46                         | 77,80                   | 6426                           | 6712                             |
| 48-A                       | 79,75                   | 6263                           | 6426                             |
| 48-B                       | 79,88                   | 6746                           | 6780                             |
| 49-A                       | 80,40                   | 6220                           | 6461                             |
| 49-B                       | 80,54                   | 6484                           | 6787                             |
| 50-A                       | 80,80                   | 5925                           | 6441                             |
| 50-B                       | 80,94                   | 5994                           | -                                |
| 54                         | 84,50                   | 6341                           | 6420                             |
| 56                         | 198,60                  | 5437                           | -                                |
| 57-A                       | 199,30                  | 5706                           | -                                |
| 57-B                       | 199,44                  | 5210                           | -                                |
| 58                         | 200,00                  | 5390                           | -                                |
| 59                         | 200,50                  | 5843                           | -                                |
| 60-A                       | 201,00                  | 5834                           | -                                |
| 60-B                       | 201,14                  | 6142                           | -                                |
| 60-C                       | 201,27                  | 5781                           | -                                |
| 61                         | 202,00                  | 4806                           | -                                |
| 62                         | 202,50                  | 5819                           | 6092                             |
| 67-A                       | 208,50                  | 4745                           | 4954                             |
| 67-B                       | 208,64                  | 4620                           | 5313                             |
| 68                         | -                       | 5092                           | 5745                             |
| <b>Amostras aleatórias</b> |                         |                                |                                  |
| 69                         | -                       | 4841                           | 5400                             |
| 70                         | -                       | 4794                           | 5143                             |
| 71                         | -                       | 4245                           | 5094                             |
| 72                         | -                       | 4962                           | 5400                             |
| 73                         | -                       | 5489                           | 6353                             |
| 74                         | -                       | 6897                           | 7013                             |
| 75                         | -                       | 6506                           | 6691                             |
| 76                         | -                       | 5684                           | 5871                             |
| 77                         | -                       | 6638                           | 6923                             |
| 78                         | -                       | 6556                           | 6667                             |
| 79                         | -                       | 6506                           | 6534                             |



*Figura 4.22 – Histogramas relativos às medidas de velocidade do som em amostras de itabirito dolomítico. O gráfico A contém 37 medidas feitas no sentido do comprimento das amostras. O gráfico B mostra 25 medidas feitas no sentido da largura das amostras.*

*Tabela IV. 5 – Composição mineralógica básica para o itabirito dolomítico, e a velocidade de propagação da onda longitudinal para cada mineral constituinte (Dana, 1969).*



| <b>Mineral</b> | <b>Proporção na Rocha (C<sub>i</sub>)</b> | <b>Velocidade Teórica V<sub>li</sub> (m/s)</b> |
|----------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Hematita       | 60%                                       | 6700                                           |
| Dolomita       | 30%                                       | 7200                                           |
| Quartzo        | 05%                                       | 6030                                           |
| Anfibólio      | 02%                                       | 7210                                           |
| Sericita       | 02%                                       | 5810                                           |
| Calcita        | 01%                                       | 6660                                           |

Tabela IV.6 – Índice de qualidade do maciço rochoso, determinado em corpos de prova de itabirito dolomítico da Mina de Águas Claras.

| Amostra | Profundidade (m) | Velocidade (m/s) | IQ (%) |
|---------|------------------|------------------|--------|
| 43- A   | 71,00            | 6627             | 97,5   |
| 43- B   | 71,14            | 5923             | 87,2   |
| 44      | 75,00            | 6878             | 100,0  |
| 45-A    | 77,50            | 6252             | 92,0   |
| 45-B    | 77,63            | 6753             | 99,4   |
| 46      | 77,80            | 6712             | 98,8   |
| 48-A    | 79,75            | 6263             | 92,2   |
| 48-B    | 79,88            | 6780             | 99,8   |
| 49-A    | 80,40            | 6461             | 95,1   |
| 49-B    | 80,54            | 6484             | 95,4   |
| 50-A    | 80,80            | 6441             | 94,8   |
| 50-B    | 80,94            | 5994             | 88,2   |
| 54      | 84,50            | 6341             | 93,3   |
| 56      | 198,60           | 5437             | 80,0   |
| 57-A    | 199,30           | 5706             | 84,0   |
| 57-B    | 199,44           | 5210             | 76,7   |
| 58      | 200,00           | 5390             | 79,3   |
| 59      | 200,50           | 5843             | 86,0   |
| 60-A    | 201,00           | 5834             | 85,9   |
| 60-B    | 201,14           | 6142             | 90,4   |
| 60-C    | 201,27           | 5781             | 85,1   |
| 61      | 202,00           | 4806             | 70,7   |
| 62      | 202,50           | 5819             | 85,6   |
| 67-A    | 208,50           | 4745             | 69,8   |
| 67-B    | 208,64           | 5313             | 78,2   |
| 68      | -                | 5092             | 74,9   |
| 69      | -                | 4841             | 71,2   |
| 70      | -                | 4794             | 70,5   |
| 71      | -                | 4245             | 62,5   |
| 72      | -                | 4962             | 73,0   |
| 73      | -                | 5489             | 80,8   |
| 74      | -                | 6897             | 100,0  |
| 75      | -                | 6691             | 98,5   |
| 76      | -                | 5871             | 86,4   |
| 77      | -                | 6638             | 97,7   |
| 78      | -                | 6556             | 96,5   |
| 79      | -                | 6534             | 96,2   |

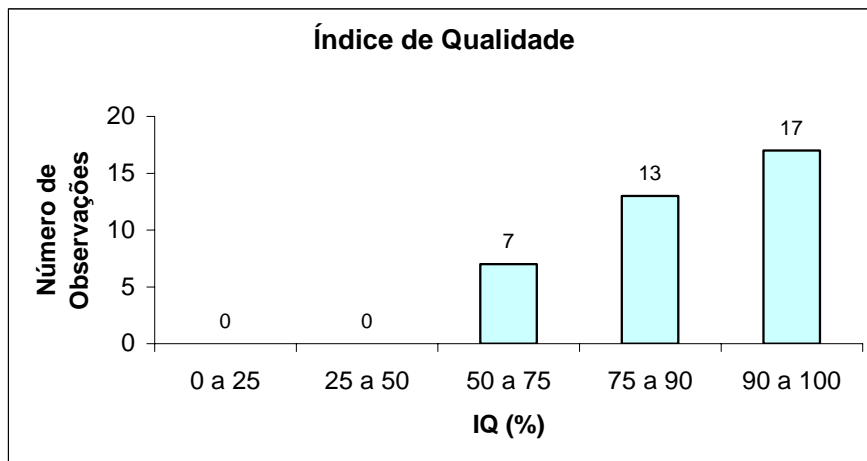


Figura 4.23 –Histograma elaborado com os valores de IQ (índice de qualidade do maciço rochoso). Observa-se que, de um total de 37 medidas, 30 se encontram acima de 75%. O maciço é classificado como levemente fissurado a sem fissuras.

Tabela IV.7 – Resultados relativos aos ensaios de tração realizados em amostras de itabirito dolomítico

| Furo de sonda | Nº da amostra | Profundidade da amostra | Nº do teste | Força (kgf) | Diâmetro (mm) | Espessura (mm) | Tensão (MPa) | Classes |
|---------------|---------------|-------------------------|-------------|-------------|---------------|----------------|--------------|---------|
| 09/85         | 44            | 75,00                   | 2           | 400         | 54,58         | 34,15          | 19,2         | I       |
|               | 44            | 75,00                   | 3           | 200         | 54,53         | 29,65          | 11,1         | I       |
|               | 45            | 77,50                   | 4           | 220         | 54,55         | 23,18          | 15,6         | I       |
|               | 45            | 77,50                   | 5           | 200         | 54,42         | 22,10          | 14,9         | I       |
|               | 47            | 78,00                   | 6           | 160         | 54,55         | 26,88          | 9,8          | I       |
|               | 50            | 80,80                   | 7           | 155         | 54,13         | 22,33          | 11,2         | I       |
| 03/84         | 56            | 198,60                  | 1           | 290         | 54,17         | 32,65          | 14,7         | I       |
|               | 56            | 198,60                  | 2           | 270         | 54,22         | 22,07          | 20,2         | I       |
|               | 58            | 200,00                  | 3           | 180         | 54,18         | 25,57          | 11,6         | II      |
|               | 58            | 200,00                  | 4           | 150         | 54,22         | 23,05          | 10,7         | II      |
|               | 58            | 200,00                  | 5           | 180         | 54,25         | 22,13          | 13,4         | II      |
|               | 58            | 200,00                  | 6           | 200         | 54,23         | 25,17          | 13,1         | II      |
|               | 59            | 200,50                  | 7           | 200         | 54,15         | 33,08          | 10,0         | III     |
|               | 59            | 200,50                  | 8           | 110         | 54,22         | 27,42          | 6,6          | II      |
|               | 59            | 200,50                  | 9           | 250         | 54,20         | 32,20          | 12,8         | II      |
|               | 59            | 200,50                  | 10          | 190         | 54,20         | 29,23          | 10,7         | II      |
|               | 60            | 201,00                  | 11          | 130         | 54,05         | 22,77          | 9,5          | IV      |
|               | 60            | 201,00                  | 12          | 260         | 54,18         | 31,97          | 13,4         | I       |
|               | 60            | 201,00                  | 13          | 190         | 54,10         | 27,63          | 11,4         | II      |
|               | 60            | 201,00                  | 14          | 110         | 54,08         | 18,92          | 9,6          | III     |
|               | 60            | 201,00                  | 15          | 150         | 54,12         | 24,33          | 10,2         | II      |
|               | 60            | 201,00                  | 16          | 240         | 54,17         | 28,23          | 14,0         | V       |
|               | 60            | 201,00                  | 17          | 160         | 54,10         | 20,42          | 12,7         | II      |
|               | 61            | 202,00                  | 18          | 310         | 54,25         | 32,25          | 15,9         | I       |
|               | 61            | 202,00                  | 19          | 240         | 54,18         | 35,43          | 11,2         | II      |
|               | 67            | 208,50                  | 20          | 170         | 54,48         | 34,38          | 8,1          | II      |
|               | 67            | 208,50                  | 21          | 120         | 54,53         | 19,13          | 10,1         | II      |
|               | 67            | 208,50                  | 22          | 250         | 54,50         | 34,97          | 11,7         | II      |

### Resultados

I – A ruptura ocorreu aproximadamente segundo o plano diametral;

II – A ruptura ocorreu segundo superfície plana quase diametral, alinhada com a xistosidade;

III – A ruptura ocorreu segundo superfície plana diametral, alinhada com a xistosidade;

IV – A ruptura ocorreu segundo superfície plana quase diametral, alinhada com a xistosidade e um pouco fora da diagonal;

V – A ruptura ocorreu segundo superfície plana quase diametral.

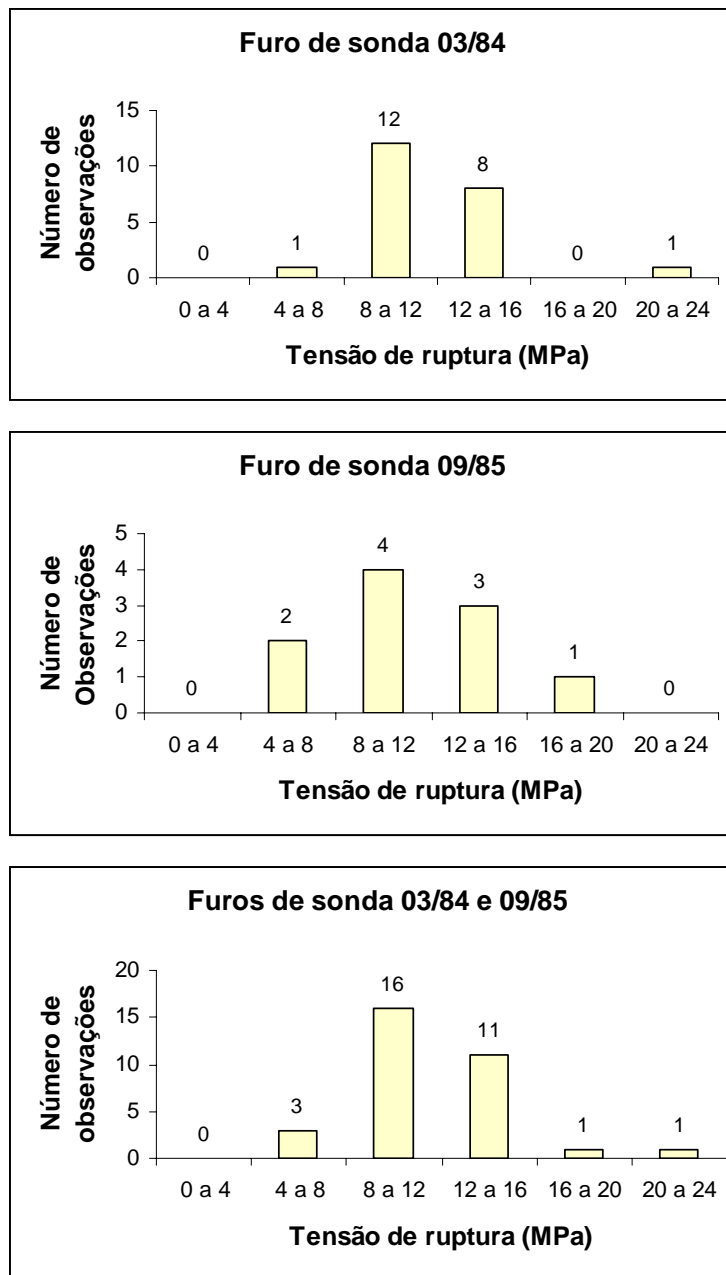


Figura 4.24 – Histogramas elaborados para os resultados de resistência à tração. Histograma A: furo 03/84. Histograma B: furo 09/85. Histograma C: resultados dos dois furos juntos. Nota-se que a moda se encontra entre 8,0 e 16,0 MPa, nos três histogramas.



*Figura 4.25 – Talude em gnaisse, mapeado na Pedreira 12. Percebe-se fraturamento intenso exibido pela rocha, evidenciado pelo processo de desmonte a explosivo.*

A foliação gnáissica encontra-se bastante dobrada, mas não se comporta, nesta região, como uma superfície de descontinuidade. Identifica-se aí uma família de descontinuidades, cuja orientação preferencial é 098/03 (ver figura 4.26). Foram feitas 105 medidas de espaçamento entre as superfícies de descontinuidades. O menor valor encontrado foi de 1,4cm, e o maior, 125cm. Elaborando-se um histograma com essas medidas, nota-se que a moda se encontra entre 20 e 60cm (ver figura 4.27), e que o espaçamento médio é de 28,64cm. A abertura considerada para as descontinuidades é de 0,3cm.

O parâmetro condutividade hidráulica encontrada para essa família de descontinuidades é igual a 0,076 m/s, de acordo com a equação de Louis (1976).

#### 4.5 – Conclusões

Na avaliação dos tipos de ruptura de taludes em rocha, percebeu-se que a análise feita durante o levantamento, não é difícil de ser realizada. Entretanto, deve-se ter o cuidado de não deixar passar despercebido nenhum mecanismo atuante, que possa estar mascarado, por exemplo, pela direção de corte do talude. O teste de Markland (1972) é muito útil nesses casos, mas somente se aplica nos casos de ruptura planar ou em cunha.

