



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO MACIÇO ROCHOSO DA  
MINERAÇÃO CASA DE PEDRA, CONGONHAS-MINAS  
GERAIS.**

**Autor:** Júlio Rômulo Pessoa D'Alessandro

**Orientador:** Pérsio Leister de Almeida Barros

Campinas  
2007

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO MACIÇO ROCHOSO DA  
MINERAÇÃO CASA DE PEDRA, CONGONHAS-MINAS  
GERAIS.**

**Júlio Rômulo Pessoa D'Alessandro**

**Orientador:** Pécisio Leister de Almeida Barros

Dissertação apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração de Geotecnia

Campinas  
2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

D156a D'Alessandro, Júlio Rômulo Pessoa  
Análise de estabilidade do maciço rochoso da Mineração Casa de Pedra, Congonhas-Minas Gerais / Júlio Rômulo Pessoa D'Alessandro.--Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Pérsio Leister de Almeida Barros  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Mecânica de rochas - Classificação. 2. Resistência de materiais. 3. Cinemática. 4. Movimentos mecânicos. I. Barros, Pérsio Leister de Almeida. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Titulo em Inglês: Slope stability analysis of the Mineração Casa de Pedra, Congonhas – MG – Brasil rock mass  
Palavras-chave em Inglês: Rock mass classification, Shear strength, Kinematic analysis  
Área de concentração: Geotecnia  
Titulação: Mestre em Engenharia Civil  
Banca examinadora: Rodrigo Peluci de Figueiredo, Paulo José Rocha de Albuquerque  
Data da defesa: 24/01/2007  
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO MACIÇO ROCHOSO DA MINERAÇÃO CASA  
DE PEDRA, CONGONHAS-MINAS GERAIS**

**Júlio Rômulo Pessoa D'Alessandro**

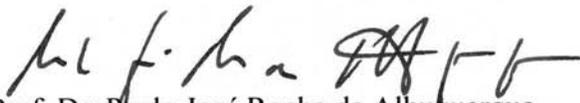
**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**



**Prof. Dr. Pécio Leister de Almeida Barros  
Presidente e Orientador/Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dr. Rodrigo Peluci de Figueiredo  
Universidade Federal de Ouro Preto**



**Prof. Dr. Paulo José Rocha de Albuquerque  
Universidade Estadual de Campinas**

Campinas, 24 de janeiro de 2007

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de estabilidade através da análise cinemática, para o maciço rochoso da Mineração Casa de Pedra em Congonhas, Minas Gerais, utilizando mapeamento na escala 1:4000. Os parâmetros de resistência e o caimento dos planos das descontinuidades principais foram levantados a partir de um mapeamento geológico-geotécnico detalhado. Foram coletados dados nas bancadas de todos os setores da mina a cada quatro metros. Os dados relativos aos pesos da classificação geomecânica de Bieniawski foram compilados em tabelas e posteriormente foram gerados mapas geotécnicos com o auxílio do software ArcView. A classificação geomecânica foi utilizada juntamente com a estimativa da compressão uniaxial de campo para a determinação da resistência do maciço rochoso com o auxílio do software RocLab da Rocscience. Na análise cinemática foram utilizados os ângulos de atrito das litologias predominantes em cada setor, definidas como campos homogêneos e foi realizada uma setorização das cavas em função das descontinuidades principais e da orientação da face do talude em relação a descontinuidade. Com os resultados obtidos pôde-se identificar os setores susceptíveis e aqueles não susceptíveis à ruptura.

Palavras-chave: classificação geomecânica, parâmetros de resistência, análise cinemática.

## **ABSTRACT**

This work presents the study of the rock mass stability at the Mineração Casa de Pedra , Minas Gerais, using kinematic analysis and maps in 1:4000 scale. The geological structures, the friction angle and cohesion of the rock mass were evaluated through a geological-geotechnical mapping technique. Data collected from each bench of the mine were related with the rock mass classification RMR and tables were compiled with them. Geotechnical maps were then plotted with the software ArcView. The rock mass classification along with the uniaxial compressive strength estimated in the field were used to determine the shear strength of the rock mass with the software RocLab by Rocscience. The friction angle in each zone, considered as homogeneous field, was used in the kinematic analysis and divisions were done in each mine pit as a function of the major feature and the wall orientation. With the results, the zones could be identified as susceptible or not susceptible to sliding.

Key-words: rock mass classification, shear strength parameters, kinematic analysis.

# SUMÁRIO

RESUMO .....	IV
ABSTRACT .....	V
CAPITULO 1.....	1
1 INTRODUÇÃO .....	1
CAPÍTULO 2.....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Classificação Geomecânica .....	5
2.1.1 Definição de termos geológicos.....	8
2.1.2 Classificação Geomecânica RMR .....	10
2.1.2.1 Procedimentos da Classificação.....	10
2.2 Parâmetros de Resistência de Descontinuidades e de Maciço Rochoso.....	16
2.2.1 Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb.....	19
2.2.2 Parâmetros de Resistência de Maciços Rochosos.....	21
2.2.2.1 Estimativa da Tensão de Compressão e Ângulo de Atrito de uma Junta.....	22
2.2.2.2 Resistência ao Cisalhamento de Maciço Rochoso.....	24
2.2.2.3 Uso do RocLab na Determinação da Resistência de Maciço Rochoso.....	31
2.3 Análise Cinemática de Taludes em Rochas.....	34
2.3.1 Definição de Termos Geométricos .....	36
2.3.2 Avaliação de Problemas Potências em Taludes.....	38
2.3.3 Técnicas Gráficas para Representação de Dados.....	45
2.3.3.1 Contorno de Densidades de Pólos .....	46
CAPITULO 3.....	49
3 ASPECTOS GERAIS DA ÁREA EM ESTUDO .....	49
3.1 Localização e acesso.....	49
3.2 Geologia .....	50
3.2.1 Geologia Estrutural.....	52
3.2.2 Geologia Local.....	56
3.2.2.1 Unidades Litológicas utilizadas na Mineração Casa de Pedra .....	58
3.3 Morfologia dos corpos de minério.....	60
CAPÍTULO 4.....	63
4 DESCRIÇÃO DO TRABALHO (MATERIAIS E MÉTODOS).....	63
4.1 Classificação Geomecânica .....	64
4.1.1 Dados existentes.....	65
4.1.2 Planejamento do Trabalho de Campo.....	66
4.1.3 Trabalho de campo.....	67
4.1.4 Mapas geológicos-geotécnicos.....	68
4.2 Parâmetro de Resistência do Maciço Rochoso .....	70
4.2.1 Determinação do parâmetro GSI.....	71

4.2.2	<i>Determinação da resistência a compressão uniaxial</i> .....	72
4.2.3	<i>Calculo dos parâmetros de resistência de maciço rochoso e definição dos campos homogêneos</i> .....	73
4.3	<b>Análise Cinemática</b> .....	76
4.3.1	<i>Mapeamento estrutural</i> .....	77
4.3.2	<i>Análise das populações de dados e tipos de estruturas</i> .....	78
4.3.3	<i>Setorização das cavas</i> .....	79
<b>CAPÍTULO 5</b> .....		<b>81</b>
<b>5</b>	<b>COLETA, PRODUÇÃO E ARMAZENAMENTO DOS DADOS</b> .....	<b>81</b>
5.1	Mapeamento Geotécnico .....	82
5.1.1	<i>Unidades Geológicas</i> .....	82
5.1.2	<i>Mapas Temáticos</i> .....	93
5.1.2.1	Resistência.....	94
5.1.2.2	RQD.....	95
5.1.2.3	Espaçamento das Descontinuidades.....	96
5.1.2.4	Condições das Descontinuidades.....	97
5.1.2.5	Presença de Água.....	98
5.1.2.6	Orientação das Descontinuidades.....	99
5.1.2.7	Classificação Geomecânica.....	100
5.2	Parâmetros de Resistência do Maciço.....	108
5.2.1	<i>Unidades Geológicas</i> .....	109
5.2.2	<i>Parâmetros de Resistência</i> .....	116
5.2.3	<i>Campos Homogêneos</i> .....	118
5.3	Análise Cinemática.....	120
5.3.1	<i>Zoneamento</i> .....	139
5.3.2	<i>Análise Cinemática</i> .....	142
<b>CAPÍTULO 6</b> .....		<b>153</b>
<b>6</b>	<b>DISCUSSÕES DOS DADOS COLETADOS E PRODUZIDOS</b> .....	<b>153</b>
6.1	Mapeamento Geotécnico .....	153
6.2	Parâmetros de Resistência do Maciço.....	155
6.3	Análise Cinemática.....	157
<b>CAPÍTULO 7</b> .....		<b>159</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>159</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....		<b>162</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb.....	20
FIGURA 2.2 – Tipos de rupturas determinadas no teste de <i>Ladanyi e Archambault</i> .....	25
FIGURA 2.3 – Parâmetros de entrada do RocLab.....	33
FIGURA 2.4 – Estimativa da qualidade do maciço GSI.....	34
FIGURA 2.5 - Quatro principais tipos de ruptura em taludes rochosos.....	39
FIGURA 2.6 - Casos de ruptura pelo teste de Markland.....	42
FIGURA 2.7 - Estereograma com densidade de polos.....	47
FIGURA 3.1 - Mapa de localização da Mina casa de Pedra e rodovias de acesso.....	50
FIGURA 3.2 - Mapa de localização e detalhe do Quadrilátero Ferrífero (extraído de ALKMIM e MARSHAK, 1998).....	52
FIGURA 4.1 - Ficha de campo usada no levantamento dos atributos do meio físico.....	68
FIGURA 4.2 - Tabela utilizada para geração do mapa de classificação do maciço RMR.....	69
FIGURA 4.3 – . Parâmetros necessários para o calculo da resistência de maciços rochosos utilizando o RocLab da Rocscience.....	71
FIGURA 4.4- Estimativa da resistência a compressão uniaxial utilizando o teste de campo.....	72
FIGURA 4.5 – .Fator de perturbação D sofrido pela escavação em maciços rochosos.....	74
FIGURA 4.6 – Dados dos parâmetros reduzidos de Morh-Coulomb obtidos pelo critério de Hoek-Brown.....	75
FIGURA 4.7 – Arquivo *.txt contendo na primeira coluna o azimute da direção do mergulho e na segunda coluna o mergulho do plano.....	78
FIGURA 4.8 – Projeção estereográfica das atitudes de acamamento da fase <b>E3</b> .....	79
FIGURA 5.1 – Mapa Geotécnico de Resistência.....	101
FIGURA 5.2 – Mapa Geotécnico de RQD.....	102
FIGURA 5.3 – Mapa Geotécnico de Espaçamento das Descontinuidades.....	103
FIGURA 5.4 – Mapa Geotécnico de Comdição das Descontinuidades.....	104
FIGURA 5.5 – Mapa Geotécnico de Pressão D'água.....	105
FIGURA 5.6 – Mapa Geotécnico de Orientaçãodas Descontinuidades.....	106
FIGURA 5.7 – Mapa Geotécnico de Classificação do Maciço.....	107
FIGURA 5.8 – Estereograma dos pontos polares da dobra D2 da fase E1.....	122
FIGURA 5.9 – Estereograma dos pontos polares da charneira fase E1.....	123
FIGURA 5.10 – Estereograma dos pontos polares do flanco da fase E1.....	123
FIGURA 5.11 – Estereograma dos pontos polares da dobra Kink da fase E3.....	125
FIGURA 5.12 – Estereograma dos pontos polares da zona transcorrente da fase E3.....	125
FIGURA 5.13 – Estereograma dos pontos polares da zona transpressiva da fase E3.....	126
FIGURA 5.14 – Estereograma dos pontos polares da interferência da fase E3 sobre a E1.....	127
FIGURA 5.15 – Estereograma dos pontos polares da Fratura família E11.....	129
FIGURA 5.16 – Estereograma dos pontos polares da Fratura família E31.....	129
FIGURA 5.17 – Estereograma dos pontos polares da foliação fase E1.....	130
FIGURA 5.18 – Estereograma dos pontos polares da foliação fase E3.....	131
FIGURA 5.19 – Estereograma dos pontos polares da Fratura família E12.....	134
FIGURA 5.20 – Estereograma dos pontos polares da Fratura família E13.....	134
FIGURA 5.21 – Estereograma dos pontos polares da Fratura família E32.....	135
FIGURA 5.22 – Estereograma dos pontos polares da Fratura família E33.....	135
FIGURA 5.23 – Análise cinemática do setor 1.....	143
FIGURA 5.24 – Análise cinemática do setor 2.....	144
FIGURA 5.25 – Análise cinemática do setor 3.....	145
FIGURA 5.26 – Análise cinemática do setor 4.....	146
FIGURA 5.27 – Análise cinemática do setor 5.....	147
FIGURA 5.28 – Análise cinemática do setor 6.....	148
FIGURA 5.29 – Análise cinemática do setor 7.....	149
FIGURA 5.30 – Análise cinemática do setor 8.....	150
FIGURA 5.31 – Análise cinemática do setor 9.....	151

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 A - Pesos dos parâmetros utilizados no RMR.....	12
TABELA 2.1 B – Influência da orientação e mergulho da descontinuidade.....	14
TABELA 2.1 C e D – Classificação do maciço e seu significado prático.....	15
TABELA 2.2 Estimativa de campo da resistência a compressão uniaxial.....	23
TABELA 2.3 Valores das constantes utilizadas no critério de <i>Hoek-Brown</i> , estimadas pela classificação de <i>Bieniawski</i> .....	30
TABELA 3.1 - Litologias de minério.....	59
TABELA 3.2 - Litologias de minério marginal.....	59
TABELA 3.3 - Litologias de estéril.....	60
TABELA 5.1 - Classificação RMR Geral.....	83
TABELA 5.2 - Valores dos Parâmetros Calculados pela Estimativa de Campo.....	110
TABELA 5.3 - Valores dos Parâmetros de resistência para cada Litologia.....	117

## **DEDICATÓRIA**

A meus pais, Ariel e Guiomar, pelo constante e incondicional apoio em todos os momentos de minha vida, pelo exemplo de determinação e honestidade.

## **AGRADECIMENTOS**

O autor gostaria de agradecer àquelas pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste trabalho, em especial:

Ao Professor Doutor Pécio L. A. Barros pelos ensinamentos passados, pelo companheirismo, e principalmente pelos desafios passados em suas difíceis avaliações.

Ao professor Rodrigo P. de Figueiredo (Escola de Minas UFOP) pelo ensino e profundo conhecimento da mecânica de rochas.

Aos colegas do mestrado, Daniel, Jean, Bia pela valiosa amizade criada durante o curso.

Aos amigos do laboratório de solos da UNICAMP.

A amiga Paula pelas dicas e informações nos trabalhos da secretaria da pós-graduação.

Aos Professores da Pós-graduação em Geotecnia, Paulo J. R. de Albuquerque e Cláudio Vidrih Ferreira pelos ensinamentos transmitidos.

Aos colegas e profissionais de geotecnia da Mineração Casa de Pedra, principalmente o geólogo Rafael Rodrigues que forneceu o mapa geológico base dessa dissertação, e aos colegas geotécnicos Renzo Guimarães e René Viel.

# CAPITULO 1

---

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização do minério de ferro como insumo essencial para a indústria moderna advém da revolução industrial e da idade do aço há aproximadamente 150 anos. Este continua sendo o minério mais utilizado e valorizado nos tempos atuais. No Brasil, até a década de noventa, o Quadrilátero Ferrífero foi a principal província geológica brasileira responsável pelas exportações desse minério, sendo hoje a segunda principal região exportadora, ficando atrás apenas da província de Carajás.

A crescente demanda do mercado mundial por essa matéria prima, impulsionada pelo crescimento da China, possibilitou o avanço tecnológico na atividade de mineração. Assim, cada vez mais se faz necessário um estudo detalhado do comportamento dos maciços rochosos, cujas minerações vêm operando em cavas mais profundas. Na década de 60 as mineradoras do Quadrilátero Ferrífero extraíam apenas minério de altos teores, o que limitava os taludes a cerca de 100 a 200 metros de altura. Atualmente com o avanço das técnicas de concentração e o alto valor do minério no mercado internacional os projetos e lavras em operação contemplam taludes de aproximadamente 500 metros de altura.

Neste contexto está inserida a Mineração Casa de Pedra, localizada no sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, no município de Congonhas – Minas Gerais, cuja produção anual de produtos beneficiados de minério de ferro é de 16 milhões de toneladas com uma movimentação total (minério mais estéril na mina) de 41 milhões de toneladas ao ano.

A Mineração Casa de Pedra opera uma lavra a céu aberto com movimentação mensal de 3.25 milhões de toneladas de material com relação estéril minério (REM) de 0,8. Assim, são alimentados na usina de beneficiamento 1.8 milhões de toneladas de minério por mês e 1.45 milhões de toneladas de estéril são dispostos em pilhas.

A estabilidade dos taludes em operação nas minerações de grande porte está diretamente relacionada à segurança da atividade e à produção da mina. A segurança é o fator principal na atividade de mineração que tem como foco a preservação do seu patrimônio e de seus funcionários em uma atividade considerada de risco. A correta execução de um talude conforme especificado em projeto permite a operação da mina com segurança e evita a parada de produção devido a situações de risco ou execução de retaludamento.

A análise de estabilidade dos taludes escavados nas minerações de ferro do Quadrilátero Ferrífero são realizadas em duas escalas distintas: na escala de bancada, onde as máquinas operam; e na escala global, que considera a altura máxima do talude. Na escala de bancada a análise é feita visualmente com o auxílio de planilhas de *check list*, onde são

anotadas as principais características do maciço e é feita uma análise crítica do potencial de ruptura e as devidas ações corretivas necessárias. Na escala global são feitas análises de estabilidade utilizando principalmente o método de Bishop, com determinação dos parâmetros de resistência, com base em dados conhecidos no Quadrilátero Ferrífero.

Dentro desse contexto, este trabalho tem como proposta um mapeamento geotécnico global, que indique o potencial de ruptura do maciço rochoso de Casa de Pedra.

Este trabalho apresenta como objetivo principal o estudo e aplicação de uma metodologia desenvolvida pelo autor, para a avaliação do potencial de risco de ruptura dos taludes da Mineração Casa de Pedra, bem como propor medidas preventivas em locais de risco iminente.

A metodologia proposta consiste em três etapas:

1ª etapa – Classificação geomecânica do maciço rochoso, utilizando-se de técnicas de amostragem;

2ª etapa – Determinação dos parâmetros de resistência do maciço rochoso, identificando zonas homogêneas;

3ª etapa – Análise cinemática do maciço rochoso a partir do zoneamento das cavas.

Nos capítulos seguintes, são apresentados as discussões referentes ao trabalho e ao uso das técnicas qualitativas e quantitativas conhecidas utilizadas na classificação geomecânica, na determinação de parâmetros, e na análise cinemática de maciços rochosos.

No capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica de temas relacionados à classificação geomecânica; determinação de parâmetros de resistência, e as técnicas de análise cinemática de maciços rochosos. No capítulo 3, apresentam-se os principais aspectos geográficos-geológicos da área em estudo. No capítulo 4, são apresentados os materiais e métodos utilizados no levantamento, produção e armazenamento dos dados levantados na etapa de campo. No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos nas etapas de produção e armazenamento de dados. No capítulo 6 apresentam-se as análises dos resultados obtidos no capítulo 5. No capítulo 7, estão resumidas as principais conclusões relativas aos dados obtidos e ao potencial de ruptura dos taludes da Mineração Casa de Pedra.

## **CAPÍTULO 2**

---

### **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo, são apresentados os principais conceitos e técnicas para a classificação geomecânica de maciços rochosos, determinação de parâmetros de resistência de maciços e, por fim, apresenta os conceitos de análise cinemática de taludes em rocha.