Excluído: mapeamento

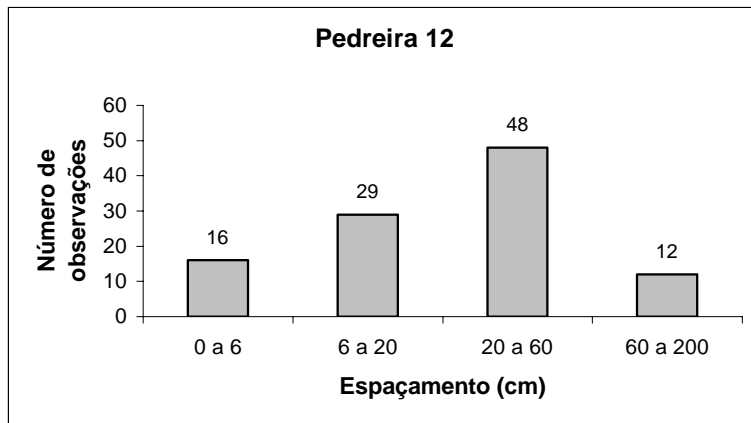
Observa-se a ocorrência de vários mecanismos de ruptura numa extensão de apenas 1km. Não se pode considerar o tipo de mecanismo identificado num único local, para toda uma extensão estudada. Nota-se que essa variabilidade pode ocorrer mesmo em rupturas de blocos métricos (ou maiores).

Na determinação da resistência à compressão uniaxial e da resistência à tração, acredita-se não se ter encontrado problemas, devido ao tipo de rocha analisado. A mesma observação pode ser feita para a medida da velocidade do som. As dificuldades encontradas no galpão de testemunhos, para se obter amostras de filito, por exemplo, devido ao padrão de fraturamento apresentado pela rocha, indicam-nos a necessidade de adaptar a metodologia utilizada a esse tipo de rocha.



*Figura 4.26 – Detalhe para família de descontinuidade, cuja orientação é 098/03, identificada na Pedreira 12. O cabo do martelo intercepta uma das superfícies que compõem essa família.*





*Figura 4.27 – Histograma elaborado a partir de 105 medidas de espaçamento da família de descontinuidades identificada na Pedreira 12. Observa-se que a moda se encontra entre 20 e 60cm.*

#### 4.6 – Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard method of test for unconfined compressive strength of rock core specimens – ASTM Designation D-2938-71a.** In: ISRM –Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.16, n.2, p. 135-140, 1979.

BROWN, E. T. **Rock Characterization Testing & Monitoring – ISRM Suggested Methods.** Pergamon Press, Oxford, 1981, 211p.

CHAPADEIRO, E., CELESTINO, T.B., BORTOLUCCI, A.A. Classificação Geomecânica Aplicada à Estabilidade de Taludes em Área Metropolitana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 7, Poços de Caldas. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1993. v.2 , p.137-144.

CONSTANZO JÚNIOR, J. Síntese Metodológica dos Estudos Geológico-Geotécnicos Aplicados ao Projeto de Taludes de Mineração. São Paulo: ABGE, 1985, 60p. (Síntese de tese n. 5). In: SCARPELLI, A. G. **Classificação Geomecânica Aplicada à Avaliação da Estabilidade de Taludes em Minas de Ferro do Quadrilátero Ferrífero.** São Carlos: USP, 1994, 187p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994.

DANA , J.D. **Manual de Mineralogia.** 1.ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A., 1969.v.1, 354p.

ELSWORTH, D. , MASE, C.R. Groundwater in Rock Engineering. In: HUDSON, J. A. (ed.). **Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice & Projects.** Oxford: Pergamon Press, 1993. v.1, cap.8, p. 201-226.

FARMER ,I. W. **Engineering Behavior of Rocks.** London: Chapman and Hall Ltd, 1983, 208p.

- FERREIRA, F. M. **Estabilidade de Taludes em Solo e Rocha**. Carajás: Cia. Vale do Rio Doce-Diretoria de Ferrosos, 1998. 113p.
- FIGUEIREDO FERRAZ. **Estudos de Estabilidade do Morro do Patrimônio**. Belo Horizonte: Minerações Brasileiras Reunidas S.A., 1992. 61p. (Relatório).
- FOURMAINTRAUX, D. Characterization of rocks; laboratory tests apud MARK PANET et al. **La mécanique des roches appliquée aux ouvrages du génie civil**. Paris: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, cap. IV, 1976. In: GOODMAN, R.E. **Introduction to Rock Mechanics**. 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1989. 562p.
- GIANI, G.P. **Rock Slope Stability Analysis**. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1992. 361p.
- GOODMAN, R.E. **Introduction to Rock Mechanics**. 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1989. 562p.
- HOEK, E. , BRAY, J. **Rock Slope Engineering**. 3.ed. Hertford: Stephen Austin and Sons Limited, 1981. 358p.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. Métodos para Descrição Quantitativa de Descontinuidades em Maciços Rochosos. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1983, 132p. Tradução de "Suggested Methods for the Quantitative Description of Rock Masses". In: **Intern. Journal on Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, Oxford, 1978. v. 15, n.6, p. 319-368.
- LOUIS, C. **Introduction à l'hydraulique des roches**. Paris, Ph.D. Thesis, 1976. apud GIANI, G.P. **Rock Slope Stability Analysis**. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1992. 361p.
- MARKLAND, J.T. A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. In: **Imperial College Rock Mechanics Research Report**. N. 19, 1972, 10p.

- NOGUEIRA, J. A. **Propriedades mecânicas da rocha intacta na mineração de ferro.** Belo Horizonte: UFMG, 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.
- NONATO, C.A. & GRIPP, M.F.A. Contribuição à Caracterização Geológica-Geomecânica no Quadrilátero Ferrífero. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DE ROCHAS, 1, 1994, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABMS/ABGE, 1994. p. 231-238.
- NONATO, C. A. **Utilização de Classificações de Maciços Rochosos no Estudo da Estabilidade de Taludes Pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero, MG.** Belo Horizonte: UFMG, 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1994.
- OBERT, L. , DUVALL, W. I. **Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock.** Nova York: John Wiley and Sons, 1967. 459p.
- RIEDEL, P.S.; RODRIGUES, J.E.; MATTOS, J.T.; MAGALHÃES, F.S. A Influência das Estruturas Geológicas em Instabilidades de Taludes em Saprolitos - Uma Abordagem Regional. **Solos e Rochas**, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 139-147, dezembro, 1995.
- SCARPELLI, A.G. **Classificação Geomecânica Aplicada à Avaliação da Estabilidade de Taludes em Minas de Ferro do Quadrilátero Ferrífero.** São Carlos: USP, 187p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 1994.

## **CAPÍTULO 5: ESTABELECIMENTO DE MODELO GEOMECÂNICO COM O AUXÍLIO DO PROGRAMA UDEC (Universal Distinct Element Code)**

Neste capítulo, é avaliada a aplicabilidade do método dos elementos distintos à previsão de ruptura de um talude em maciço rochoso, a partir de simulações efetuadas com o auxílio do programa UDEC. Um exemplo de aplicação do programa é citado, e algumas observações a esse respeito são feitas.

### **5.1 - Introdução**

Um modelo geomecânico corresponde a uma síntese dos parâmetros e fatores que condicionam mecanismos ou fenômenos previstos em determinado problema. O objetivo principal de sua elaboração é a previsão do comportamento da interação obra versus meio físico. Sua adoção é feita por hipóteses que, à medida que progredem as investigações, são testadas até se chegar a um diagnóstico aceitável do projeto. Após a intervenção no meio físico ou a construção da obra, o modelo é aferido com o comportamento real, monitorado através da observação e instrumentação adequada (Ruiz & Guidicini, 1998).

Para se estabelecer um modelo geomecânico é necessário:

- 1) Definir a forma segundo a qual o maciço rochoso se divide, gerando blocos de rocha;
- 2) Determinar os mecanismos de instabilidade desses blocos que constituem o maciço rochoso;
- 3) Dividir o maciço rochoso em setores dentro dos quais as medidas (1) e (2) podem ser aplicadas.

Os principais parâmetros que governam esses três aspectos do modelamento geomecânico são a orientação, espaçamento e persistência das descontinuidades. De acordo com Giani (1992), as descontinuidades constituem sistemas cujos modelos podem apresentar formas variadas.

Os fenômenos relacionados à instabilidade dos taludes em rocha podem ser classificados da seguinte maneira:

- 1) Ruptura ao longo de planos de descontinuidades existentes sem que haja deformação considerável dos blocos;
- 2) Colapso ou tombamento de blocos;
- 3) Ruptura do maciço rochoso com deformação do mesmo;

4) Ruptura ao longo de superfícies de rochas onde a resistência ao cisalhamento mobilizada é igual à resistência ao cisalhamento disponível.

As três primeiras categorias de fenômenos dependem das características mecânicas e geométricas das descontinuidades, enquanto a quarta categoria pode ser identificada no caso de maciços rochosos extremamente fraturados. O método do equilíbrio-limite pode ser aplicado aos problemas de análise de estabilidade da primeira categoria de fenômenos de instabilidade. O tombamento de blocos de rocha, o colapso e o tombamento associado a deslizamento pertencentes à segunda categoria são analisados através dos métodos que utilizam equações de equilíbrio estático ou dinâmico. Os métodos de equilíbrio-limite são aplicados para a análise da estabilidade de taludes cujos problemas estão relacionados à quarta categoria de fenômenos. Neste caso, se o maciço rochoso está extremamente fraturado e intemperizado, os métodos das fatias, como os de Bishop (1955) e Janbu (1954), por exemplo, apresentam melhores resultados.

A análise do fenômeno de deslizamento pertencente à terceira categoria pode ser feita por meio de métodos numéricos, tais como o *método dos elementos distintos*, que determina equações para o movimento dos blocos e considera a rigidez da superfície de descontinuidade e a deformação destes blocos.

## **5.2 - Revisão da Literatura**

### **5.2.1 – O método dos Elementos Distintos**

A elaboração e o desenvolvimento do método dos elementos distintos ocorreu por um período de vinte anos, começando pela apresentação de Cundall (1971). O método foi inicialmente criado para uma representação bi-dimensional de um maciço rochoso fraturado, mas se estendeu em várias outras aplicações, como a avaliação do desenvolvimento de fraturas em rochas e em concreto. Um dos mais recentes

programas bi-dimensionais é o *UDEC* (Universal Distinct Element Code), que foi desenvolvido em 1980 para agrupar, em um único programa, relações que representam tanto corpos rígidos quanto deformáveis (blocos), separados por descontinuidades.

No método dos elementos distintos, um maciço rochoso é representado por um conjunto de blocos. As fraturas são consideradas como interfaces entre corpos distintos. As forças de contato e deslocamentos nas interfaces de um conjunto de blocos são consideradas através de uma série de cálculos que traçam o movimento dos blocos. Os movimentos resultam da propagação em todo o maciço, de uma perturbação aplicada nas áreas que limitam os blocos. Trata-se de um processo dinâmico em que a velocidade de propagação é uma função das propriedades físicas do sistema (Hart, 1993).

Os cálculos desenvolvidos no método utilizam a aplicação de uma lei força-deslocamento nos contatos e da segunda lei de Newton no movimento dos blocos. A lei de força-deslocamento é utilizada para encontrar forças de contato a partir dos deslocamentos. A segunda lei de Newton estabelece o movimento dos blocos resultante das forças que agem sobre estes.

A adequabilidade de aplicação do UDEC para modelamento de blocos num mecanismo de tombamento foi avaliada por Pritchard & Savigny (1990).

### **5. 3 – Ruptura de um talude em maciço rochoso**

A estabilidade de um talude em maciço rochoso fraturado é afetada pela inclinação da face do talude, pela atitude (direção e mergulho) das superfícies de descontinuidade presentes (xistosidade/acamamento, fraturas, clivagem) e pela resistência ao cisalhamento, avaliada através dos parâmetros coesão e ângulo de atrito, no caso de uma superfície de descontinuidade planar. Outros fatores também influenciam na estabilidade, como, por exemplo, o fluxo de água através das descontinuidades da rocha.

Neste trabalho, foi avaliado um talude em maciço rochoso fraturado, onde foram considerados os parâmetros citados acima. Foram feitas 15 (quinze) simulações. Nas onze primeiras, um dos parâmetros estudados era variado, mantendo-se constantes os valores dos demais. Nas quatro últimas simulações, após a constatação de que não houve ruptura do talude, optou-se por variar o ângulo de atrito da rocha. O fluxo de água não foi levado em consideração, e o talude foi tratado como um talude “seco”, em todos os casos. As propriedades físicas da rocha intacta são: peso específico de  $2500 \text{ kg/m}^3$ , módulo de expansão volumétrica de 16,7 GPa e módulo de elasticidade transversal de 10 GPa. As propriedades mecânicas das descontinuidades são rigidez normal de 10 GPa/m, rigidez ao cisalhamento de 10 GPa/m, e ângulo de atrito de  $45^\circ$ . Nas simulações, considerou-se um talude-padrão, com duas famílias de descontinuidades, cuja persistência foi considerada 100,0m. As descontinuidades são fechadas, com mergulho de  $20^\circ$  e espaçamento normal ao traço da mesma de 2,0 metros; e mergulho de  $80^\circ$  e espaçamento de 3,0 metros. As coordenadas do bloco (geometria) são: (0, -5) (0,0) (5,0) (11,10) (22,10) (22, -5). A inclinação da face do talude é de  $60^\circ$  e a altura é de 10,0 metros (ver figura 5.1). O gradiente de tensões gravitacional considerado foi de 0,125 na direção x, e 0,25 na direção y.

O primeiro estudo foi realizado para um maciço moderadamente fraturado, com espaçamento de descontinuidades igual a 2,0 e 3,0m. Os pares de valores de espaçamento foram alterados de 2,0 / 3,0 para 1,5 / 2,25, 1,0 / 1,5 e 0,5 / 0,75 (maciço extremamente fraturado), e foram empregados os ciclos de 5000, 10000 e 20000. Não houve indícios de ruptura em nenhuma das situações (ver figura 5.2). Em seguida foram estudados pares de valores de espaçamento e inclinação do talude, conforme exibido abaixo. Também não foram observados indícios de ruptura.