#### **2.1 Classificação Geomecânica**

Um dos fatores mais importantes na análise de estabilidade de um maciço rochoso é a resistência ao cisalhamento da superfície potencial de ruptura que pode consistir de um plano de descontinuidade simples ou de um modelo complexo com várias descontinuidades envolvendo algumas fraturas em material intacto.

É consenso na comunidade científica que a determinação da resistência ao cisalhamento é o processo mais crítico para um projetista de taludes, porque mudanças relativamente pequenas na resistência podem causar mudanças significativas na segurança de um talude. HOEK e BRAY (1981) enfatizam que a resistência ao cisalhamento do maciço depende de outros fatores como o conhecimento do mecanismo básico de ruptura, a influência da rugosidade, o preenchimento das descontinuidades etc.

Na década de 40, TERZAGHI (1946) propôs um primeiro método de classificação de maciço rochoso, que através de características específicas agrupavam rochas semelhantes. A classificação de maciços rochosos é uma técnica na qual objetos são organizados em grupos com base na relação e semelhança. As características principais que identificam o objeto como parte de uma mesma classe são identificadas e elas são estabelecidas por prioridade de classificação. As classificações se tornaram desde então uma ferramenta que auxilia no entendimento do mecanismo básico de ruptura e a influência de descontinuidades que reduzem a resistência do maciço.

O primeiro sistema de classificação prático introduzido na geotecnia foi o método de classificação de carregamento de rocha (Rock Load) desenvolvido por TERZAGHI (1946) e seu uso foi predominante nos Estados Unidos por 35 anos.

DEERE (1964) desenvolveu o índice de designação de qualidade da rocha (RQD), quando as informações qualitativas das rochas eram usualmente avaliadas apenas pelos geólogos. O RQD fornece uma medida do fraturamento do maciço rochoso em profundidade, através dos testemunhos de furo de sonda. Apesar dele ser um índice simples e econômico, sozinho ele não é suficiente para gerar uma descrição adequada do maciço rochoso, porque ele desconsidera a orientação da junta, sua abertura, e o seu preenchimento.

WICKHAM et al. (1972) desenvolveram o conceito RSR (razão de estrutura da rocha), um modelo que prediz o suporte do subsolo. O

conceito é expresso num método quantitativo para descrever a qualidade de um maciço rochoso. Ele foi o primeiro sistema de classificação de maciço rochoso completo desde o introduzido por TERZAGHI (1946).

BIENIAWSKI (1973) desenvolveu um sistema de classificação conhecido como Classificação Geomecânica (RMR, Classificação do Maciço Rochoso), mundialmente utilizado. Esse sistema utiliza seis fatores que influenciam na resistência do maciço e o somatório dos fatores varia de 0 a 100 que, agrupados em cinco classes, fornecem um ângulo de atrito e uma coesão.

BARTON et al. (1974) desenvolveram o sistema de classificação de maciço rochoso Q (Sistema-Q). Segundo BIENIAWSKI (1989) essa classificação representa a principal contribuição no que diz respeito a classificação de maciço devido a várias razões. O sistema foi proposto com base na análise de 212 casos históricos de comportamentos de túneis na Escandinávia. É um sistema de classificação quantitativo voltado para o projeto de túneis na engenharia.

Vários outros autores propuseram adaptações ao RMR para casos específicos. D'Alessandro (2006), identificou a necessidade da adaptação da classificação RMR para maciços de itabiritos muito alterados.

### 2.1.1 *Definição de termos geológicos*

Existem vários tipos de descontinuidades de origem geológica em maciços rochosos, que exercem influência na estabilidade de taludes. Os principais termos são material rochoso, maciço rochoso, rocha alterada, descontinuidade, descontinuidades principais, conjunto de descontinuidades, continuidade e *gouge*. HOEK e BRAY (1981) apresentaram uma série de termos que eles consideraram como os principais:

- **Material rochoso:** também conhecido como rocha intacta, refere-se ao material consolidado e cimentado, constituído por partículas de minerais que formam os blocos intactos entre as descontinuidades do maciço rochoso. Na maioria das rochas sãs, como as ígneas e as metamórficas, a resistência da rocha intacta é uma ou duas ordens de magnitude maior do que a do maciço rochoso;
- **Maciço rochoso:** é a rocha *in situ* que apresenta várias descontinuidades devido a sistemas de feições estruturais como juntas, falhas e planos de acamamento. Escorregamentos em maciços rochosos estão geralmente associados com o movimento nessas superfícies de descontinuidade;
- **Rocha danificada:** refere-se ao maciço rochoso que foi perturbado por algum agente intempérico, químico ou mecânico,

de tal maneira que a composição química original da rocha *in situ* é destruída;

- **Descontinuidade:** também conhecida como plano de fraqueza, são aquelas feições estruturais que separam blocos de rocha intacta dentro de um maciço rochoso. Muitos engenheiros descrevem o conjunto dessas feições como juntas. O termo descontinuidade é usado geralmente para definir o plano de fraqueza no qual o movimento pode ocorrer;
- **Descontinuidade principal:** são feições estruturais planares e contínuas, como falhas; que têm resistência muito baixa quando comparadas com outras descontinuidades do maciço rochoso. Elas dominam o comportamento de um talude em particular;
- **Família de descontinuidades:** refere-se ao sistema de descontinuidades que tem aproximadamente a mesma inclinação e orientação. PRICE (1966) associou a geração dos conjuntos de descontinuidades como o resultado de um mesmo processo de formação geológica;
- **Continuidade:** enquando uma estrutura principal como uma falha tem extensão de quilômetros, descontinuidades menores como juntas podem ser muito limitadas na sua extensão. Se a ruptura ocorre no sistema onde a descontinuidade termina dentro do maciço rochoso esta envolve ruptura da rocha intacta entre essas descontinuidades;

- **Gouge:** também conhecida como preenchimento, é o material entre duas faces de uma descontinuidade estrutural como uma falha. Se a espessura do material de preenchimento é tal que a superfície das descontinuidades não entram em contato, a resistência ao cisalhamento será igual a resistência do material de preenchimento;

### **2.1.2      *Classificação Geomecânica RMR***

O Sistema de Classificação de Maciço Rochoso (RMR), também conhecido como Classificação Geomecânica, foi desenvolvido por BIENIAWSKI (1973). Nos últimos 32 anos, o sistema RMR resistiu ao tempo e beneficiou muitos autores que aplicaram o método em todo o mundo. Sua aplicação variada acumula pelo menos 351 casos históricos documentados envolvendo túneis, minas, taludes e fundações.

Vários autores propuseram uma serie de extensões da classificação RMR, com aplicação na mineração LAUBSCHER (1977, 1984), minas de rochas sã KENDORSKI et al. (1983); mineração de carvão UNAL (1983), fundações de barragem SERAFIM e PEREIRA (1983); túneis GONZALEZ de VALLEJO (1983) e estabilidade de taludes ROMANA (1985).

#### **2.1.2.1      *Procedimentos da Classificação***

Cinco parâmetros são usados para classificar um maciço rochoso usando o sistema RMR (Classificação Geomecânica).

- Resistência à compressão uniaxial do material rochoso.
- Designação de qualidade da rocha (RQD).
- Espaçamento das descontinuidades.
- Condição das descontinuidades.
- Condição de água no maciço.

Na aplicação da Classificação Geomecânica, o maciço rochoso é dividido em um número de regiões estruturais de tal maneira que certas feições são mais ou menos uniformes em cada região. Embora o maciço rochoso seja naturalmente descontínuo, ele pode contudo ser uniforme em regiões quando, por exemplo, o tipo de rocha ou de descontinuidade é a mesma ao longo da região. Em muitos casos o contorno da região estrutural coincide com uma feição geológica maior, como uma falha, diques e zonas de cisalhamento. Após a identificação das regiões estruturais, os parâmetros de classificação para cada região são determinados no campo.

A Classificação Geomecânica considera cinco pesos para os cinco parâmetros, conforme Tabela 2.1A.

TABELA 2.1A: Pesos dos parâmetros utilizados no RMR (extraído de Bieniawski, 1989).

Parâmetro		Variação							
1	Resistência	Índice de Carregamento Pontual	>10	4-10	2-4	1-2	Para valores baixos, usar compressão uniaxial		
		Compressão Uniaxial	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
Peso			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
Peso			20	17	13	8	3		
3	Espaçamento Descontinuidade		>2m	0,6-2m	200-600mm	60-200mm	<60mm		
Peso			20	15	10	8	5		
4	Condição da Descontinuidade		Superfície muito rugosa	Superfície separação < 1mm	Superfície <1 mm muito alterada	Superfície estriada	Preenchimento >5mm		
Peso			30	25	20	10	0		
5	Água subterrânea	Infiltração túnel 10 m	nenhuma	<10	10-25	25-125	>125		
		Razão pressão junta/tensão principal maior	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		Condições Gerais	Completamente seco	Úmido	Molhado	Pingando	Fluindo		
Peso			15	10	7	4	0		

Na Tabela 2.1A, os cinco parâmetros são agrupados em cinco variações de valores. Quando um maciço tem várias descontinuidades e nenhuma delas é significativa para gerar algum processo de ruptura, os valores dos pesos são estimados para as diferentes descontinuidades, e a classificação mais alta indica a melhor condição do maciço rochoso. O peso é assinalado para cada descontinuidade conforme a Tabela 2.1A. Dessa forma, a condição típica é avaliada para cada conjunto de descontinuidade e o valor dos pesos das varias descontinuidades é interpolado, usando as Tabelas 2.1 de A – D.

Após os pesos da classificação dos parâmetros ser estabelecida, para as cinco classes listadas na Tabela 2.1A, eles são somados para determinar o RMR básico para a região estrutural considerada.

O sexto passo é incluir o sexto parâmetro, chamado de influência da orientação e mergulho da descontinuidade que é usado para ajustar a classificação RMR básica de acordo com a Tabela 2.1B. Esse passo é tratado separadamente pois a influência da orientação da descontinuidade depende da aplicação específica, como em túneis, taludes, ou fundações. Como pode-se notar, o valor do parâmetro de orientação da descontinuidade não é dado em termos quantitativos, mas sim por descrição qualitativa. WICKHAM et al. (1972), criaram referências, para ajudar na melhor decisão de quando a orientação da descontinuidade é favorável ou não em túneis. ROMANA (1985) e BIENIAWSKI (1978),

fizeram estudos para auxiliar a determinação dos valores em taludes e fundações.

TABELA 2.1B: Influência da orientação e mergulho da descontinuidade

Orientação e mergulho da descontinuidade		Muito favorável	Favorável	Regular	Desfavorável	Muito Desfavorável
6 Pesos	Túneis e mina	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60
Valores		100-81	80-61	60-41	40-21	<20

O parâmetro orientação da descontinuidade reflete no significado dos vários conjuntos de descontinuidades presentes no maciço rochoso. O conjunto principal, usualmente conhecido como conjunto número 1, controla a estabilidade de uma escavação. Por exemplo, em túneis o conjunto 1 será o aquele em que a direção é paralela ao eixo do túnel. Nas situações onde um conjunto de descontinuidades não é dominante e de importância crítica, ou quando estimamos a resistência do maciço rochoso e a deformabilidade, a classificação para cada conjunto de descontinuidades é determinada pela pontuação apropriada dos parâmetros individuais.

No caso de projetos de engenharia civil, um ajuste para a orientação da descontinuidade geralmente é suficiente. Para a aplicação em mineração, outros ajustes podem ser necessários, como a mudança das tensões com a profundidade. Esse assunto foi discutido por LAUBSCHER (1977) e por KENDORSKI et al. (1983).

Após o ajuste para a orientação da descontinuidade, o maciço rochoso é classificado de acordo com a Tabela 2.1C, que agrupa o ajuste final RMR em cinco classes de maciço rochoso, a variação total das possíveis somas dos pesos varia de 0 a 100.

A Tabela 2.1C fornece um significado prático da classe do maciço rochoso pela relação delas com parâmetros de resistência específicos.

TABELA 2.1C: Classificação do maciço e seu significado prático.

Valores	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Nº Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Rocha muito boa	Rocha boa	Rocha regular	Rocha pobre	Rocha muito pobre
Coesão	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito	>45	35-45	25-35	15-25	<15

Quando várias condições de qualidade de maciço rochoso são encontradas em uma face de material escavado é essencial identificar a condição mais crítica para determinar o tipo de extrato rochoso. Isso significa que a feição geológica mais importante para a estabilidade terá sua influência sobreposta às outras. Por exemplo, uma falha ou cisalhamento em um maciço de alta qualidade será em regra dominante no processo de estabilidade, em relação ao material de alta resistência no substrato vizinho.

## **2.2 Parâmetros de Resistência de Descontinuidades e de Maciço Rochoso.**

Métodos de quantificação de resistência ao cisalhamento de maciços rochosos foram desenvolvidos por vários autores. Na maioria dos métodos as equações levam em conta a resistência do maciço intacto (sem descontinuidade) para calcular a resistência das principais feições do maciço, levando em consideração os fatores que influenciam no equilíbrio limite do talude.

BARTON (1973), demonstrou que a resistência ao cisalhamento das descontinuidades com rugosidade  $i$  está relacionada a ação da tensão normal ao plano da superfície. Somente para tensões normais muito baixas a rugosidade de segunda ordem é responsável pelo mecanismo de ruptura. Baseado em observações de testes realizados em rugas produzidas artificialmente para estudar o comportamento de um material, BARTON (1973) derivou uma equação empírica em função de um coeficiente de rugosidade de junta (JRC).

LADANYI e ARCHAMBAULT (1972, 1970), estudaram teoricamente e experimentalmente a transição da dilatação para o cisalhamento. Eles propuseram uma equação para a tensão cisalhante de pico que depende da taxa de dilatação e da resistência ao cisalhamento do material intacto.

GOODMAN (1970) *apud* HOEK e BRAY (1981), demonstrou a importância do preenchimento da junta em uma série de testes, no qual

juntas foram preenchidas artificialmente com pó de mineral micáceo. A resistência ao cisalhamento diminuiu a medida que se aumentou o preenchimento. Uma vez que a espessura do preenchimento excedeu a amplitude da projeção da superfície, a resistência da junta passou a ser controlada pela resistência do material de preenchimento.

LADANYI e ARCHAMBAULT (1972) propuseram uma relação que prediz a resistência ao cisalhamento de um maciço rochoso muito fraturado. Eles estudaram um grande número de modelos usando pequenos blocos de concreto que foram submetidos a um sistema de tensão biaxial. No teste ocorreram três tipos distintos de ruptura: cisalhamento ao longo de um plano bem definido envolvendo o material intacto; formação de uma zona de cisalhamento na qual ocorreram rotação, deslizamento e ruptura de blocos; e formação de kink band de rotação e separação de colunas.

Reconhecendo o problema da definição adequada da geometria e das propriedades dos materiais, requeridas na solução de LADANYI e ARCHAMBAULT (1972), HOEK e BROWN (1980), propuseram um critério de ruptura empírico, muito simples, para maciços rochosos muito fraturado. Na fórmula empírica existem quatro constantes, que são determinadas através da regressão linear de resultados de ensaio de compressão triaxial em material rochoso. Caso não se utilize dados de ensaio HOEK e BROWN (1980) propuseram a utilização da classificação de BARTON et al. (1974) e BIENIAWSKI (1973).

HOEK (1983), apresentou uma solução teórica desenvolvida por BRAY (op. cit.) que relaciona o critério de ruptura de Hoek-Brown, com os parâmetros  $c$  e  $\phi$ . Praticamente todos os *softwares* de solos e rochas são escritos em termos do critério de Mohr-Coulomb e é necessário definir a relação entre  $m$  e  $s$  (constantes de Hoek-Brown), e  $c$  e  $\phi$  para permitir o uso do critério nos programas.

Em 1988, o critério de Hoek-Brown estava sendo largamente utilizado em uma variedade de problemas da engenharia, incluindo estabilidade de taludes. Até aquele momento o critério, que havia sido desenvolvido originalmente para escavações de subsolo com material confinado, era reconhecidamente otimista para taludes próximos a superfície. HOEK e BROWN (1988) introduziram o conceito maciço *undisturbed* e *disturbed* para reduzir as propriedades do material próximo à superfície. Eles também definiram um método de usar a classificação de BIENIAWSKI (1973) para estimar os parâmetros  $m$  e  $s$ .

HOEK, WOOD e SHAH (1992) desenvolveram um novo critério que contém um parâmetro  $a$  que expressa um meio para modificar a curvatura da envoltória de ruptura, particularmente em estados de tensões normais muito baixos. Esse critério reduziu o efeito de otimismo do critério de Hoek-Brown quando utilizado em materiais muito decompostos.

HOEK et al. (1995) propuseram um critério generalizado que incorporava ambos os critérios original e modificado utilizando o Índice de Resistência Geológica (GSI) ao invés da classificação RMR. Portanto o

critério original é adotado para maciços rochosos com boa qualidade, e para maciços com qualidade pobre ou muito pobre utiliza-se à resistência a tração zero através do critério modificado (HOEK, WOOD e SHAH, 1992).

HOEK et al. (2002) desenvolveram um método analítico para calcular a coesão e o ângulo de atrito e apresentaram um limite apropriado de tensão para túneis e taludes. Um critério de dano para maciço rochoso desmontado foi introduzido para medir a redução da resistência do maciço devido ao relaxamento e desmonte em problemas de taludes e fundações.

### **2.2.1 *Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb***

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb é o mais conhecido e mais simples critério de ruptura, e consiste de uma envoltória linear, tangenciando o círculo de Mohr, que representa as condições críticas de combinações dos esforços principais. A Figura 2.2 mostra o critério de Mohr-Coulomb.

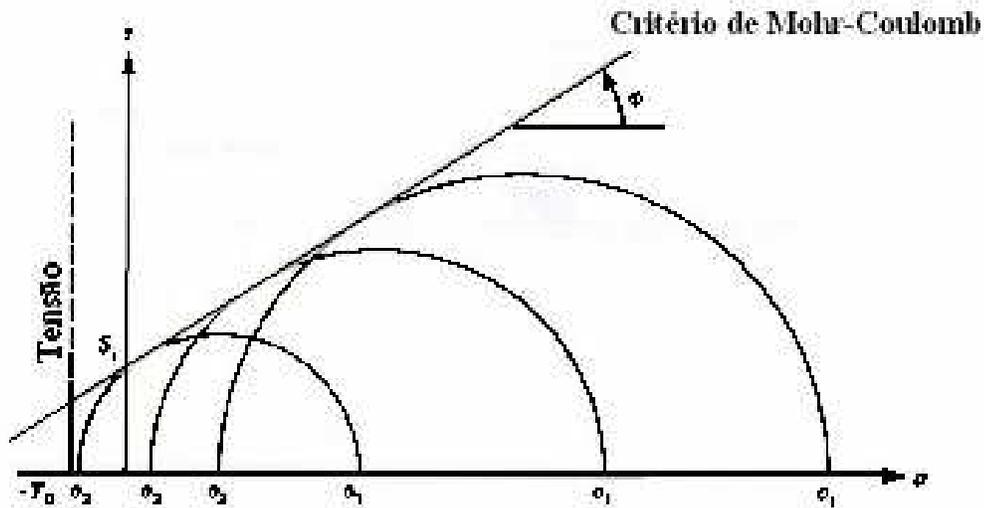


FIGURA2.1: Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb. (extraído de GOODMAN, 1989).

A equação dessa reta é dada por:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (1)$$

Onde  $\tau$  representa o pico de tensão cisalhante ou o pico de resistência ao cisalhamento,  $\phi$  o ângulo de atrito interno ou ângulo de atrito entre duas superfícies,  $c$  a coesão e  $\sigma$  a componente da tensão que atua perpendicularmente ao plano de ruptura.