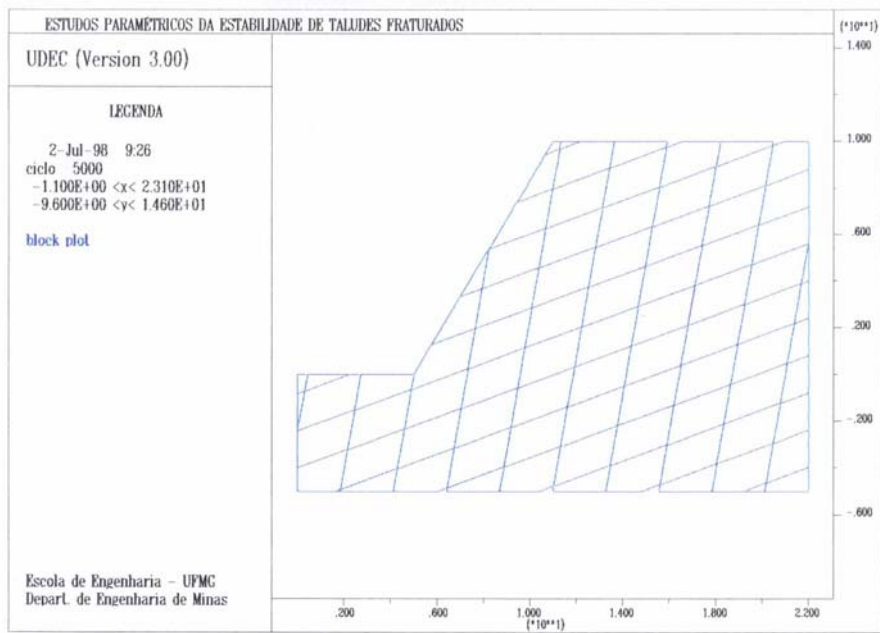


Figura 5.1- Geometria do problema relativo ao estudo da estabilidade de talude em maciço rochoso fraturado seco. In: Franca (1997)

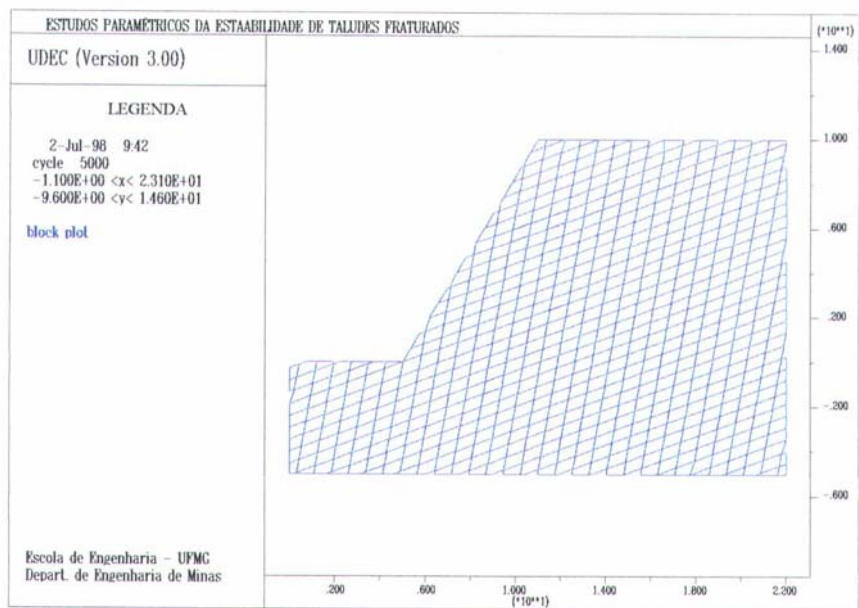


Figura 5.2 – Simulação em que se considera o espaçamento das descontinuidades como 0,5 e 0,75m, sem alterar as outras propriedades do maciço. Não houve ruptura. In: Franca (1997)

Espaçamento das descontinuidades, inclinação da face do talude e presença de indícios de ruptura.

|                            |         |         |          |         |
|----------------------------|---------|---------|----------|---------|
| <b>Espaçamento</b>         | 1,0/1,5 | 2,0/3,0 | 0,5/0,75 | 2,0/3,0 |
| <b>Inclinação</b>          | 60°     | 80°     | 80°      | 89°     |
| <b>Indícios de ruptura</b> | Não     | não     | não      | não     |

Para o par de valores de espaçamento 2,0/3,0 metros, com inclinação do talude de 60°, foram feitas simulações com o ângulo de atrito correspondente a 25°, 10° e 0°, respectivamente. A ruptura é visível, mesmo utilizando o ciclo de 5000 (ver figura 5.3).

Para o par de valores de espaçamento 2,0/3,0 metros, com inclinação de talude igual a 89°, foram feitas simulações com ângulo de atrito igual a 40°, 30° e 20°. Empregando-se o ângulo de atrito igual a 40° não houve sinais de ruptura. Observou-se o deslizamento de alguns blocos, quando se alterou o ângulo de atrito para 30°. Este deslizamento ficou mais evidente, ao se alterar o ângulo para 20° (ver figura 5.4). Vale salientar que, pelas figuras podemos avaliar o volume de rocha fraturada instabilizada. O volume instabilizado para ângulo de atrito de 20° é muito pequeno se comparado com o volume instabilizado para o ângulo de atrito de 0°.

O programa UDEC é muito útil para a realização de estudos bidimensionais da estabilidade de escavações em maciços rochosos fraturados com ou sem presença de água, e para o projeto de engenharia de taludes. Os valores de espaçamento das descontinuidades e a inclinação da face do talude, ao serem modificados, não influenciaram na estabilidade. Observou-se que só ocorreu ruptura ao se variar os valores do ângulo de atrito. Portanto, no caso estudado, a estabilidade do talude é controlada pelo valor do ângulo de atrito.

#### **5.4 – Exemplo de aplicação do programa UDEC – O talude sul da Mina de Águas Claras**

##### **5.4.1 – A Mina de Águas Claras**

A Mina de Águas Claras localiza-se na Serra do Curral, na porção noroeste do Quadrilátero Ferrífero, e encontra-se em funcionamento desde 1973. Posiciona-se no flanco sul de um sinclinal invertido, onde podem ser observados, da base para o topo,

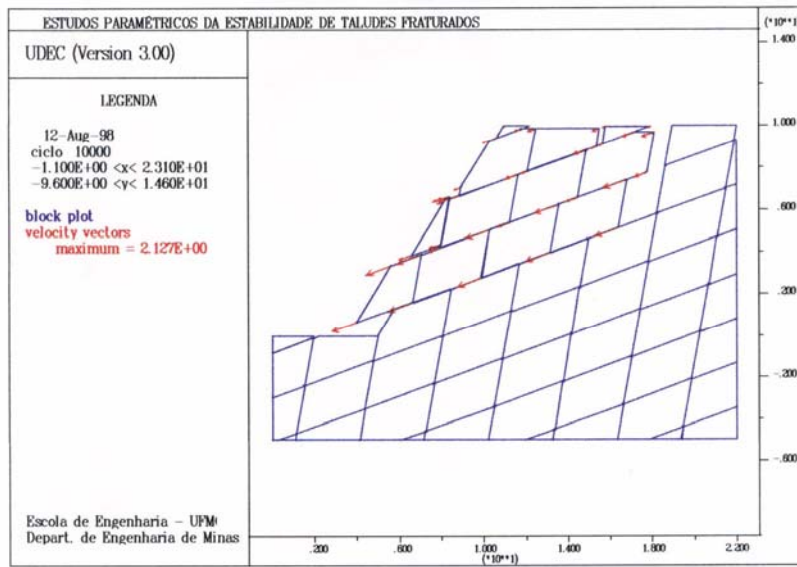


Figura 5.3 – Deslocamento de blocos no talude, ângulo de atrito  $0^\circ$ , com par de valores de espaçamento 2,0/3,0 metros e inclinação da face do talude igual a  $60^\circ$ . *In: Franca (1997)*.

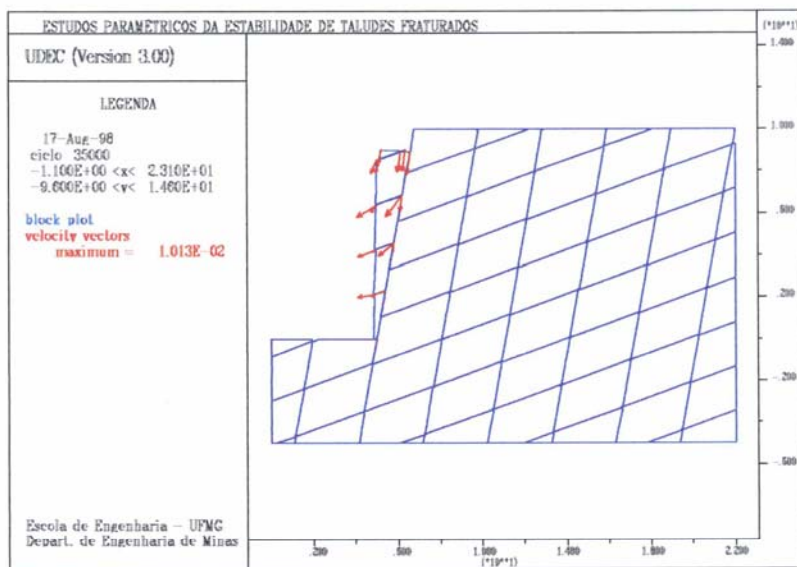


Figura 5.4 – Deslocamento dos blocos do talude, ângulo de atrito  $20^\circ$  com par de valores de espaçamento 2,0/3,0 metros, e inclinação da face do talude igual a  $89^\circ$ . *In: Franca (op.cit)*.

itabiritos (compacto e dolomítico) e hematitas da Formação Cauê, filitos dolomíticos e filitos sericíticos pertencentes à Formação Batatal, quartzitos, quartzo-filitos e metacherts da Formação Moeda, e clorita-xistos do Grupo Nova Lima. Percebem-se ainda solos, rolados e cobertura de canga.

Como estruturas mais importantes observadas na cava, podem ser destacadas a foliação, dobras e fraturas, decorrentes de um único evento tectônico (Hasui & Magalhães, 1990).

- a) Foliação: compreende o *bandamento composicional* (bandas justapostas de constituição e/ou textura diferentes), a *xistosidade* e a *foliação milonítica*, dispondo-se geralmente com atitudes praticamente coincidentes;
- b) Dobras: sua distribuição é aleatória em pontos localizados, podendo inverter a atitude da foliação, ao nível das bancadas. Ocorrem também em escala decimétrica;
- c) Fraturas: são mais visíveis nas hematitas e nos itabiritos duros. Constituem duas famílias.

#### 5.4.2 – O Lago de Águas Claras

O objetivo desse estudo de caso é analisar um item específico do plano de recuperação da Mina de Águas Claras: a criação do Lago de Águas Claras, logo após o encerramento das atividades de lavra na área da mina, previsto para 2002. Este lago será construído a partir do preenchimento da área da cava por água proveniente de fontes subterrâneas e superficiais, e terá 240m de profundidade. Tornou-se necessário, portanto, estudar a influência do lago na estabilidade dos taludes da cava (Franca, 1997).

Um modelamento numérico foi desenvolvido com o objetivo de superar essas limitações e permitir a compreensão do comportamento dos taludes após a escavação e durante vários estágios do preenchimento do lago, do ponto de vista das tensões e deformações. Este trabalho incluiu a análise do mecanismo de tombamento de blocos no talude sul da mina, utilizando o programa UDEC.

O talude sul é constituído por filito dolomítico, filito sericítico e quartzito. Os parâmetros geomecânicos adotados nesta análise foram obtidos a partir de sistemas de

classificação de maciços rochosos ou a partir de critérios de ruptura empíricos (ver tabela V.1). A metodologia de modelamento envolveu a criação de um estado de equilíbrio inicial e a alteração desse estado (provocada pela operação de escavação, por mudanças efetuadas nos parâmetros de resistência e por variações do nível de água). A avaliação do modelo foi feita mais uma vez, para esta nova condição. A figura 5.5 mostra a disposição das litologias e os blocos deformáveis utilizados pelo programa UDEC. As elevações do nível de água para avaliar a influência do lago na estabilidade do talude foram 1080, 1000, 950 e 900 metros.

A figura 5.6 mostra os vetores de deslocamento no filito dolomítico. As direções dos vetores confirmam a tendência ao tombamento de blocos, especialmente na base da seqüência de filitos sericíticos, onde a ruptura do filito dolomítico macio pode ocorrer. A magnitude dos deslocamentos é afetada pelo nível de água subterrânea no quartzito (Franca, op.cit.). Quanto mais alto o nível da água subterrânea, maiores são os deslocamentos na porção inferior da seqüência. Um nível piezométrico mais elevado induz o surgimento de rupturas por cisalhamento nas discontinuidades da base da seqüência. As figuras 5.7 e 5.8 mostram as regiões submetidas a forças de cisalhamento e de tração, para duas posições do nível de água no quartzito: 1080 e 950 metros. Os pontos de ruptura são marcados pelo símbolo (+). Percebe-se que, com o nível de água subterrânea mais elevado, o número de zonas rompidas na porção inferior do talude é maior. Os efeitos do lago no talude sul foram simulados através da aplicação da pressão correspondente ao peso da água nas regiões correspondentes aos limites da escavação. À medida que o lago foi desfeito, o número de zonas instáveis foi reduzido.

O modelamento realizado com o UDEC mostrou que o talude é sensível à estabilidade dos filitos dolomíticos situados em sua base, ou seja, as rupturas iniciadas neste local podem gerar uma ruptura progressiva na porção superior do talude. Níveis de água subterrânea mais elevados provocariam a infiltração de água nos filitos, gerando poropressões e aumento dos deslocamentos. Zonas onde ocorrem tração e cisalhamento são formadas, e a ruptura pode ser induzida.

*Tabela V.1 – Parâmetros geomecânicos utilizados no modelamento feito com o programa UDEC. In: Franca, 1997*

| <b>Parâmetros</b>                           | <b>Filito Dolomítico</b> | <b>Filito Sericítico</b> | <b>Quartzito</b> |
|---------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|
| <b>Peso Específico (kN/m<sup>3</sup>)</b>   | 19                       | 22                       | 25               |
| <b>Coesão (kPa)</b>                         | 240                      | 410                      | 320              |
| <b>Ângulo de Atrito (°)</b>                 | 33                       | 37                       | 39               |
| <b>Módulo de Young (GPa)</b>                | 2,0                      | 11,2                     | 17,8             |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>              | 0,2                      | 0,2                      | 0,25             |
| <b>Módulo de cisalhamento (GPa)</b>         | 0,8                      | 4,7                      | 7,1              |
| <b>Módulo de expansão volumétrica (GPa)</b> | 1,2                      | 6,2                      | 11,9             |
| <b>Rigidez normal (Pa/m)</b>                | -                        | $8,9 \cdot 10^8$         | -                |
| <b>Rigidez ao cisalhamento (Pa/m)</b>       | -                        | $3,7 \cdot 10^8$         | -                |

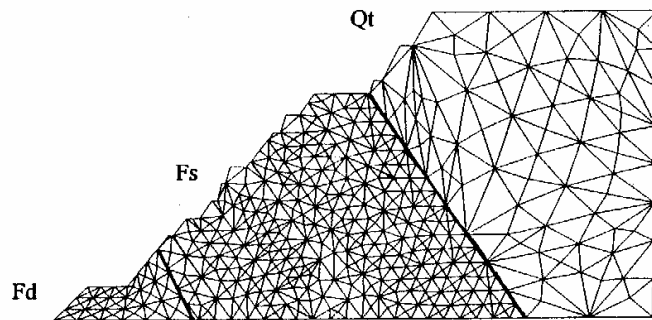


Figura 5.5 – Disposição de litologias no talude sul, e blocos deformáveis utilizados no programa UDEC.  
In: Franca (1997)

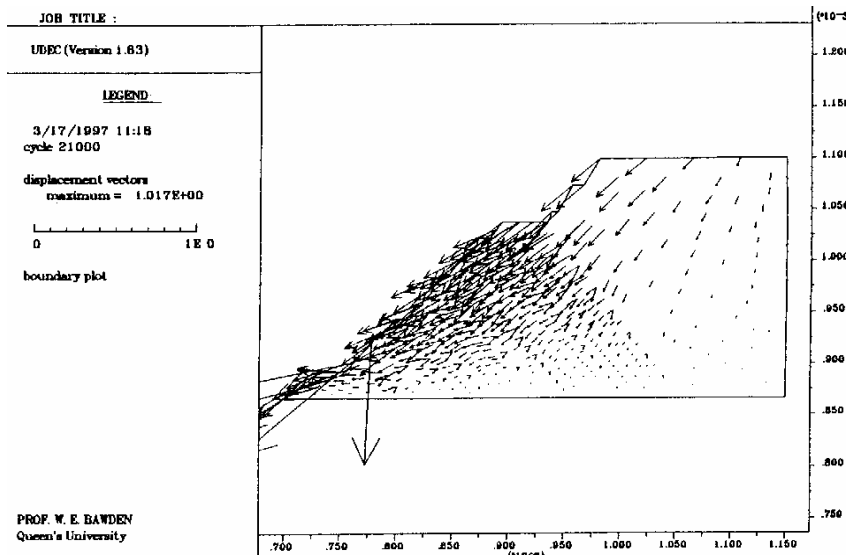


Figura 5.6 – Vetores relacionados aos deslocamentos no talude sul, gerados na área do filito dolomítico. In: Franca (op.cit.).