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb é também usado para representar a resistência residual, isto é, a resistência mínima oferecida pelo material após o pico de deformação. Neste caso, o subscrito “r” pode ser usado em cada um dos termos da equação para identificá-los com parâmetros do cisalhamento residual. A coesão  $c_r$  pode aproximar-se de

zero, enquanto o ângulo de atrito interno residual  $\phi_r$  poderá variar entre zero e o ângulo  $\phi$ .

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb tem sido utilizado na determinação da resistência do maciço intacto (sem descontinuidade), utilizado na maioria das equações para calcular a resistência dos maciços rochosos.

### **2.2.2 Parâmetros de Resistência de Maciços Rochosos**

A escolha dos parâmetros de resistência adequados para usar em projetos de escavação em maciços rochosos depende principalmente do entendimento do mecanismo básico de ruptura e da influência dos vários fatores que podem alterar as características da resistência do maciço rochoso.

Na análise de estabilidade e em projetos de taludes em rochas é necessária alguma forma de ensaio para obtenção dos valores de resistência cisalhante. Os parâmetros de resistência dos maciços ou das descontinuidades podem ser obtidos através de ensaios *in situ* nos quais todas as características do comportamento *in situ* da descontinuidade rochosa são reproduzidas tão precisamente quanto possível, ou através de ensaios de laboratórios na forma de ensaios sofisticados.

Esses parâmetros de resistência são necessários para o cálculo da resistência dos maciços rochosos utilizados na equação de LADANY e ARCHAMBAULT (1972) e na equação de HOEK e BROWN (1980).

#### ***2.2.2.1 Estimativa da Tensão de Compressão e Ângulo de Atrito de uma Junta***

Na determinação da resistência ao cisalhamento de um maciço rochoso, no ensaio de campo (*in situ*) é necessária uma determinação simples ou mesmo a estimativa da tensão compressiva na junta  $\sigma_j$ , o ângulo de rugosidade  $i$  e o ângulo de atrito básico  $\phi$  para usar na equação de BARTON (1973) ou de LADANY e ARCHAMBAULT (1972). A escolha do método mais apropriado depende da natureza do problema a ser investigado, da facilidade da utilização do ensaio e da quantidade de tempo e dinheiro que pode ser utilizada na solução do problema. Cálculos de estabilidade preliminares feitos durante estudos de viabilidade em uma mina a céu aberto são geralmente restritos em termos de acesso para o maciço rochoso e também tempo e dinheiro para o estudo. Portanto testes elaborados e caros não são justificados. Sob essas condições, estimativas da resistência cisalhante com base na equação proposta por BARTON (1973) ou de LADANY e ARCHAMBAULT (1972) normalmente tem sido usadas, quando não é possível conduzir alguma forma de ensaio de cisalhamento.

Quando o projetista se encontra em uma situação em que não tem facilidade para realizar os ensaios e nem mesmo estimativas como o teste Índice de Carregamento Pontual, ele deve recorrer ao método de estimação da resistência à compressão uniaxial avaliada em campo. Um conjunto de guias foi tabulado abaixo, baseado em artigos de DEERE e MILLER (1966), PITEAU (1971), ROBERTSON (1971) e alguns consultores experientes. A Tabela 2.2 mostra a classificação pela estimativa de campo.

TABELA 2.2: Estimativa de campo da resistência a compressão uniaxial.

Descrição (I.S.R.M.)	Resistência a compressão simples (MPa)	I.S. (MPa)	Identificação de campo	Consistência equivalente	Fator A1
(R6) extremamente resistente	>250	>10	Lascada com vários golpes de martelo	C1	15
(R5) muito resistente	100-250	4-10	Muitos golpes de martelo fratura	C1/C2	12
(R4) resistente	50-100	2-4	Um golpe de martelo fratura amostra de mão	C2	7
(R3) medianamente resistente	25-50	1-2	Golpe firme martelo faz sulco 5mm, canivete raspa a superfície	C3	4
(R2) branda	5-25	*	Canivete corta a amostra mas não molda	C3/C4	2
(R1) muito branda	1-5	*	Esmigalha-se com impacto ponta do martelo, raspada por canivete	C4/C5	1
(R0) extremamente branda	0,25-1	*	Marcada pela unha	C6	0

#### **2.2.2.2 Resistência ao Cisalhamento de Maciço Rochoso**

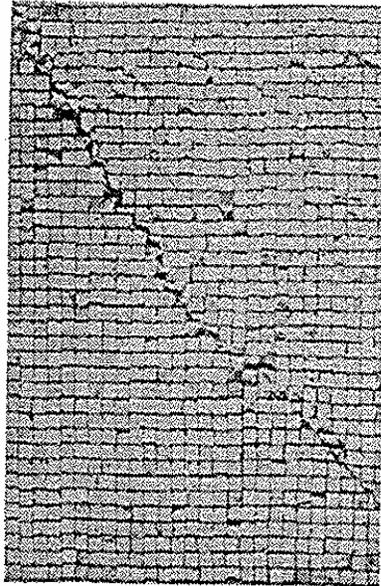
Quando um maciço rochoso contém um conjunto de juntas e quando o espaçamento das juntas é muito próximo em relação ao tamanho do talude a ser considerado, o comportamento do maciço rochoso deve se diferenciar significativamente daquelas superfícies simples de descontinuidades. O estado solto do maciço rochoso, resultado do espaçamento pequeno entre as juntas, permite que blocos individuais dentro do maciço rochoso sofram translação e rotação para um patamar longe do que pode ocorrer em uma rocha mais intacta e isso ocasiona uma redução geral da resistência.

A determinação da resistência ao cisalhamento de maciços rochosos com juntas seladas tem sido reconhecida como um importante problema da engenharia e inúmeros artigos foram publicados nesse tema. Pesquisas de relações de proximidade também foram consideradas nas características de resistência ao cisalhamento de rochas preenchidas e muitas similaridades podem ser encontradas entre os resultados do trabalho de LADANYI e ARCHAMBAULT (1970) e aqueles em rochas com juntas apertadas. Não seria prático tentar uma revisão detalhada de todo esse trabalho nessa revisão bibliográfica e as discussões que se seguem devem se limitar às relações propostas por LADANYI e ARCHAMBAULT (1970, 1972), e a equação empírica publicada por HOEK e BROWN (1980), HOEK (1980) e HOEK et al. (2002).

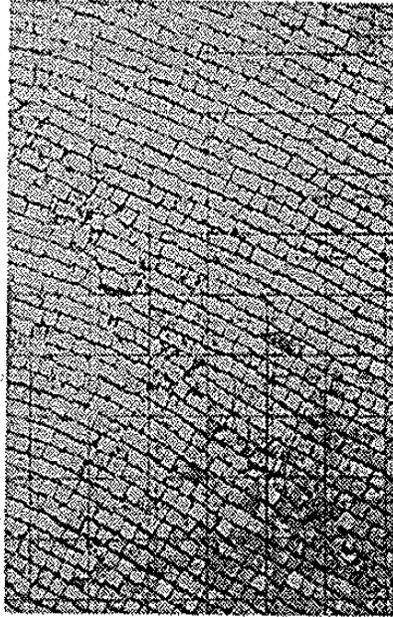
LADANYI e ARCHAMBAULT (1972) fizeram um grande número de estudos de modelos usando pequenos blocos comerciais de concretos

comprimidos. Cada modelo contém 1800 blocos medindo  $12,7\text{mm} \times 12,7\text{mm} \times 63,5\text{mm}$ , empacotados próximos e apertados para formar um espesso modelo de laje. Um carregamento biaxial foi aplicado no plano do modelo de laje, cuja direção de carregamento foi variada em relação a orientação da junta.

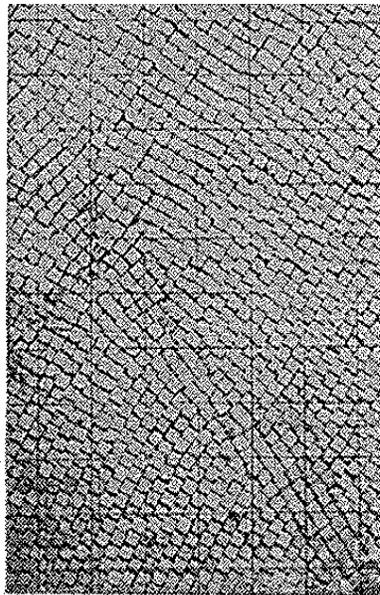
Três distintos tipos de ruptura ocorreram e eles estão ilustrados nas fotografias reproduzidas na Figura 2.2 abaixo.



Plano cisalhamento



Zona cisalhamento



Kink Band

FIGURA2.2: Tipos de rupturas determinadas no teste de *Ladanyi e Archambault*. (extraído de HOEK e BRAY, 1981).

**Caso 1** – cisalhamento ao longo de um plano bem definido inclinado em relação a ambos os conjuntos de descontinuidades.

**Caso 2** – formação de uma estreita zona de ruptura na qual a rotação de blocos ocorreu em adição ao deslizamento e à ruptura do material do caso 1.

**Caso 3** – formação de uma kink band de rotação e separação de colunas de 3, 4 ou 5 blocos.

Com base no estudo desses modelos, LADANYI e ARCHAMBAULT (1972) propuseram formas de modificação das equações que haviam proposto em 1970, para prever a resistência ao cisalhamento de maciços rochosos com juntas imbricadas.

Enquanto a aproximação de LADANYI e ARCHAMBAULT (1972) é interessante porque envolve uma consideração da mecânica do movimento dos blocos e ruptura dentro de um maciço rochoso, ela é de difícil aplicação na prática devido à necessidade da escolha dos vários parâmetros que são requeridos para resolver a equação. Na verdade, uma série de considerações devem ser assumidas para muitos desses parâmetros para se chegar a uma solução.

Reconhecendo o problema da adequada definição da geometria e dos parâmetros dos materiais, requeridos em um mecanismo apropriado como aquele adotado por LADANYI e ARCHAMBAULT (1972), HOEK e

BROWN (1980) propuseram um critério de ruptura empírico muito simples para maciços rochosos com juntas imbricadas.

A equação básica empírica, que relaciona a tensão de ruptura axial  $\sigma_1$  com a pressão de confinamento  $\sigma_3$ , em um teste triaxial, é:

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

onde

$\sigma_c$  é a resistência a compressão uniaxial da rocha intacta;

$m$  e  $s$  são constantes adimensionais que dependem da forma e do grau de imbricamento das peças individuais de rocha dentro do maciço rochoso. (Tabela 2.3).

Como uma alternativa, a resistência ao cisalhamento  $\tau$  pode ser relacionada à tensão normal  $\sigma$  pela equação que se segue

$$\tau = A\sigma_c \left( \frac{\sigma}{\sigma_c} - T \right)^B \quad (3)$$

onde  $A$  e  $B$  são constantes definindo a forma da envoltória de Mohr e

$$T = \frac{1}{2} \left( m - \sqrt{m^2 + 4s} \right) \quad (4)$$

HOEK e BRAY (1981) assumiram que a lei de tensão efetiva aplica-se para esse critério de ruptura. A tensão efetiva pode ser substituída diretamente nas equações (2) e (3) quando a poropressão  $u$  é conhecida.

Uma análise de regressão para determinar as constantes  $m$ ,  $s$ ,  $A$  e  $B$  de resultados de ensaios triaxiais em laboratório, sobre rochas com juntas de pequeno espaçamento é necessária para a determinação dos parâmetros.

Quando dados de ensaio de laboratório não são utilizáveis ou quando eles são requeridos para estimar a resistência de uma maciço muito grande, HOEK e BRAY (1981) indicam que a classificação geomecânica de BARTON et al. (1974) e BIENIAWSKI (1974) fosse usadas na escolha de valores de constantes  $m$ ,  $s$ ,  $A$  e  $B$ . Uma vasta discussão desse assunto é relatada no livro texto de HOEK e BRAY (1981) e eles propuseram relações entre tipo de rocha e qualidade do maciço rochoso. O valor das constantes estão resumidos na Tabela 2.3.

TABELA 2.3: Valores das constantes utilizadas no critério de *Hoek-Brown*, estimadas pela classificação de *Bieniawski* (extraído de HOEK e BRAY, 1981).

Tabela IV - Relação aproximada entre qualidade do maciço rochoso e constantes empíricas					
<p>Critério de ruptura empírico</p> $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2}$ $\tau = A\sigma_c\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_c} - T\right)B$ <p>onde <math>T = \frac{1}{2}(m - \sqrt{m^2 + 4s})</math></p>	<p>Rochas carbonáticas com clivagem bem desenvolvida</p> <p>Dolomito, Calcário e Marmores</p>	<p>Rochas argilosas litificadas</p> <p>Siltito, Argilito e Folhelho (clivagem normal)</p>	<p>Rochas arenosas com cristais resistentes e clivagem mal desenvolvida</p> <p>Arenito e Quartzito</p>	<p>Rochas ígneas cristalinas com finos grãos poliminerálicos</p> <p>Andesito, Dolerito, Diabásio e Riólito</p>	<p>Rochas ígneas e metamórficas com grãos grossos poliminerálicos</p> <p>Anfibólito, Gabro, Gnaiss, Granito, Norito e Quartzito-Diorito</p>
<p>Amostras de Rochas Intactas</p> <p>Tamanhos de amostras de laboratório livres de juntas</p> <p>CSIR raio 100</p> <p>NGI raio 500</p>	<p>m = 7.0</p> <p>s = 1.0</p> <p>A = 0.816</p> <p>B = 0.658</p> <p>T = -0.140</p>	<p>m = 10.0</p> <p>s = 1.0</p> <p>A = 0.918</p> <p>B = 0.677</p> <p>T = -0.099</p>	<p>m = 15.0</p> <p>s = 1.0</p> <p>A = 1.044</p> <p>B = 0.692</p> <p>T = -0.067</p>	<p>m = 17.0</p> <p>s = 1.0</p> <p>A = 1.086</p> <p>B = 0.696</p> <p>T = -0.059</p>	<p>m = 25.0</p> <p>s = 1.0</p> <p>A = 1.220</p> <p>B = 0.705</p> <p>T = -0.040</p>
<p>Maciço Qualidade Muito Boa</p> <p>Rocha com juntas apertadas sem alteração com espaçamento de +/- 3m</p> <p>CSIR raio 85</p> <p>NGI raio 100</p>	<p>m = 3.5</p> <p>s = 0.1</p> <p>A = 0.651</p> <p>B = 0.679</p> <p>T = -0.028</p>	<p>m = 5.0</p> <p>s = 0.1</p> <p>A = 0.739</p> <p>B = 0.692</p> <p>T = -0.020</p>	<p>m = 7.5</p> <p>s = 0.1</p> <p>A = 0.848</p> <p>B = 0.702</p> <p>T = -0.013</p>	<p>m = 8.5</p> <p>s = 0.1</p> <p>A = 0.883</p> <p>B = 0.705</p> <p>T = -0.012</p>	<p>m = 12.5</p> <p>s = 0.1</p> <p>A = 0.998</p> <p>B = 0.712</p> <p>T = -0.008</p>
<p>Maciço Boa Qualidade</p> <p>Rocha fresca a ligeiramente alterada, com juntas pequenas de 1 a 3m</p> <p>CSIR raio 65</p> <p>NGI raio 10</p>	<p>m = 0.7</p> <p>s = 0.004</p> <p>A = 0.369</p> <p>B = 0.669</p> <p>T = -0.006</p>	<p>m = 1.0</p> <p>s = 0.004</p> <p>A = 0.427</p> <p>B = 0.683</p> <p>T = -0.004</p>	<p>m = 1.5</p> <p>s = 0.004</p> <p>A = 0.501</p> <p>B = 0.695</p> <p>T = -0.003</p>	<p>m = 1.7</p> <p>s = 0.004</p> <p>A = 0.525</p> <p>B = 0.698</p> <p>T = -0.002</p>	<p>m = 2.5</p> <p>s = 0.004</p> <p>A = 0.603</p> <p>B = 0.707</p> <p>T = -0.002</p>
<p>Maciço de Qualidade Normal</p> <p>Vários conjuntos de juntas moderadamente alteradas espaçadas de 0,3 a 1m</p> <p>CSIR raio 44</p> <p>NGI raio 1.0</p>	<p>m = 0.14</p> <p>s = 0.0001</p> <p>A = 0.198</p> <p>B = 0.662</p> <p>T = -0.0007</p>	<p>m = 0.20</p> <p>s = 0.0001</p> <p>A = 0.234</p> <p>B = 0.675</p> <p>T = -0.0005</p>	<p>m = 0.30</p> <p>s = 0.0001</p> <p>A = 0.280</p> <p>B = 0.688</p> <p>T = -0.0003</p>	<p>m = 0.34</p> <p>s = 0.0001</p> <p>A = 0.295</p> <p>B = 0.691</p> <p>T = -0.0003</p>	<p>m = 0.50</p> <p>s = 0.0001</p> <p>A = 0.346</p> <p>B = 0.700</p> <p>T = -0.0002</p>
<p>Maciço Qualidade Pobre</p> <p>Numerosas juntas de 30 a 500mm com preenchimento</p> <p>CSIR raio 23</p> <p>NGI raio 0.1</p>	<p>m = 0.04</p> <p>s = 0.00001</p> <p>A = 0.115</p> <p>B = 0.646</p> <p>T = -0.0002</p>	<p>m = 0.05</p> <p>s = 0.00001</p> <p>A = 0.129</p> <p>B = 0.655</p> <p>T = -0.0002</p>	<p>m = 0.08</p> <p>s = 0.00001</p> <p>A = 0.162</p> <p>B = 0.672</p> <p>T = -0.0001</p>	<p>m = 0.09</p> <p>s = 0.00001</p> <p>A = 0.172</p> <p>B = 0.676</p> <p>T = -0.0001</p>	<p>m = 0.13</p> <p>s = 0.00001</p> <p>A = 0.203</p> <p>B = 0.686</p> <p>T = -0.0001</p>
<p>Maciço de Qualidade Muito Pobre</p> <p>Numerosas juntas alteradas espaçada de &lt; 50mm com preenchimento fino</p> <p>CSIR raio 3</p> <p>NGI raio 0.01</p>	<p>m = 0.007</p> <p>s = 0</p> <p>A = 0.042</p> <p>B = 0.534</p> <p>T = 0</p>	<p>m = 0.010</p> <p>s = 0</p> <p>A = 0.050</p> <p>B = 0.539</p> <p>T = 0</p>	<p>m = 0.015</p> <p>s = 0</p> <p>A = 0.061</p> <p>B = 0.546</p> <p>T = 0</p>	<p>m = 0.017</p> <p>s = 0</p> <p>A = 0.065</p> <p>B = 0.548</p> <p>T = 0</p>	<p>m = 0.025</p> <p>s = 0</p> <p>A = 0.078</p> <p>B = 0.556</p> <p>T = 0</p>

HOEK et al. (2002), propuseram adaptações ao critério de ruptura, utilizando o Índice de Resistência Geológica (GSI).

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (5)$$

onde  $m_b$  é o valor da constante do material  $m$  para o maciço rochoso e é dado por

$$m_b = m_i e^{\text{GSI}-100/28-14D} \quad (6)$$

$m_i$  é a constante  $m$  da rocha intacta,

$s$  e  $a$  são constantes do maciço rochoso dadas pelas seguintes relações:

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} e^{-\text{GSI}/15} - e^{-20/3} \quad (7)$$

$$s = e^{\text{GSI}-100/9-3D} \quad (8)$$

$D$  é um fator que depende do grau de perturbação a que a rocha foi submetida pelo desmonte.

### **2.2.2.3 Uso do RocLab na Determinação da Resistência de Maciço Rochoso**

Um dos maiores obstáculos que é encontrado no campo da modelagem numérica para a mecânica de rochas, é o problema do *input* dos dados para definir as propriedades do maciço rochoso.