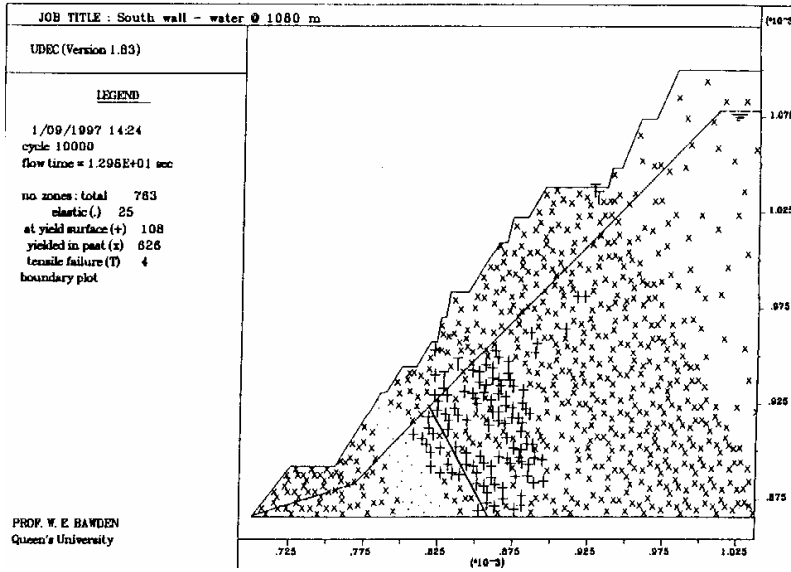


Figura 5.7 – Simulação realizada no talude sul, considerando o nível de água subterrânea igual a 1080m. In: Franca (op.cit.)

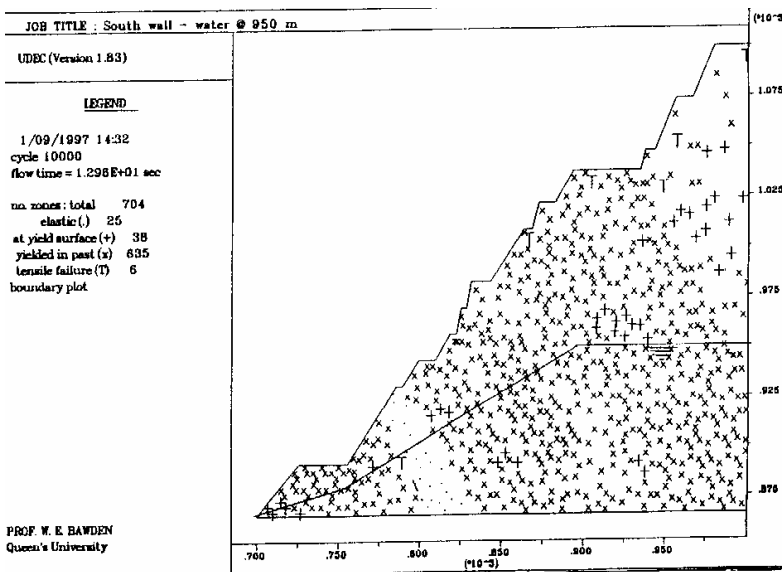


Figura 5.8 – Simulação realizada no talude sul, considerando o nível de água subterrânea igual a 950m. In: Franca (op.cit.)



## 5.5 – Conclusão

O programa UDEC é muito útil no esclarecimento dos processos que controlam a ruptura de taludes. Pode-se utilizá-lo na análise dos mecanismos de tombamento de blocos ou na análise da estabilidade de maciços fraturados de um modo geral. O principal problema encontrado foi a dificuldade de ajuste dos dados de entrada para a definição da geometria e configuração dos taludes. A partir do momento que o talude-padrão está construído, as alterações necessárias feitas nos parâmetros, para o desenvolvimento de análises de estabilidade são facilmente adaptadas.

## 5.6 – Referências bibliográficas

BISHOP, A. W. The Use of Slip Circle in the Stability Analysis of Earth Slopes. **Géotechnique**, v. 5, n.1, p. 7-17, 1955.

CUNDAL, P.A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. In: SYMP. INT. SOC. ROCK MECHANICS, Nancy. **Proceedings...** Nancy, 1971.v.1.,n.II-8. In: HUDSON, J.A. (ed.). **Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice & Projects**. Oxford: Pergamon Press. v.2, cap10, 1993. p. 245-262.

FRANCA, P. R. B. **Analysis of Slope Stability Using Limit Equilibrium and Numerical Methods With Case Examples From The Águas Claras Mine, Brazil**. Ontario: Queen's University. 204p. Thesis (For the degree of Master of Science) – Department of Mining Engineering. Queen's University, Canada, 1997.

GIANI, G.P. (1992) - **Rock Slope Stability Analysis**. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 361p.

HART, R.D. An Introduction to Distinct Element Modeling For Rock Engineering. In: HUDSON, J.A. (ed.). **Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice & Projects**. Oxford: Pergamon Press. v.2, cap.10, 1993. p. 245-262.

HASUI, Y. , MAGALHÃES, F.S. **Modelo Geo-estrutural da Mina de Águas Claras para a Análise de Estabilidade de Taludes.** Belo Horizonte: Minerações Brasileiras Reunidas S.A., 1990, 18 p. (Relatório).

ITASCA CONSULTING GROUP, INC. **UDEC, version 3.0. User Manual.** University of Toronto: 1995.

JANBU, N. Application of Composite Slip Surfaces for Stability Analysis. In: EUROPEAN CONFERENCE ON STABILITY OF EARTH SLOPES. **Proceedings...**Stockholm: 1954. v.3, p. 43-49.

PRITCHARD, M.A. , SAVIGNY, K.W. Numerical modelling of toppling. **Canadian Geotechnical Journal**, Vancouver: 1990. n. 27, p. 823-834.

RUIZ, M. D. , GUIDICINI, G. Introdução. In: OLIVEIRA, A. M. S. , ALVES DE BRITO, S. N. **Geologia de Engenharia.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p. 1-5.

## **CAPÍTULO 6: COMENTÁRIOS FINAIS**

As principais conclusões e comentários relativos à caracterização de maciços rochosos para o projeto de engenharia de taludes no Quadrilátero Ferrífero são apresentadas nesse capítulo.

### **6.1 – Caracterização geológica-geomecânica**

A caracterização geológica-geomecânica de um maciço rochoso implica no levantamento de atributos do meio rochoso que, isolada ou conjuntamente, condiciona o seu comportamento. Um dos atributos fundamentais é o estado de alteração das rochas. A avaliação do estado de alteração pode ser feita segundo várias abordagens. A avaliação segundo o grau de alteração/coerência, através da metodologia desenvolvida pelo corpo técnico da MBR reúne a experiência adquirida anteriormente e é uma excelente ferramenta para o Quadrilátero Ferrífero. Ela considera a coerência (dureza e tenacidade), associada à alteração. No caso de rochas sedimentares, o trabalho de Vaz(1996) deve ser consultado. Algumas dúvidas podem surgir quando estamos na interface entre solo de alteração de rocha e rocha alterada mole (definidos no perfil de intemperismo apresentado por Vaz). Nesses casos, seria interessante complementar a avaliação do grau de alteração, relacionando-a com os dados de resistência à compressão uniaxial da rocha intacta. No trabalho de campo, a determinação do campo de variação da resistência à compressão uniaxial (golpes de martelo e demais meios) é fundamental. Sugere-se que novos estudos que relacionam a resistência à compressão uniaxial e o estado de alteração, sejam desenvolvidos.

O RQD retrata resultados unidimensionais, reduzindo as informações disponíveis no estudo do afloramento a uma linha. No entanto, a caracterização do maciço rochoso é um problema tridimensional. Apesar disso, o RQD é uma ferramenta usada até hoje. Na etapa de levantamento de dados, é importante destacar a influência da presença de fraturas que não constituem famílias de descontinuidades, mas que contribuem para os processos de ruptura. Não foi possível considerar a ocorrência dessas fraturas na determinação do RQD pelas abordagens utilizadas (Palmstrom, 1975 e Priest & Hudson, 1976) nem na determinação dos índices RMR e SMR.

O RMR considera os parâmetros fundamentais para caracterização do maciço rochoso: resistência à compressão uniaxial da rocha intacta com peso 15, características das descontinuidades com peso 30, presença de água com peso 15 e RQD e espaçamento de uma da família de descontinuidades. Se admitimos o RQD

como uma medida indireta dos espaçamentos, o espaçamento tem peso 40. Como vem sendo observado nos trabalhos sobre classificações geomecânicas apresentados por diversos autores, a maioria dos resultados mostra maciços na classe III, sugerindo uma abordagem exageradamente simplificada. No caso de maciços rochosos que se encontram alterados ou muito alterados, a determinação do índice RMR fica comprometida, pois nem todas as famílias de descontinuidades podem ser detectadas.

Romana (1988) propõe o índice SMR a partir do índice RMR. Ele considera a orientação das famílias de descontinuidade e a orientação dos taludes. Os resultados encontrados com a aplicação do SMR não são consistentes com o comportamento dos taludes observados.

O sistema Q considera o RQD como parâmetro principal, com peso relativo elevado. Considerando o RQD como medida indireta do espaçamento, o espaçamento tem peso elevado. O sistema Q inclui as deficiências da abordagem unidimensional do RQD. O sistema Q considera o número de famílias de descontinuidades presentes, inclusive considera a presença de descontinuidades aleatórias. No trabalho desenvolvido, ficou clara a necessidade de considerar as descontinuidades aleatórias; essa é uma vantagem do sistema Q. As características da família de descontinuidades consideradas são rugosidade, alteração, preenchimento, abertura através de dois fatores:  $J_r$  (fator relativo à rugosidade) e  $J_a$  (fator relativo à alteração ou preenchimento). A abordagem para a caracterização das descontinuidades tem sido amplamente utilizada. O sistema Q foi o que apresentou os melhores resultados, se o compararmos com os outros sistemas aplicados. Os valores obtidos são coerentes com as características detectadas no campo para os maciços. Mesmo no caso dos maciços bastante alterados, os valores obtidos são coerentes com as características observadas.

## **6.2 – Espaçamento das descontinuidades**

O espaçamento é a menor distância medida perpendicularmente, entre duas descontinuidades adjacentes, de uma mesma família de descontinuidades; e deve ser determinado para cada família presente. As famílias de descontinuidades presentes no maciço dividem o mesmo em blocos. A forma e tamanho dos blocos dependem da

orientação das descontinuidades e do espaçamento. A forma e o tamanho dos blocos são muito importantes no projeto de engenharia de taludes. O cuidado com a coleta dos dados para a determinação do espaçamento é essencial. Um trabalho mal feito pode comprometer a entrada de dados para projetos de engenharia de taludes. Podem ocorrer dificuldades na coleta de dados (dificuldades de acesso, presença de lixo/entulho na face e de material escorrido). Ocorrem dificuldades em particular no caso de rochas alteradas ou muito alteradas. A identificação de famílias de descontinuidades presentes nos taludes em filito da Formação Cercadinho não foi uma tarefa fácil de se realizar, devido ao elevado grau de alteração exibido pelo maciço. O mesmo não ocorreu para os taludes em quartzito, ou para os taludes que exibiam as duas rochas. O padrão de fraturamento, nesses casos, estava bastante evidente. Quando isto ocorre, a metodologia sugerida por Hasui & Mito se aplica muito bem. Para as situações em que se tem maciços como o filito, a técnica “scanline” seria mais interessante, por mais trabalhosa que possa parecer, pois permite que todas as descontinuidades sejam consideradas, e não só as que compõem famílias.

Deve-se ter muita atenção no agrupamento dos dados de espaçamento. Quando consideramos todas as medidas feitas para uma determinada litologia, obtemos resultados globais. Quando necessitamos de resultados para um local específico, não podemos aplicar os resultados obtidos para todas as medidas feitas para aquela litologia, mas somente os dados coletados no local. Os dados devem ser considerados em separado, para cada talude ou afloramento mapeado.

### ***6.3 – Parâmetros para os projetos de engenharia de taludes***

#### **6.3.1 – Identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha**

As descontinuidades presentes no maciço rochoso formam blocos, as dimensões desses blocos podem ser centimétricas ou atingir dezenas de metros; esses blocos estão sujeitos a uma ou mais formas de ruptura. Os tipos de ruptura dependem da orientação das descontinuidades, do espaçamento das descontinuidades e da orientação do talude. Cada um desses parâmetros apresenta variação. Como a orientação e o espaçamento das descontinuidades de cada uma das famílias varia dentro de uma faixa de valores, devemos admitir que os tipos de ruptura também

podem variar. A presença de um ou outro tipo de ruptura depende também das características de alteração da rocha e da resistência ao cisalhamento das descontinuidades. Observa-se em geral que os tipos de ruptura variam ao longo dos taludes. A identificação dos tipos de ruptura de taludes em rocha baseada em levantamento geológico, pode ser realizada sem dificuldades quando se está estudando taludes de pequena amplitude (cortes de estrada, por exemplo). Deve-se ter bastante cuidado na interpretação dos resultados, pois numa pequena extensão pode-se ter a ocorrência de vários mecanismos de ruptura ao mesmo tempo. Um mecanismo identificado para um talude de determinada litologia não deve ser considerado para todos os taludes da mesma litologia, da mesma região, mesmo que a direção de corte do talude seja a mesma. Variações locais influenciam os processos de ruptura, e podem passar despercebidas se extrapolamos o resultado encontrado em um talude, para outros de determinada área ou setor mapeado.

Excluído: mapeamento

### **6.3.2 – Determinação de parâmetros físicos através de testes de laboratório**

Considerando que o maciço rochoso é definido como o conjunto formado pela matriz rochosa e todas as descontinuidades nela contidas, vemos que os blocos formados são constituídos por essa matriz rochosa. Na mecânica de rochas, chamamos essa matriz rochosa de rocha intacta, a qual é caracterizada através de testes de ruptura em laboratório. Os testes de ruptura fundamentais são: o teste de compressão uniaxial e o teste de tração indireta (ensaio brasileiro). É importante avaliar o grau de fissuramento da rocha intacta. Isso pode ser feito com o uso de medidas de velocidade do som.

Para a obtenção de material para a realização de ensaios de ruptura, visitamos o galpão de testemunhos da MBR, que contém um conjunto apreciável de testemunhos de sondagem. Após avaliação cuidadosa foi possível perceber a dificuldade de obtenção de material para a realização dos testes. No galpão, existem testemunhos de sondagem das principais litologias do Quadrilátero Ferrífero. O padrão de fraturamento e o grau de alteração são tais que tornam difícil encontrar material apropriado para a preparação dos corpos de prova. O padrão de fraturamento e o grau de alteração elevado dos maciços rochosos encontrados no Quadrilátero Ferrífero sugerem que se faça um esforço para o desenvolvimento de metodologia própria para a realização de

testes de ruptura em “rocha branda”. Tal metodologia deveria estabelecer procedimentos os quais possibilitassem a realização de testes de ruptura para as diferentes litologias existentes no Quadrilátero Ferrífero.