O uso de modelos constitutivos e de programas de análise numérica, é muito limitado se a análise não considerar os dados das propriedades do maciço rochoso.

A última versão do critério de ruptura de Hoek-Brown (2002) em conjunto com a implementação do programa *RocLab* da *Rocscience*, fornece uma boa ferramenta para resolver essa questão. Alguns problemas na obtenção dos critérios de ruptura agora podem ser resolvidos, incluindo:

- A aplicação do critério de ruptura para maciços rochosos muito alterados, e
- O cálculo dos parâmetros de Mohr-Coulomb equivalentes, a partir da envoltória de ruptura de Hoek-Brown.

#### 2.2.2.3.1 *Determinação dos Parâmetros de Resistência*

O RocLab permite a determinação dos parâmetros de resistência generalizado de Hoek-Brown de um maciço rochoso ( $m_b$ ,  $s$  e  $a$ ), baseado nos seguintes dados de entrada:

- Resistência compressiva sem confinamento da rocha intacta  $\sigma_i$
- O parâmetro da rocha intacta  $m_i$
- O Índice de Resistência Geológica (GSI)
- O Fator de Dano  $D$

A Figura 2.3 mostra a janela de entrada de dados do programa RocLab da Rocscience.

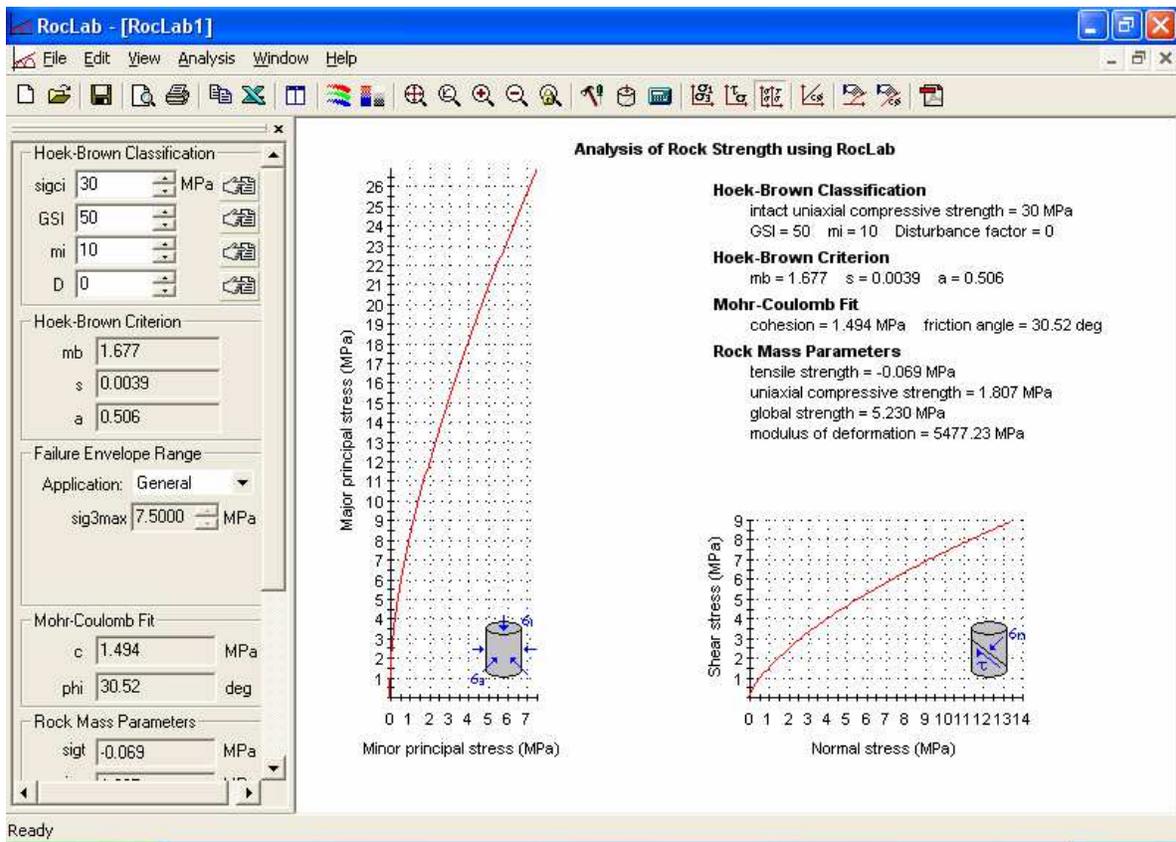


FIGURA2.3: Parâmetros de entrada do RocLab.

#### 2.2.2.3.2 Estimativa dos Parâmetros de Entrada

O RocLab permite a determinação dos quatro parâmetros de entrada ( $\sigma_i$ ,  $m_i$ , GSI e  $D$ ), eles podem ser convenientemente estimados a partir de gráficos e tabelas, com base no tipo de rocha, condições geológicas e outras características do maciço rochoso. A Figura 2.4 mostra a janela para a escolha do GSI no programa RocLab da Rocscience.



cunha, tombamentos de blocos e escorregamentos circulares, estes últimos geralmente em solos ou rochas muito alteradas.

MARKLAND (1972) desenvolveu um teste para verificar a possibilidade de ruptura na qual o deslizamento ocorre ao longo da linha de interseção de duas descontinuidades planares. A ruptura planar também pode ser medida pelo método, uma vez que este é um caso especial da ruptura em cunha. Para ocorrer a ruptura em cunha a linha de interseção deve mergulhar menos do que a face do talude.

Um refinamento ao teste de MARKLAND (1972) foi apresentado por HOCKING (1976) para a definição da ruptura preferencial de uma cunha ao longo da linha de interseção ou ao longo de um dos planos que formam a sua base.

O teste de MARKLAND (1972) utiliza a projeção hemisférica para determinar o comportamento de um talude propenso à ruptura em cunha. LAMBERT (1772) *apud* HOEK e BRAY (1981) desenvolveu a projeção hemisférica de estruturas planares ou lineares em um Diagrama de Igual Área, também conhecido como Rede de Schimidt-Lambert. SCHIMIDT (1925) *apud* HOEK e BRAY (1981) aplicou o uso da projeção para dados de Geologia Estrutural.

A projeção hemisférica é a melhor ferramenta para tratar dados de orientação e mergulho de famílias de descontinuidades. Através da representação dos planos pelo seu pólo (projeção da reta normal ao plano),

é possível determinar os valores médios das atitudes das descontinuidades, encontrando-se as concentrações mais altas dentro do estereograma.

Segundo FIORI e CARMIGNANI (2001), cinemática refere-se à movimentação de corpos sem fazer, entretanto, referência às forças que causam o movimento. Muitos blocos em taludes escavados em rocha estão em condições estáveis, muito embora contenham planos de fraqueza bastante inclinados. Isto ocorre quando não há liberdade de movimentação ao longo de todas as superfícies de fraqueza que os delimitam, existindo freqüentemente impedimentos para sua livre movimentação. Uma vez, no entanto, retirado o impedimento por erosão, escavação ou crescimento das fraturas, o bloco ou os blocos deslizarão imediatamente.

No próximo tópico será analisada a estabilidade de blocos, tendo-se por base as atitudes dos planos de fraqueza em relação à atitude do talude, levando-se ainda em consideração o ângulo de atrito ou de fricção atuante ao longo dos planos de fraqueza.

### **2.3.1**      *Definição de Termos Geométricos*

Existem vários tipos de descontinuidades de origem geológica em maciços rochosos que exercem influência na estabilidade de taludes. Na análise cinemática é preciso executar um levantamento sistemático da geometria da descontinuidade para posterior representação gráfica dos

dados. HOEK e BRAY (1981) apresentaram uma série de termos geométricos utilizados na análise cinemática:

- **Mergulho:** é a máxima inclinação de um plano de descontinuidade estrutural. Algumas vezes é muito difícil, quando examinada uma porção exposta de um plano inclinado oblíquo, visualizar o mergulho (*dip*) verdadeiro ao invés do mergulho (*dip*) aparente que é a inclinação de uma linha arbitrária de um plano. O mergulho aparente é sempre menor do que o mergulho verdadeiro;
- **Direção do Mergulho ou Azimute do Mergulho:** é a direção do traço horizontal da linha de mergulho, medida no sentido horário em relação ao norte;
- **Direção:** é o traço da interseção de um plano inclinado oblíquo com um plano de referência horizontal. Ele faz ângulo reto com a direção do mergulho do plano oblíquo. A importância prática da direção de um plano é que ele é o traço visível de uma descontinuidade observada na superfície horizontal de um maciço rochoso. No uso do mergulho e da direção para a definição de um plano na análise de um talude rochoso, é essencial que a direção na qual o plano mergulha seja especificada;
- **Plunge:** é o mergulho de uma linha, como a linha de interseção de dois planos ou o eixo de um furo de sonda ou de um túnel;

- **Rumo:** é a direção da projeção horizontal de uma linha, medida em sentido horário a partir do norte. Portanto, isso corresponde a direção de mergulho de um plano.

### 2.3.2 *Avaliação de Problemas Potências em Taludes*

Tipos diferentes de rupturas de taludes são associadas com tipos diferentes de estruturas geológicas e é importante que o projetista de taludes seja capaz de reconhecer o potencial de instabilidade durante o primeiro estágio do projeto.

A Figura 2.5 mostra os quatro principais tipos de ruptura considerado por HOEK e BRAY (1981), que são identificados pela concentração dos pólos das feições geológicas guias de cada tipo possível. Note que para analisar os tipos de rupturas, a face da superfície cortada do talude será incluída na representação gráfica desde que o escorregamento só possa ocorrer como o resultado de um movimento ao longo da face livre criada pelo corte no talude.