A medida da velocidade do som para a avaliação do grau de fissuramento de maciços rochosos não é difícil de ser realizada, mas a interpretação dos resultados pode nos levar a cometer enganos. É necessário que se tenha uma boa descrição petrológica da rocha avaliada, e que sua porosidade tenha sido determinada.

Foi possível realizar uma série de ensaios de ruptura em itabirito dolomítico. O itabirito dolomítico é uma rocha dura e praticamente sã. Foram realizados 18 ensaios de compressão uniaxial. A resistência à ruptura varia de 100 a 280 MPa, segundo uma distribuição quase uniforme. Observamos uma variação grande entre o valor máximo e mínimo. O módulo de elasticidade também apresenta uma grande dispersão dos resultados. A grande dispersão dos resultados dos ensaios mecânicos são um complicador na definição dos parâmetros de entrada para projetos de engenharia de rochas.

### **6.3.3 – Fluxo de água subterrânea em maciços rochosos**

Acredita-se que a forma ideal de se avaliar o fluxo de água subterrânea seja através do monitoramento de piezômetros construídos a partir de furos de sonda realizados na área estudada. Como nem sempre é possível realizar o trabalho dessa forma, outras técnicas devem ser utilizadas, em substituição a essa.

**Anexo I:** Sistemas de classificação de maciços rochosos utilizados na caracterização geomecânica



### O Índice de Qualidade de Rocha – RQD (“rock quality designation”)

O fator RQD, desenvolvido por D. U. Deere et al (1967) na década de 60, é determinado a partir de medidas de comprimento de testemunhos de sondagem. É dado pela razão entre a soma dos comprimentos de pedaços de testemunho maiores que 10cm e o comprimento total amostrado. O valor do RQD é expresso em porcentagem, fornecendo um índice que varia de 0 a 100 %.

Para a determinação do RQD, a Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas (ISRM) recomenda a utilização de sondagem com diâmetro NX (54,7 mm), comprimento de 1 a 3 m (até 5m), recuperação 100%. Para o diâmetro HX, Barton et al. (1974) recomenda que se use pedaços maiores que 12,5 cm.

Os comprimentos dos pedaços de testemunho devem ser medidos ao longo do eixo do furo para padronização das medidas.

$$RQD = 100 \cdot \left( \frac{\sum \text{Comprimento do testemunho} > 10 \text{ cm}}{\text{Comprimento total}} \right)$$

O valor do RQD depende da direção do furo. Para uma única família de descontinuidades, se o furo é paralelo a esta família presente no maciço rochoso, podemos obter um RQD = 100 %. Porém, se o furo é perpendicular à mesma família de descontinuidades, obteremos um RQD = 0%, se o espaçamento desta família for menor que 10cm ou mesmo um RQD = 100 %, se o espaçamento da família for maior que 10cm. Ver exemplo na figura 1.

Na tabela I é apresentada uma descrição da qualidade do maciço rochoso baseada no valor do RQD, Deere (1967). A “Association Française des Travaux en Souterrain”, AFTES (1978) estabeleceu uma descrição do fraturamento em função do valor do RQD. Esta classificação é apresentada na tabela II.

Muitas vezes precisamos determinar o valor do RQD, em situações onde não existam testemunhos de sondagem. Duas abordagens foram propostas para este problema, por Priest e Hudson (1976) e Palmstrom (1985). Palmstrom (1985) utiliza o parâmetro

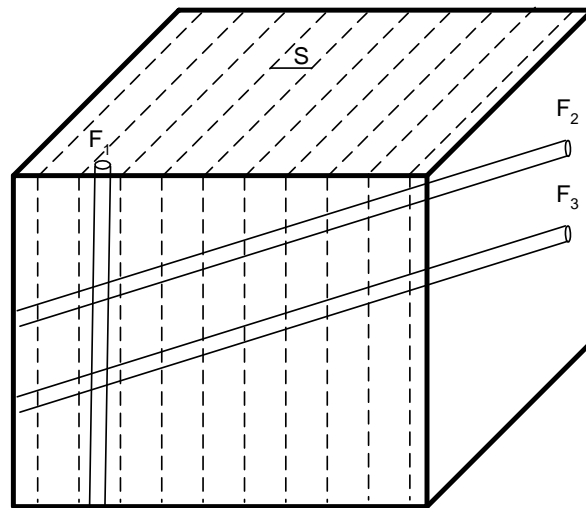
Jv, “volumetric joint count”, ver item seguinte. Priest e Hudson (1976), propõem a seguinte abordagem:

Uma estimativa do RQD pode ser obtida a partir de medidas de espaçamento das descontinuidades, feitas em afloramentos de rocha, usando-se a expressão:

$$RQD = 100 \cdot e^{-0,1/S} [(0,1/S) + 1]$$

onde, S é o espaçamento médio das descontinuidades, em metros, para  $S > 0,06m$ .

Nesta abordagem, apesar de termos acesso a uma visão bidimensional do maciço rochoso, retratamos resultados unidimensionais, ou seja, reduzimos as informações disponíveis no afloramento, para uma linha.



i - F<sub>1</sub> - O furo 1 atravessa o bloco paralelamente à família de descontinuidades. RQD = 100 %

ii - F<sub>2</sub> - O furo 2 atravessa o bloco perpendicularmente à família de descontinuidade. Admitindo S - espaçamento > 10cm  
RQD = 100 %

iii - F<sub>3</sub> - O furo 3 atravessa o bloco perpendicularmente à família de descontinuidade. Admitindo S - espaçamento < 10cm  
RQD = 0 %

Figura 1 – Relação entre o RQD e a direção do furo de sondagem

Tabela I – Descrição da qualidade do maciço rochoso, (Deere, 1967)

| CLASSES | RQD (%)  | QUALIDADE DO MACIÇO ROCHOSO |
|---------|----------|-----------------------------|
| RQD 1   | 0 – 25   | Muito má                    |
| RQD 2   | 25 – 50  | Má                          |
| RQD 3   | 50 – 75  | Regular                     |
| RQD 4   | 75 – 90  | Boa                         |
| RQD 5   | 90 - 100 | Excelente                   |

Tabela II – Descrição do fraturamento do maciço rochoso, (AFTES, 1978)

| CLASSES | RQD       | DESCRIÇÃO DA DENSIDADE DE FRATURAMENTO |
|---------|-----------|----------------------------------------|
| RQD 1   | 90%       | Densidade de fraturamento muito fraca  |
| RQD 2   | 90% à 75% | Densidade de fraturamento fraca        |
| RQD 3   | 75% à 50% | Densidade de fraturamento média        |
| RQD 4   | 50% à 25% | Densidade de fraturamento forte        |
| RQD 5   | 25%       | Densidade de fraturamento muito forte  |

#### O Parâmetro $J_v$ – “volumetric joint count”

Palmstrom (1985) propõe um parâmetro  $J_v$ , “volumetric joint count”, como medida da densidade de descontinuidades ou do grau de fraturamento do maciço rochoso, ou ainda do número de descontinuidades por metro cúbico.

Na figura 2, Palmstrom (1985) apresenta uma ilustração de um maciço rochoso com 3 famílias de descontinuidades, com espaçamentos médios  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  em metros. Neste caso  $J_v$  é dado pela seguinte relação:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3}$$

De acordo com Brown (1981), o parâmetro  $J_v$  é determinado considerando-se a soma do número de descontinuidades por metro, para cada família. Descontinuidades aleatórias podem ser incluídas, mas geralmente tem pouco efeito nos resultados. O número de descontinuidades de cada família deverá ser então contado ao longo da perpendicular às descontinuidades da família considerada. Normalmente se utiliza um comprimento de amostragem de 5 ou 10m.

Um exemplo típico para três famílias e uma descontinuidade ocasional, contadas ao longo de uma linha de amostragem perpendicular, deve aparecer como abaixo:

$$J_V = \frac{6}{10} + \frac{24}{10} + \frac{5}{5} + \frac{1}{10} = 4,1$$

3.5

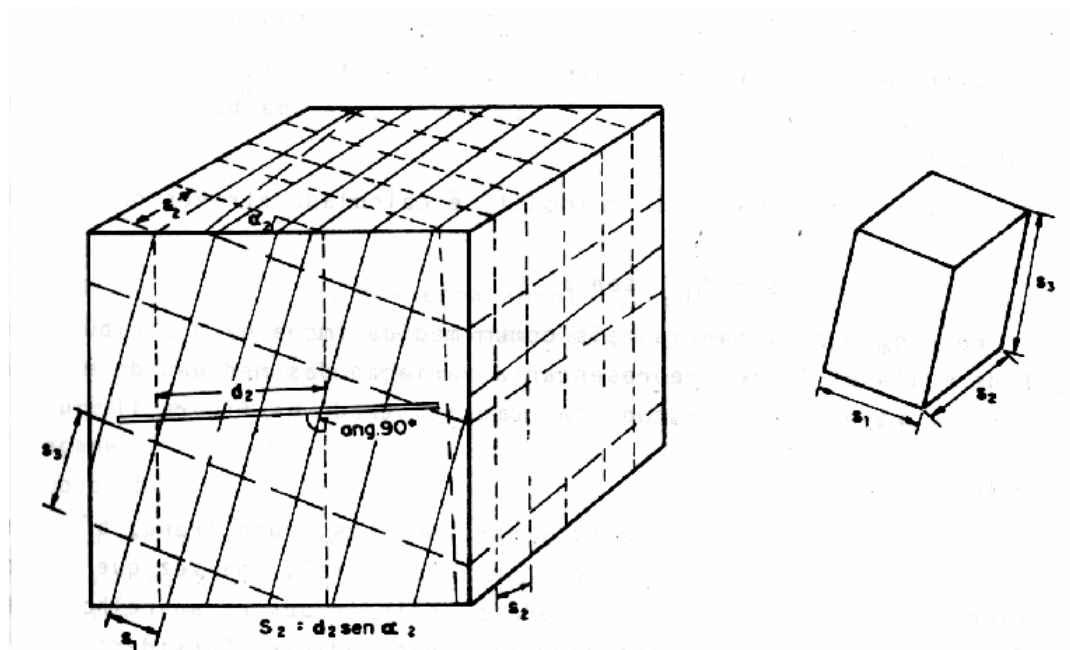


Figura 2 – Maciço rochoso com 3 famílias de descontinuidades, com seus respectivos espaçamentos médios

Os resultados fornecidos pelas equações acima não são idênticos, mas apresentam em geral, valores próximos. As duas abordagens são igualmente satisfatórias mas quando possível recomenda-se a utilização da abordagem sugerida por Brown (1981).

Palmstron (1985) correlaciona o RQD com o índice  $J_v$ , de acordo com a seguinte relação:

$$RQD = 115 - 3,3J_v$$

para os casos em que  $J_v$  é menor do que 4,5 deve-se considerar o RQD igual a 100.

O RQD implica na adoção de uma metodologia exageradamente simplificada, pois consiste numa abordagem unidimensional para um problema tridimensional, não levando em consideração as características de abertura e tipo de preenchimento das descontinuidades. Apesar disto, durante décadas foi o único parâmetro geomecânico considerado em projetos de engenharia de rocha, onde estavam disponíveis informações provenientes de testemunhos de sondagem. Atualmente, o termo RQD deve ser, sempre que possível, substituído por uma abordagem mais apropriada, que considere o aspecto tridimensional dos maciços rochosos.

*Tabela.III – Relação entre o tamanho do bloco e o parâmetro  $J_v$  (ABGE, 1983)*

| $J_v$   | Descrição do $J_v$ | Descrição do tamanho dos blocos |
|---------|--------------------|---------------------------------|
| <1      | Muito pequeno      | Blocos muito grandes            |
| 1 – 3   | Pequeno            | Blocos grandes                  |
| 3 – 10  | Moderado           | Blocos de tamanhos médios       |
| 10 – 30 | Grande             | Blocos pequenos                 |
| > 30    | Muito grande       | Blocos muito pequenos           |

### **Volume do bloco**

As famílias de descontinuidades presentes no maciço rochoso dividem o mesmo em blocos menores. O tamanho e a forma destes blocos depende da frequência e espaçamento das descontinuidades, bem como da atitude das descontinuidades. Na figura 3, Palmstrom (1985) indica a relação entre  $J_v$  e o volume do bloco, para blocos de diferentes formas, desde blocos cúbicos (1:1:1), passando por blocos alongados (1:1:X) e por blocos laminares (1:X:Y).

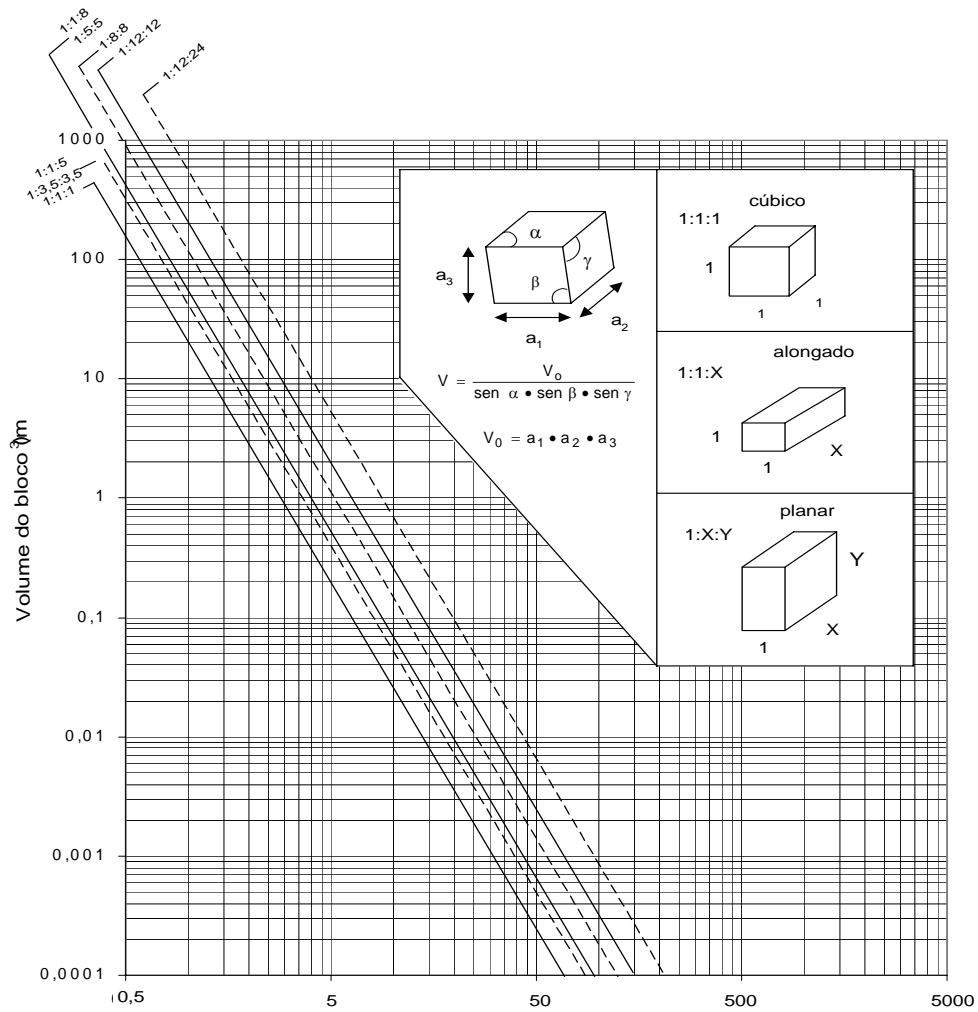


Figura 3 – Relação entre o  $J_v$  e o volume do bloco (Palmstrom, 1985)

Examinando a figura 3, determina-se a forma do bloco que corresponde ao problema estudado, bem como a reta correspondente. A figura permite determinar o volume do bloco a partir do parâmetro  $J_v$ .

A tabela III descreve o tamanho do bloco em função do parâmetro  $J_v$ .

### **Sistemas de classificação geomecânica**

O julgamento e a experiência são imprescindíveis no projeto de engenharia de rochas, porém a habilidade para julgar situações é limitada pela extensão e qualidade da experiência. O êxito do projeto vai depender do discernimento e da compreensão das questões de engenharia e de questões correlacionadas.

Os **sistemas de classificação geomecânica** foram desenvolvidos a partir da sistematização dos dados obtidos em obras realizadas anteriormente e tornaram menos arbitrária a concepção de projetos em engenharia de rochas. Pela natureza das obras de engenharia, qualquer atividade desenvolvida, modifica a situação que existia anteriormente, ou seja, quando se faz uma obra, interfere-se nas características do maciço rochoso. Assim, as classificações geomecânicas foram desenvolvidas a partir do estudo deste “maciço rochoso modificado” e estão comprometidas com os métodos construtivos e tipos de obra. Em muitos projetos de mineração e obras de engenharia civil, quando eram usados quase que exclusivamente procedimentos do tipo tentativa e erro, as classificações geomecânicas foram a única ferramenta sistemática de projeto.

Em essência, classificações geomecânicas devem ser aplicadas em conjunção com métodos observacionais e analíticos para formular um projeto racional compatível com as condições geológicas-geomecânicas e com os objetivos do projeto. As classificações geomecânicas procuram definir, caracterizar, correlacionar e quantificar parâmetros geomecânicos do maciço rochoso.

### **Sistema Q**

O sistema Q foi desenvolvido na Noruega por Barton, Lien e Lunde (1974), do Instituto Geotécnico Norueguês, no início da década de 70, a partir da análise de 212 casos históricos da Escandinávia.

O sistema Q de classificação do maciço rochoso é um sistema quantitativo desenvolvido para facilitar o projeto de suportes de túneis. Baseia-se em uma avaliação da qualidade do maciço rochoso, usando 6 parâmetros diferentes :

1. RQD – (“rock quality designation”);
2.  $J_n$  – fator relativo ao número de famílias de descontinuidades;
3.  $J_r$  – fator relativo às rugosidades da família mais relevante para o problema;
4.  $J_a$  – fator relativo à alteração das descontinuidades, ou ao preenchimento da descontinuidade, conforme o caso, da família mais relevante para o problema em pauta;
5.  $J_w$  – fator relativo à presença de água subterrânea;
6. SRF – fator relativo ao campo de tensões in situ.

O valor do índice Q é determinado pela relação:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

De acordo com os autores, cada termo fracionário deste produto tem um significado, qual seja:

- tamanho do bloco de rocha ( $RQD / J_n$ );
- resistência ao cisalhamento entre blocos ( $J_r / J_a$ );
- campo de tensões atuantes ( $J_w / SRF$ ).

O valor de Q varia, em escala logarítmica, de 0,001 (maciço rochoso de qualidade extremamente pobre ) a 1000 ( maciços de excepcional qualidade). A descrição e valores dos fatores do sistema Q, encontram-se expostos na tabela IV. Na tabela V é apresentada uma descrição da qualidade do maciço rochoso de acordo com o valor de Q.

*Tabela IV - Fatores de classificação do sistema Q (Barton, Lien, Lunde, 1974).*

## 1 – RQD (Rock Quality Designation)



Notas:

- i. Quando o RQD  $\leq 10$  o valor nominal de 10 é usado para calcular Q.
- ii. Para o RQD intervalos de 5 são suficientemente precisos, isto é valores iguais a 5, 10, ..., 90, 95, 100.
- iii. Para o diâmetro HX (74 mm), use comprimentos maiores que 12,5 cm.

## 2 - $J_n$ - FATOR RELATIVO AO NÚMERO DE FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| A. Maciço – nenhuma ou poucas descontinuidades                                 | 0,5 - 1,0 |
| B. Uma família                                                                 | 2         |
| C. Uma família + descontinuidades aleatórias                                   | 3         |
| D. Duas famílias                                                               | 4         |
| E. Duas famílias + descontinuidade aleatórias                                  | 6         |
| F. Três famílias                                                               | 9         |
| G. Três famílias + descontinuidade aleatórias                                  | 12        |
| H. Quatro ou mais famílias, maciço rochoso intensamente fraturada, fragmentada | 15        |
| I. Intensamente fraturado, fragmentado                                         | 20        |

## 3- $J_r$ -FATOR RELATIVO À RUGOSIDADE DAS DESCONTINUIDADES

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>a) Contato entre as paredes das descontinuidades</b>                                                                                   |     |
| <b>b) Contato entre paredes da descontinuidade antes deslocamento relativo de 10 cm</b>                                                   |     |
| 1. Descontinuidades não persistentes                                                                                                      | 4   |
| 2. Rugosas ou irregulares, onduladas                                                                                                      | 3   |
| 3. Lisas, onduladas                                                                                                                       | 2   |
| 4. Polidas, espelhadas, onduladas                                                                                                         | 1,5 |
| 5. Rugosas, planas                                                                                                                        | 1,5 |
| 6. Lisas, planas                                                                                                                          | 1,0 |
| 7. Polidas, espelhadas, planas                                                                                                            | 0,5 |
| <b>Nota:</b> As descrições referem-se a características de pequena escala e de escala intermediária, nesta ordem                          |     |
| <b>c) Falta de contato entre as paredes da descontinuidade, após deslocamento relativo</b>                                                |     |
| 8. Zona com minerais argilosos, suficientemente espessa para impedir contato entre as paredes da descontinuidade                          | 1,0 |
| 9. Zona com areia, cascalho ou material fragmentado, suficientemente espessa para impedir contato entre as paredes da descontinuidade     | 1,0 |
| <b>Notas:</b>                                                                                                                             |     |
| i) somar 1 se o espaçamento médio da família de descontinuidades mais relevante for maior que 3m;                                         |     |
| ii) $J_r = 0,5$ pode ser usado para descontinuidade plana polida com lineação, "slickenside" desde que orientada para resistência mínima. |     |

## 4- $J_a$ - FATOR RELATIVO À ALTERAÇÃO OU PREENCHIMENTO DAS DESCONTINUIDADES

|  |    |                      |
|--|----|----------------------|
|  | Ja | $\phi_r$<br>(aprox.) |
|--|----|----------------------|

| <b>a) Contato rocha x rocha entre paredes das discontinuidades</b>                                                                                                                       |                   |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|
| 1. Cimentada, preenchimento duro (não amolecível), impermeável (quartzo ou epidoto).                                                                                                     | 0,75              |           |
| 2. Paredes da discontinuidade inalteradas, somente oxidação.                                                                                                                             | 1,0               | 25° - 35° |
| 3. Paredes da discontinuidade levemente alteradas. Revestimento de mineral não amolecível, partículas de areia, rocha desintegrada sem argila.                                           | 2,0               | 25° - 30° |
| 4. Revestimento arenoso ou silto-argiloso, pequena fração de argila (não amolecível).                                                                                                    | 3,0               | 20° - 25° |
| 5. Paredes com películas de materiais moles ou com pequeno ângulo de atrito (caulinita ou mica). Também clorita, talco, gesso, grafita, etc. e pequenas quantidades de argila expansiva. | 4,0               | 8° - 16°  |
| <b>b) Contato rocha x rocha antes de deslocamento relativo de 10cm.</b>                                                                                                                  |                   |           |
| 6. Paredes com partículas de areia, rocha desintegrada sem argila.                                                                                                                       | 4,0               | 25° - 30° |
| 7. Preenchimento do mineral de argila fortemente pré-consolidado (não amolecível, contínuo, mas < 5mm de espessura).                                                                     | 6,0               | 16° - 24° |
| 8. Preenchimento de argilo mineral (amolecível), média a baixa pressão de pré-adensamento (contínua, mas com espessura < 5mm).                                                           | 8,0               | 12° - 16° |
| 9. Preenchimento de argila expansiva (montmorilonita) contínuo, mas com espessura < 5mm - valor de "Ja" depende da % de partículas argilosas expansivas e acesso à água.                 | 8-12              | 6° - 12°  |
| <b>c) Não há contato rocha x rocha quando do deslocamento relativo</b>                                                                                                                   |                   |           |
| 10,11,12. Zonas ou bandas de rocha desintegrada ou esmagada, e argila (veja 7, 8 e 9, para descrição das condições da argila)                                                            | 6, 8, ou 8 a 12   | 6° - 24°  |
| 13. Zonas ou bandas de argila siltosa ou arenosa, pequena fração de argila (não amolecível)                                                                                              | 5,0               |           |
| 14,15,16. Zonas ou bandas contínuas e espessas de argila (veja G, He I, para descrição das condições da argila).                                                                         | 10, 13 ou 13 e 20 | 6° - 24°  |
| <b>Nota:</b> $\phi_r$ = ângulo de atrito residual                                                                                                                                        |                   |           |

#### 5 – $J_w$ – FATOR RELATIVO Á PRESENÇA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

|                                                              | $J_w$ | Pressão Aprox. $\text{kgf/cm}^2$ |
|--------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------|
| 1. Escavação seca ou com mínimo fluxo (< 5 l/min localmente) | 1,0   | < 1,0                            |

|                                                                                                 |            |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|
| 2. Fluxo ou pressão médios, com lavagem ocasional do preenchimento das descontinuidades.        | 0,66       | 1,0 - 2,5  |
| 3. Fluxos elevados ou pressões altas em rocha competente com juntas não preenchidas.            | 0,5        | 2,5 – 10,0 |
| 4. Fluxos elevados ou pressões altas, e considerável lavagem de preenchimento de fraturas.      | 0,33       | 2,5 – 10,0 |
| 5. Fluxos ou pressões de água excepcionalmente altos durante a detonação, decaindo com o tempo. | 0,2        | > 10,0     |
| 6. Fluxos ou pressões de água excepcionalmente altos sem qualquer diminuição perceptível.       | 0,1 – 0,05 | > 10,0     |
| <b>Notas:</b>                                                                                   |            |            |
| i) Os fatores “C” a “F” são estimativas grosseiras;                                             |            |            |
| ii) Aumentar $J_w$ se meios de drenagem são instalados.                                         |            |            |

### 6 - SRF - FATOR RELATIVO AO CAMPO DE TENSÕES (OU À PRESENÇA DE ZONAS DE CISALHAMENTO)

|                                                                                                                                                   |                     |                     |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|------------|
| <b>a) Zonas de cisalhamento (fraqueza) interceptando a escavação, que podem causar a relaxação do maciço rochoso</b>                              |                     |                     |            |
|                                                                                                                                                   |                     |                     | <b>SRF</b> |
| 1. Ocorrência de várias zonas de cisalhamento contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada; rocha muito solta (qualquer profundidade)       |                     |                     | 10,0       |
| 2. Uma única zona de cisalhamento contendo argila ou rocha decomposta / intemperizada (profundidade da escavação $\leq 50m$ ).                    |                     |                     | 5,0        |
| 3. Uma única zona de cisalhamento contendo argila ou rocha decomposta / intemperizada (profundidade. $> 50m$ )                                    |                     |                     | 2,5        |
| 4. Várias zonas de cisalhamento em rocha competente (sem argila), rocha solta em torno do túnel (qualquer profundidade)                           |                     |                     | 7,5        |
| 5. Uma única zona de cisalhamento em rocha competente (sem argila) (profundidade $\leq 50m$ )                                                     |                     |                     | 5,0        |
| 6. Uma única zona de cisalhamento em rocha competente (sem argila) (profundidade $> 50m$ )                                                        |                     |                     | 2,5        |
| 7. Descontinuidades abertas dispersas, rocha intensamente fraturada, (qq. profundidade)                                                           |                     |                     | 5,0        |
| <b>Nota:</b> Reduza esses valores de SRF de 25 a 50% se as zonas de cisalhamento relevantes somente influenciam, mas não interceptam a escavação. |                     |                     |            |
| <b>b) Rocha competente, problemas relativos ao campo de tensões in situ</b>                                                                       |                     |                     |            |
|                                                                                                                                                   | $\sigma_c/\sigma_1$ | $\sigma_t/\sigma_1$ | <b>SRF</b> |
| 1. Tensões baixas, próximas à superfície                                                                                                          | $>200$              | $>13$               | 2,5        |
| 2. Tensões médias                                                                                                                                 | 200-10              | 13-0,66             | 1,0        |
| 3. Tensões altas, estrutura muito “rígida” (usualmente favorável à estabilidade pode ser desfavorável à estabilidade da parede).                  | 10-5                | 0,66-0,33           | 0,5-2      |
| 4. Médio estouro de rocha (“rock burst”) – rocha maciça                                                                                           | 5-2,5               | 0,33-0,16           | 5-10       |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |       |      |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|------------|
| 5. Forte (pesado) estouro de rocha ("rock burst") - rocha maciça                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | < 2,5 | 0,16 | 10-20      |
| <b>Nota:</b> Para um campo de tensões naturais fortemente anisotrópico (se medido): quando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ reduzir $\sigma_c$ e $\sigma_t$ para $0,8 \sigma_c$ e $0,8 \sigma_t$ ; quando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$ , reduzir $\sigma_c$ e $\sigma_t$ a $0,6 \sigma_c$ e $0,6 \sigma_t$ .<br>( $\sigma_c$ = resistência à compressão simples ; $\sigma_t$ = resistência à tração)<br>( $\sigma_1$ e $\sigma_3$ tensões principais maior e menor) |       |      |            |
| <b>c) Rocha plástica: fluxo plástico de rocha incompetente sob a influência de fortes pressões de rocha</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |       |      |            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |       |      | <b>SRF</b> |
| 1. Pressões de deslizamento médias                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |       |      | 5 -10      |
| 2. Pressões de deslizamento altas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |       |      | 10-20      |
| <b>d) Rocha expansiva ("swelling"): atividade de expansão química dependendo da presença da água</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |       |      |            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |       |      | <b>SRF</b> |
| Pressões de expansão médias                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |       |      | 5 -10      |
| Pressões de expansão altas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |       |      | 10-15      |

Observações:

- Se a xistosidade, foliação ou clivagem da rocha está muito desenvolvida, considerar como uma família de descontinuidades. Caso contrário, como aleatórias.
- Os fatores  $J_r$  e  $J_a$  devem ser considerados para a família de descontinuidades significativa menos resistente, considerando como significativa aquela que mais provavelmente possa iniciar uma ruptura.
- $\sigma_c$  e  $\sigma_t$  devem ser avaliados na condição saturada, se for apropriado para as condições presentes ou futuras. Uma estimativa muito conservadora de resistência deve ser feita para aquelas rochas que se deterioram quando expostas a condições de umidade e saturação.
- Quando o maciço rochoso contém argila, o fator SRF apropriado para cargas de relaxação deve ser avaliado. Em tais casos a resistência da rocha intacta tem pouco interesse. Porém quando o fraturamento é mínimo e a argila está completamente ausente, a resistência da rocha intacta pode se tornar o elo mais fraco, e a estabilidade então dependerá da relação entre campo de tensões atuante/resistência da rocha. Um campo de tensões fortemente anisotrópico é desfavorável para estabilidade, e é grosseiramente levado em consideração.
- É importante destacar que o sistema Q considera o valor do parâmetro RQD não influenciado pela presença de rochas fracas, o mesmo sendo incorporado como uma medida do espaçamento das descontinuidades. Quando ocorrem rochas fracas no maciço analisado, há, portanto, uma redução significativa do termo RQD/ $J_n$  da expressão de Q.

Tabela V - Relação entre o índice Q e a qualidade do maciço rochoso

| Q            | QUALIDADE DO MACIÇO    |
|--------------|------------------------|
| 0,001 a 0,01 | Excepcionalmente pobre |
| 0,01 a 0,1   | Extremamente pobre     |
| 0,1 a 1,0    | Muito pobre            |
| 1,0 a 4,0    | Pobre                  |

|                |                      |
|----------------|----------------------|
| 4,0 a 10,0     | Regular              |
| 10,0 a 40,0    | Boa                  |
| 40,0 a 100,0   | Muito boa            |
| 100,0 a 400,0  | Extremamente boa     |
| 400,0 a 1000,0 | Excepcionalmente boa |

### **Sistema RMR – “Rock Mass Rating System”**

O sistema RMR, “Rock Mass Rating System”, foi inicialmente desenvolvido por Bieniawski (1989) em 1972-1973; desde então tem sido estudado e aplicado por muitos profissionais em todo mundo, sendo utilizado no projeto de aberturas subterrâneas e de túneis. À medida em que foi utilizado, o sistema foi sendo modificado e adaptado.

Para classificar o maciço rochoso, este sistema usa os seguintes parâmetros:

1. resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
2. RQD - “rock quality designation”;
3. espaçamento modal das descontinuidades;
4. padrão das descontinuidades;
5. influência da água subterrânea.

Através da atribuição de pesos relativos em função das medidas obtidas em campo, de acordo com as tabelas VI e VII, somando-se os pontos obtidos, obtém-se o valor do índice RMR, “rock mass rating”.

Segundo Bieniawski (1989), o parâmetro “padrão das descontinuidades”, reflete as condições e ou características das descontinuidades da família mais relevante presente no maciço rochoso. Sua descrição envolve características relativas à abertura, persistência, rugosidade, alteração das paredes da descontinuidade e resistência do material de preenchimento, conforme a tabela VII. Esta tabela fornece, com maiores detalhes, a forma de atribuição de pesos, de acordo com a descrição de cada um dos itens que caracterizam o padrão das descontinuidades.

Os pesos relativos ao padrão de descontinuidades e espaçamento devem ser estimados para cada família, ou para a família mais importante no processo de instabilização, se for o caso.

Para o estudo da estabilidade das escavações o valor do RMR obtido deve ser ajustado em função da atitude das descontinuidades que compõem o maciço rochoso em relação à geometria e orientação da escavação.

Tabela VI - Sistema de classificação geomecânica ponderada (Bieniawski, 1989) - Parâmetros de classificação e seus pesos.

| A                             | PARÂMETROS                   | FAIXAS DE VALORES                       |                                                                        |                                                                  |                                                              |                                                                                            |                                                                               |             |     |
|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----|
| 1                             | Resistência da Rocha Intacta | "Point Load Index" (MPa)                | > 10                                                                   | 4-10                                                             | 2-4                                                          | 1-2                                                                                        | Não recomendável para abaixo de 1 MPa                                         |             |     |
|                               |                              | Resistência à compressão uniaxial (MPa) | > 250                                                                  | 100-250                                                          | 50 -100                                                      | 25-50                                                                                      | 5-25                                                                          | 1-5         | < 1 |
|                               | PESOS                        | 15                                      | 12                                                                     | 7                                                                | 4                                                            | 2                                                                                          | 1                                                                             | 0           |     |
| 2                             | RQD (%)                      |                                         | 90-100                                                                 | 75-90                                                            | 50-75                                                        | 25-50                                                                                      | < 25                                                                          |             |     |
|                               | PESOS                        |                                         | 20                                                                     | 17                                                               | 13                                                           | 8                                                                                          | 3                                                                             |             |     |
| 3                             | Espaçamento                  |                                         | >2 m                                                                   | 0,6-2,0m                                                         | 20-60cm                                                      | 6 – 20cm                                                                                   | < 6 cm                                                                        |             |     |
|                               | PESOS                        |                                         | 20                                                                     | 15                                                               | 10                                                           | 8                                                                                          | 5                                                                             |             |     |
| 4                             | Padrão das Descontinuidades  | Descrição geral                         | Superfícies muito rugosas e sem alteração. Fechadas e sem persistência | Superfícies pouco rugosas e levemente alteradas; abertura < 1 mm | Superfícies pouco rugosas e muito alteradas; abertura < 1 mm | Superfícies persistentes estriadas ou espessuras do preench. < 5mm ou abertura de 1 a 5 mm | Superfícies persistentes com preench. de material argiloso ou abertura > 5 mm |             |     |
|                               |                              | PESOS                                   | 30                                                                     | 25                                                               | 20                                                           | 10                                                                                         | 0                                                                             |             |     |
|                               | 5                            | Ação da Água Subterrânea                | vazão de infiltração por 10 m de túnel                                 | Nula                                                             | < 10 l/min                                                   | 10 a 25 l/min                                                                              | 25 a 125 l/min                                                                | > 125 l/min |     |
| ou condições gerais do maciço |                              |                                         | Completamente/ seco                                                    | Úmido                                                            | Molhado                                                      | Goteja-mento                                                                               | Fluxo Abundante                                                               |             |     |
| PESOS                         |                              | 15                                      | 10                                                                     | 7                                                                | 4                                                            | 0                                                                                          |                                                                               |             |     |

#### Fatores de ajuste para orientações das descontinuidades

| B DIREÇÃO DAS DESCONTINUIDADES EM RELAÇÃO AO EIXO DAS ESCAVAÇÕES |           |                       |          |              |                   |          |              |
|------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------|----------|--------------|-------------------|----------|--------------|
| Perpendicular                                                    |           |                       |          | Paralela     |                   | Qualquer |              |
| Mergulho Favorável                                               |           | Mergulho Desfavorável |          | Mergulho     |                   | Mergulho |              |
| 45 a 90°                                                         |           | 20 a 45°              |          | 45 a 90°     |                   | 0 a 20°  |              |
| Muito Favorável (Não ajustar o RMR)                              |           | Favorável             | Moderado | Desfavorável | Mto. Desfavorável | Moderado | Desfavorável |
| Pesos                                                            | Túneis    | -2                    | -5       | -10          | -12               | -5       | -10          |
| Para Ajuste                                                      | Fundações | -2                    | -7       | -15          | -25               | -7       | -15          |
| de RMR                                                           | Taludes   | -5                    | -25      | -50          | -60               | -25      | -50          |

Classes dos maciços rochosos determinadas a partir da soma dos pesos

|          |                                        |           |         |         |         |            |
|----------|----------------------------------------|-----------|---------|---------|---------|------------|
| <b>C</b> | <b>Somatório dos Pesos (Fator RMR)</b> | 81 a 100  | 61 a 80 | 41 a 60 | 21 a 40 | ≤ 20       |
|          | <b>Classe do Maciço</b>                | I         | II      | III     | IV      | V          |
|          | <b>Descrição</b>                       | Muito bom | Bom     | Regular | Ruim    | Muito Ruim |

*Parâmetros relativos às classes dos maciços*

|          |                         |       |           |           |           |       |
|----------|-------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|
| <b>D</b> | <b>Classe do Maciço</b> | I     | II        | III       | IV        | V     |
|          | <b>Coesão (kPa)</b>     | > 400 | 300 a 400 | 200 a 300 | 100 a 200 | < 100 |
|          | <b>Ângulo de Atrito</b> | > 45° | 35 a 45°  | 25 a 35°  | 15 a 25°  | < 15° |

Após o ajuste com relação à orientação das descontinuidades, o maciço rochoso é então classificado de acordo com a seção C da tabela VI, que agrupa o RMR ajustado em cinco classes de maciços rochosos. Os valores possíveis do RMR variam de 0 a 100.

*Tabela VII – Sistema de classificação do padrão das descontinuidades (Bieniawski, 1989)*

| <b>PARÂMETROS</b>               |                |                    |                        |                     |            |  |
|---------------------------------|----------------|--------------------|------------------------|---------------------|------------|--|
| Persistência                    | < 1m           | 1 – 3m             | 3 – 10m                | 10 – 20m            | >20m       |  |
| Peso                            | 6              | 4                  | 2                      | 1                   | 0          |  |
| Abertura                        | Nenhum         | < 0,1mm            | 0,1 – 1mm              | 1 – 5mm             | > 5mm      |  |
| Peso                            | 6              | 5                  | 4                      | 1                   | 0          |  |
| Rugosidade                      | Muito rugoso   | Rugoso             | Levemente Rugoso       | Liso                | Espelhado  |  |
| Peso                            | 6              | 5                  | 3                      | 1                   | 0          |  |
|                                 |                | Preenchimento duro |                        | Preenchimento macio |            |  |
| Preenchimento                   | Nenhum         | < 5mm              | > 5mm                  | < 5mm               | > 5mm      |  |
| Peso                            | 6              | 4                  | 2                      | 2                   | 0          |  |
| Estado de alteração das paredes | Pouco alterado | Levemente alterado | Moderadamente alterado | Altamente alterado  | Decomposto |  |
| Peso                            | 6              | 5                  | 3                      | 0                   | 0          |  |

**O Sistema SMR (Slope Mass Rating) de Classificação de Taludes**



Romana (1993) propôs o sistema SMR ("Slope Mass Rating") para a classificação de taludes, a partir do índice RMR, corrigindo-o através de um "fator de ajuste" (função da orientação das descontinuidades, sendo o produto de três sub-fatores), e de um fator de escavação que depende do método de escavação ou desmonte utilizado. Daí:

$$\text{SMR} = \text{RMR} + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4$$

Onde:

$F_1$ :

Depende do paralelismo existente entre a direção de mergulho das descontinuidades e da face do talude. Varia entre 1,00 (para direções paralelas) e 0,15 (o ângulo entre as direções é maior do que  $30^\circ$ , e a probabilidade de ruptura é muito baixa). Pode ser expresso da seguinte forma:

$$F_1 = (1 - \sin(\alpha_j - \alpha_s))^2$$

onde  $\alpha_j$  e  $\alpha_s$  são os valores dos ângulos das direções de mergulho da descontinuidade e do talude.

$F_2$ :

Pode-se dizer que se trata de uma medida de resistência ao cisalhamento da descontinuidade. Nas rupturas planas, ele depende do mergulho das descontinuidades. Seu valor é 1,00 para as rupturas por tombamento. Pode ser determinado pela expressão:

$$F_2 = \text{tg}^2 \beta_j$$

onde  $\beta_j$  é o ângulo de mergulho da descontinuidade. Varia também entre 1,00 (para descontinuidades com mergulho superior a  $45^\circ$ ) e 0,15 (para descontinuidades com mergulho inferior a  $20^\circ$ ).

$F_3$ :

Avalia a relação entre os ângulos de mergulho da descontinuidade e do talude. No caso de rupturas planas,  $F_3$  representa a probabilidade das descontinuidades aflorarem no talude. As condições são supostas normais quando o mergulho médio na família de descontinuidades é igual ao do talude, o que permite que somente algumas descontinuidades aflorem. Se o talude possui ângulo de mergulho  $10^\circ$  maior do que o ângulo de mergulho das descontinuidades, quase todas as descontinuidades afloram, compondo uma situação muito desfavorável. Ao se tratar de rupturas por tombamento,

não se consideram condições desfavoráveis ou muito desfavoráveis, já que o tombamento dificilmente produz rupturas bruscas, e em muitos casos os taludes com tombamentos se mantêm.

F<sub>4</sub>:

É estabelecido de forma empírica, em função das condições de desmonte ou escavação. Tem-se as seguintes situações:

- a) Taludes e encostas naturais;
- b) Escavação (ou desmonte mecânico) sem a utilização de explosivos;
- c) Desmonte suave, com o plano de fogo sendo feito para causar o mínimo de danos ao maciço remanescente;
- d) Desmonte a explosivo com supervisão de engenharia, cujo objetivo é garantir condições de segurança e custos;
- e) Desmonte a explosivo sem supervisão de engenharia. Neste caso o maciço rochoso pode ser mais ou menos danificado, o que conduz a uma queda acentuada da qualidade geomecânica do mesmo.
- f) Desmonte com excesso de carga explosiva e desmonte defeituoso. Tem-se grandes volumes de material em relação aos volumes usuais. Podem ocorrer erros na elaboração do plano de fogo e, como conseqüência danos acentuados ao maciço rochoso remanescente.

Quando a extração é feita na proximidade dos taludes finais, ou dos taludes que devem permanecer estáveis por longo tempo, o desmonte corriqueiro (com supervisão da engenharia) é substituído pelo desmonte cuidadoso (suave), e em alguns casos pelo desmonte mecânico, ou escavação.

O fator F<sub>4</sub> assume os seguintes valores:

Taludes naturais: + 15

Desmonte suave: + 8

Desmonte corriqueiro: 0 (zero)

Desmonte defeituoso: - 8

Escavação mecânica: 0 (zero)

Segundo Gripp (1992), o valor de F<sub>4</sub> = 0 para escavação mecânica é questionável, pois este é o mesmo valor atribuído ao desmonte à explosivo corriqueiro. Na prática

de engenharia, a escavação mecânica assegura melhores condições de estabilidade dos terrenos, que o desmonte a explosivo.

É importante destacar o fato de que a classificação não se refere às rupturas em cunha. Deve-se obter, nesses casos, o índice SMR para cada uma das famílias de descontinuidades. O menor valor do índice SMR, obtido para tais famílias, será adotado para o talude.

No caso de rochas alteradas obter-se-á dois índices distintos: um para a situação inicial de rocha sã, classificada na época da escavação, e outro para a situação futura, de rocha alterada.

### Classes de Estabilidade dos Taludes

Os fatores de ajuste para as descontinuidades e as diferentes classes de estabilidade, correspondentes a intervalos de 20 pontos no valor do índice SMR, são indicadas na tabela VIII, assim como a descrição dessas classes quanto ao tipo de estabilidade, os mecanismos de ruptura que podem ser observados e a qualidade do suporte necessário.

Vários métodos de estabilização podem ser empregados para os taludes, muitos deles sendo utilizados simultaneamente, quando se trata, por exemplo, de taludes onde o risco de ruptura é alto. É importante destacar que, normalmente, não é necessária nenhuma medida de estabilização, quando o índice SMR é maior do que 75.

Tabela VIII - Fatores de ajuste para as descontinuidades e as classes de estabilidade segundo o SMR (Romana, 1993).

| <b>Mecanismo de Ruptura</b> | <b>Situação</b>                       | <b>Muito Favorável</b> | <b>Favorável</b> | <b>Normal</b> | <b>Desfavorável</b> | <b>Muito Desfavorável</b> |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------|------------------|---------------|---------------------|---------------------------|
| Planar                      | $ \alpha_j - \alpha_s $               | $> 30^\circ$           | 30 a 20°         | 20 a 10°      | 10 a 5°             | $< 5^\circ$               |
| Tombamento                  | $ (\alpha_j - \alpha_s) - 180^\circ $ | $> 30^\circ$           | 30 a 20°         | 20 a 10°      | 10 a 5°             | $< 5^\circ$               |

|            |                     |        |            |          |              |         |
|------------|---------------------|--------|------------|----------|--------------|---------|
|            | $F_1$               | 0,15   | 0,40       | 0,70     | 0,85         | 1,00    |
| Planar     | $ \beta_j $         | < 20°  | 20 a 30°   | 30 a 35° | 35 a 45°     | > 45°   |
|            | $F_2$               | 0,15   | 0,40       | 0,70     | 0,85         | 1,00    |
| Tombamento |                     |        |            |          |              |         |
|            | $F_2$               | 1,00   | 1,00       | 1,00     | 1,00         | 1,00    |
| Planar     | $\beta_s - \beta_j$ | > 10°  | 10 a 0°    | 0°       | 0 para -10°) | < - 10° |
| Tombamento | $\beta_s + \beta_j$ | < 110° | 110 a 120° | > 120°   | -            | -       |
|            | $F_3$               | 0      | -6         | -25      | -50          | -60     |

$\alpha_s$  - rumo de mergulho do talude;

$\alpha_j$  - rumo de mergulho das descontinuidades;

$\beta_s$  - ângulo de mergulho do talude;

$\beta_j$  - ângulo de mergulho das descontinuidades.

| Classe N°           | V                   | IV                                 | III                                       | II                | I                  |
|---------------------|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------|--------------------|
| <b>SMR</b>          | 0-20                | 21-40                              | 41-60                                     | 61-80             | 81-100             |
| <b>Descrição</b>    | Muito ruim          | Ruim                               | Normal                                    | Bom               | Muito bom          |
| <b>Estabilidade</b> | Totalmente instável | Instável                           | Parcialmente estável                      | Estável           | Totalmente estável |
| <b>Rupturas</b>     | Grandes rupturas    | Descontinuidades ou grandes cunhas | Algumas descontinuidades ou muitas cunhas | Alguns blocos     | Nenhuma            |
| <b>Tratamento</b>   | Reescavação         | Correção                           | Suporte sistemático                       | Suporte ocasional | Nenhum             |

**Anexo II** : Resultados relativos à aplicação dos sistemas RMR, Q e SMR nas Minerações Itanorte, Rio Bravo e Água Santa

Tabela I – Resultados referentes à aplicação os sistemas de classificação de maciços rochosos na Mineração Itanorte.

| Talude | Rocha     | Feição      | RQD-A | RQD-B | RMR-A | RMR-B | SMR-A | SMR-B | Q-A  | Q-B  | JRC 100 | 1/tg (Jr/Já) | Âng. Atrito | Atrito RMR | Coesão (kPa) | Classe Q         | Classe RMR |
|--------|-----------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|---------|--------------|-------------|------------|--------------|------------------|------------|
| 1      | Itabirito | Xistosidade | 87,5  | 52,1  | 48,0  | 44,0  | 6,0   | 2,0   | 0,5  | 0,3  | 9,0     | 37-45        | 8-16        | 25-35      | 200-300      | Muito pobre      | III        |
| 1      |           | Fratura     | 87,5  | 52,1  | 51,0  | 47,0  | 51,0  | 47,0  | 0,5  | 0,3  | 9,0     | 37-45        | 8-16        | 25-35      | 200-300      | Muito pobre      | III        |
| 2      | Itabirito | Fratura 1   | 66,1  | 78,6  | 59,0  | 63,0  | 55,25 | 59,2  | 0,9  | 1,0  | 0,9     | 45           | 25-35       | 25-45      | 200-400      | Mto. pobre/pobre | III-II     |
| 2      |           | Fratura 2   | 66,1  | 78,6  | 57,0  | 61,0  | 33,0  | 37,0  | 0,9  | 1,0  | 0,9     | 45           | 25-35       | 25-45      | 200-400      | Mto. pobre/pobre | III-II     |
| 2      |           | Xistosidade | 66,1  | 78,6  | 44,0  | 48,0  | 0,65  | 4,6   | 0,9  | 1,0  | 0,9     | 45           | 25-35       | 25-35      | 200-300      | Mto. pobre/pobre | III        |
| 3      | Itabirito | Xistosidade | 97,3  | 72,0  | 51,0  | 44,0  | 32,9  | 25,9  | 19,5 | 14,4 | 9,0     | 56           | 25-30       | 25-35      | 200-300      | Bom              | III        |
| 3      |           | Fratura     | 97,3  | 72,0  | 76,0  | 69,0  | 72,2  | 65,2  | 19,5 | 14,4 | 9,0     | 56           | 25-30       | 35-45      | 300-400      | Bom              | II         |
| 4      | Itabirito | Xistosidade | 88,4  | 54,5  | 49,0  | 45,0  | 30,9  | 26,9  | 11,8 | 7,3  | -       | 63           | 25-30       | 25-35      | 200-300      | Bom/regular      | III        |
| 4      |           | Fratura     | 88,4  | 54,5  | 49,0  | 45,0  | 45,2  | 41,2  | 11,8 | 7,3  | 11,0    | 63           | 25-30       | 25-35      | 200-300      | Bom/regular      | III        |
| 5      | Itabirito | Xistosidade | 96,1  | 95,7  | 52,0  | 52,0  | 52,0  | 52,0  | 1,6  | 1,6  | 6,0     | 45           | 25-35       | 25-35      | 200-300      | Pobre            | III        |
| 5      |           | Fratura 1   | 96,1  | 95,7  | 57,0  | 57,0  | 57,0  | 57,0  | 1,2  | 1,2  | 6,0     | 37           | 25-30       | 25-35      | 200-300      | Pobre            | III        |
| 5      |           | Fratura 2   | 96,1  | 95,7  | 62,0  | 62,0  | 62,0  | 62,0  | 1,2  | 1,2  | 6,0     | 37           | 25-30       | 35-45      | 300-400      | Pobre            | II         |
| 6      | Itabirito | Xistosidade | 48,8  | 60,2  | 39,0  | 44,0  | 39,0  | 44,0  | 0,6  | 0,8  | 6,0     | 56           | 25-35       | 15-35      | 100-300      | Muito pobre      | IV-III     |
| 6      |           | Fratura     | 48,8  | 60,2  | 42,0  | 47,0  | 42,0  | 47,0  | 0,3  | 0,4  | 6,0     | 37           | 25-30       | 25-35      | 200-300      | Muito pobre      | III        |
| 7      | Hematita  | Xistosidade | 69,2  | 27,4  | 46,0  | 41,0  | 31,1  | 26,1  | 1,7  | 0,7  | 9,0     | 56           | 25-30       | 25-35      | 200-300      | Pobre/mto. Pobre | III        |
| 7      |           | Fratura     | 69,2  | 27,4  | 49,0  | 44,0  | 45,25 | 40,2  | 1,7  | 0,7  | 9,0     | 56           | 25-30       | 25-35      | 200-300      | Pobre/mto pobre  | III        |
| 8      | Itabirito | Xistosidade | 77,2  | 79,2  | 59,0  | 59,0  | 23,3  | 23,3  | 1,0  | 1,0  | 6,0     | 37           | 25-30       | 25-35      | 200-300      | Muito pobre      | III        |
| 8      |           | Fratura 1   | 77,2  | 79,2  | 62,0  | 62,0  | 58,2  | 58,2  | 1,0  | 1,0  | 6,0     | 37           | 25-30       | 35-45      | 300-400      | Muito pobre      | II         |
| 8      |           | Fratura 2   | 77,2  | 79,2  | 62,0  | 62,0  | 2,0   | 2,0   | 1,0  | 1,0  | 6,0     | 37           | 25-30       | 35-45      | 300-400      | Muito pobre      | II         |

Observação: Os resultados assinalados pela letra A foram calculados com RQD determinado através da abordagem de Palmstrom;  
Os resultados assinalados pela letra B foram calculados com RQD determinado através da abordagem de Priest & Hudson;

Tabela II – Resultados relativos à aplicação dos sistemas de classificação de maciços rochosos na Mineração Rio Bravo

| Talude | Rocha     | Feição      | RQD-A | RQD-B | RMR-A | RMR-B | SMR-A | SMR-B | Atrito-RMR | Coesão (kPa) | Classe RMR |
|--------|-----------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|--------------|------------|
| 1      | Itabirito | Fratura     | 91,6  | 60,2  | 65,0  | 58,0  | 13,0  | 6,0   | 25-45      | 200-400      | II – III   |
| 1      |           | Xistosidade | 91,6  | 60,2  | 52,0  | 45,0  | 10,0  | 3,0   | 25-35      | 200-300      | III        |
| 2      | Itabirito | Fratura     | 98,4  | 74,3  | 47,0  | 40,0  | -5,0  | -12,0 | 15-35      | 100-300      | III – IV   |
| 2      |           | Xistosidade | 98,4  | 74,3  | 54,0  | 47,0  | 2,0   | -5,0  | 25-35      | 200-300      | III        |
| 3 e 4  | Itabirito | Fratura     | 99,9  | 77,5  | 57,0  | 54,0  | 5,0   | 2,0   | 25-35      | 200-300      | III        |
| 3 e 4  |           | Xistosidade | 99,9  | 77,5  | 52,0  | 49,0  | 0,0   | -3,0  | 25-35      | 200-300      | III        |
|        |           |             |       |       |       |       |       |       |            |              |            |

Observação: Os resultados assinalados pela letra A foram calculados com RQD determinado através da abordagem de Palmstrom;  
Os resultados assinalados pela letra B foram calculados com RQD determinado através da abordagem de Priest & Hudson;

Tabela III – Resultados da aplicação dos sistemas RMR, SMR e Q, na Mina de Água Santa, Ibitiré, MG

**Sistema RMR:**

| Litologia      | Feição      | Dip Dir. | Dip | Espaçamento (cm) | RQD  | 1  | 2 | 3  | 4  | 5  | RMR       |
|----------------|-------------|----------|-----|------------------|------|----|---|----|----|----|-----------|
| Hematita dura  | Xistosidade | 130      | 72  | 43,3             | 95,9 | 20 | 4 | 20 | 16 | 15 | 76        |
| Hematita dura  | Fratura 1   | 25       | 36  | 33,0             | 95,9 | 20 | 4 | 20 | 16 | 15 | 76        |
| Hematita dura  | Fratura 2   | 246      | 49  | 17,8             | 95,9 | 20 | 4 | 10 | 16 | 15 | 66        |
| Hematita mole  | Xistosidade | 339      | 80  | 2,0              | 4,0  | 3  | 4 | 5  | 18 | 15 | <b>48</b> |
| Itabirito duro | Xistosidade | 339      | 71  | 18,9             | 89,2 | 18 | 5 | 10 | 20 | 15 | 68        |
| Itabirito duro | Fratura 1   | 151      | 85  | 17,1             | 89,2 | 18 | 5 | 10 | 20 | 15 | 68        |
| Itabirito duro | Fratura 2   | 37       | 38  | 17,8             | 89,2 | 18 | 5 | 10 | 20 | 15 | 68        |
| Itabirito mole | Xistosidade | 172      | 72  | 6,0              | 77,4 | 18 | 5 | 5  | 20 | 15 | 63        |
| Itabirito mole | Fratura 1   | 341      | 87  | 2,0              | 77,4 | 18 | 5 | 5  | 20 | 15 | 63        |
| Itabirito mole | Fratura 2   | 281      | 75  | 25,5             | 77,4 | 18 | 5 | 10 | 20 | 15 | 68        |

**Sistema Q:**

| Litologia      | Feição      | Dip Dir. | Dip | Espaçamento (cm) | RQD  | Ja | Jw | Jr  | Jn | S R F | Q           |
|----------------|-------------|----------|-----|------------------|------|----|----|-----|----|-------|-------------|
| Hematita dura  | Xistosidade | 130      | 72  | 43,3             | 95,9 | 3  | 1  | 1   | 12 | 1     | 2,67        |
| Hematita dura  | Fratura 1   | 25       | 36  | 33,0             | 95,9 | 3  | 1  | 1   | 12 | 1     | 2,67        |
| Hematita dura  | Fratura 2   | 246      | 49  | 17,8             | 95,9 | 3  | 1  | 1   | 12 | 1     | 2,67        |
| Hematita mole  | Xistosidade | 339      | 80  | 2,0              | 4,0  | 3  | 1  | 2   | 3  | 1     | <b>2,22</b> |
| Itabirito duro | Xistosidade | 339      | 71  | 18,9             | 89,2 | 3  | 1  | 1,5 | 12 | 1     | 3,72        |
| Itabirito duro | Fratura 1   | 151      | 85  | 17,1             | 89,2 | 3  | 1  | 1,5 | 12 | 1     | 3,72        |
| Itabirito duro | Fratura 2   | 37       | 38  | 17,8             | 89,2 | 3  | 1  | 1,5 | 12 | 1     | 3,72        |
| Itabirito mole | Xistosidade | 172      | 72  | 6,0              | 77,4 | 2  | 1  | 1,5 | 12 | 1     | 4,83        |
| Itabirito mole | Fratura 1   | 341      | 87  | 2,0              | 77,4 | 2  | 1  | 1,5 | 12 | 1     | 4,83        |
| Itabirito mole | Fratura 2   | 281      | 75  | 25,5             | 77,4 | 2  | 1  | 1,5 | 12 | 1     | 4,83        |

**Sistema SMR:**



| Litologia      | Feição      | Dip Dir. | Dip | Espaçamento (cm) | RMR       | F <sub>1</sub> | F <sub>2</sub> | F <sub>3</sub> | F <sub>4</sub> | SMR       |
|----------------|-------------|----------|-----|------------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------|
| Hematita dura  | Xistosidade | 130      | 72  | 43,3             | 76        | 0,15           | 1,00           | -6,0           | 0,00           | 75        |
| Hematita dura  | Fratura 1   | 25       | 36  | 33,0             | 76        | 0,15           | 0,85           | -60,0          | 0,00           | 68        |
| Hematita dura  | Fratura 2   | 246      | 49  | 17,8             | 66        | 0,40           | 1,00           | -60,0          | 0,00           | <b>42</b> |
| Hematita mole  | Xistosidade | 339      | 80  | 2,0              | <b>48</b> | 0,70           | 1,00           | -6,0           | 0,00           | <b>43</b> |
| Itabirito duro | Xistosidade | 339      | 71  | 18,9             | 68        | 0,85           | 1,00           | -6,0           | 0,00           | 63        |
| Itabirito duro | Fratura 1   | 151      | 85  | 17,1             | 68        | 0,15           | 1,00           | -6,0           | 0,00           | 67        |
| Itabirito duro | Fratura 2   | 37       | 38  | 17,8             | 68        | 0,15           | 0,85           | -60,0          | 0,00           | 60        |
| Itabirito mole | Xistosidade | 172      | 72  | 6,0              | 63        | 0,15           | 1,00           | -6,0           | 0,00           | 62        |
| Itabirito mole | Fratura 1   | 341      | 87  | 2,0              | 63        | 0,70           | 1,00           | 0,00           | 0,00           | 63        |
| Itabirito mole | Fratura 2   | 281      | 75  | 25,5             | 68        | 1,00           | 1,00           | -6,0           | 0,00           | 62        |

Observação: o levantamento geológico e coleta de dados para a aplicação dos sistemas foi feito no segundo semestre de 1995.

| <b>Tipo</b>                          | <b>Escala de Observação</b> | <b>Escala</b>                      | <b>Espaçamento</b>               |
|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Macro e micro fissuras               | 2,5cm                       | Corpo de prova                     | $s < 0,25\text{cm}$              |
| Superfícies de clivagem e acamamento | 60cm                        | Bloco de rocha observado "in situ" | $0,25\text{cm} < s < 5\text{cm}$ |
| Fraturas e diques                    | 6m                          | Escavação para exploração          | $5\text{cm} < s < 6\text{m}$     |
| Falhas menores e zonas fraturadas    | 60m                         | Escavação                          | $6\text{m} < s < 60\text{m}$     |
| Falhas regionais                     | 600m                        | Cadeias de montanhas               | $s > 60\text{m}$                 |