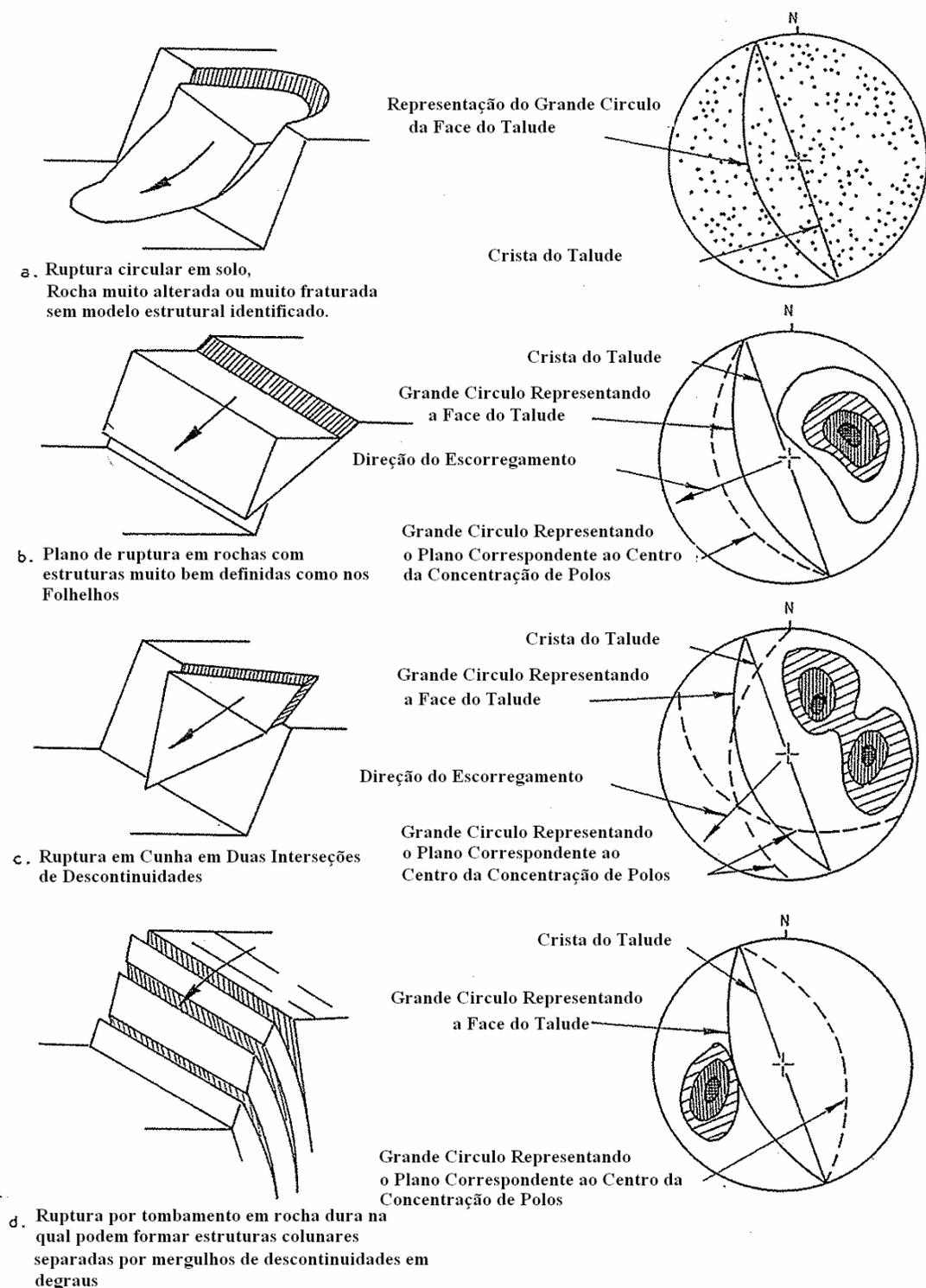


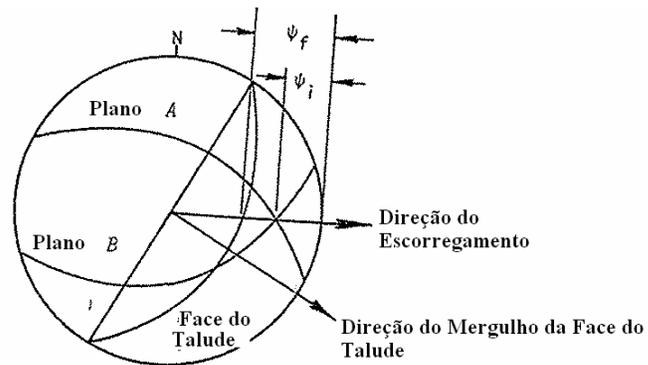
FIGURA2.5: Quatro principais tipos de ruptura em taludes rochosos (extraído de HOEK e BRAY, 1981).

O diagrama dado na Figura 2.5 foi simplificado para facilitar a visualização. Em um talude de rocha, a combinação de diferentes tipos de estruturas geológicas podem estar presentes e isso pode acarretar diferentes tipos de rupturas. Por exemplo, presença de descontinuidades que podem levar ao tombamento, bem como planos nos quais escorregamento em cunha pode ocorrer, podem levar ao deslizamento de uma cunha que foi separada do maciço rochoso por uma fratura de tensão.

Em um estudo de campo típico no qual dados de estruturas são plotados em diagramas de representação gráfica de estruturas planares, um número significativo de concentração de pólos pode estar presente. É usual fazer a identificação daqueles que representam planos potenciais de ruptura e eliminar aqueles que representam estruturas que são improváveis de causarem rupturas de taludes. MCMAHON (1974) discute vários métodos para identificar importantes concentrações de pólos, porém HOEK e BRAY (1981) preferem o método desenvolvido por MARKLAND (1972).

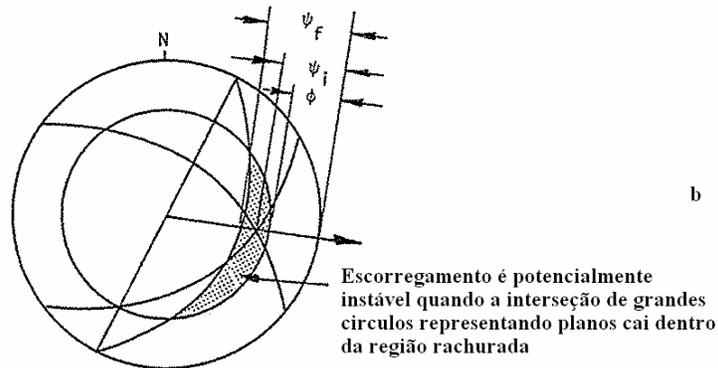
O teste de MARKLAND (1972) foi designado para estabelecer a possibilidade de uma ruptura em cunha na qual o escorregamento ocorre ao longo da linha de interseção de duas descontinuidades planares como ilustrado na Figura 2.6. A ruptura planar, Figura 2.5b, também pode ser determinada nesse teste tendo em vista que ela é um caso especial da ruptura em cunha. Se um contato mantém dois planos, o escorregamento só poderá ocorrer ao longo da linha de interseção e desde que essa linha de interseção intercepte a face do talude. Em outras palavras, o *plunge* da

linha de interseção deve ser menor do que o mergulho da face do talude, medido na direção da linha de interseção como mostra a Figura 2.6.



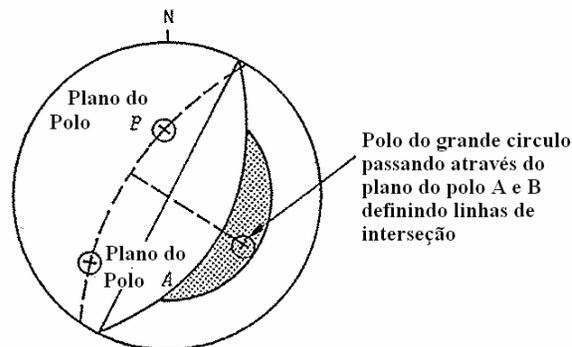
a : Escorregamento ao longo da linha de interseção dos planos A e B é possível quando o mergulho dessa linha é menor do que o mergulho da face do talude, medido na direção do escorregamento, ex:

$$\psi_f > \psi_i$$

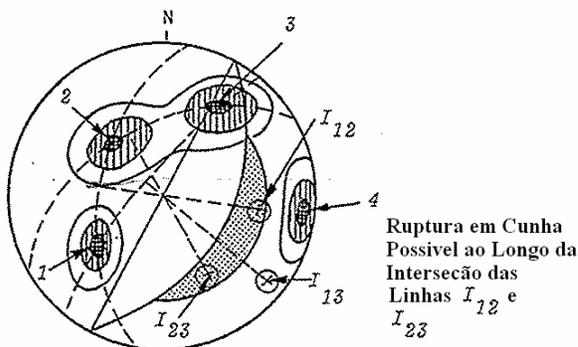


b : Ocorrência de escorregamento é assumido quando o mergulho da linha de interseção excede o ângulo de atrito, ex:

$$\psi_f > \psi_i > \phi$$



c : Representação de planos pelos seus polos e determinação da linha de interseção dos planos pelo polo do grande círculo que passa através de seus polos.



d : Avaliação preliminar da estabilidade de um talude de 50° em um maciço rochoso com 4 conjuntos de descontinuidades estruturais

FIGURA2.6: Casos de ruptura pelo teste de Markland (extraído de HOEK e BRAY, 1981).

O fator de segurança de um talude depende do *plunge* da linha de interseção, da resistência ao cisalhamento da superfície de descontinuidade e da geometria da cunha. O escorregamento só ocorre quando o mergulho do plano excede o ângulo de atrito  $\phi$ , e portanto, a primeira aproximação da estabilidade de uma cunha é obtida pela consideração de quando o **plunge** de uma linha de interseção excede o ângulo de atrito para uma superfície rochosa. A Figura 2.6b mostra que o talude é potencialmente instável quando o ponto definindo a linha de interseção de dois planos cai dentro da área incluída entre o grande círculo definindo a face do talude e a projeção do cone vertical definido pelo ângulo de atrito  $\phi$ .

Um refinamento ao teste de MARKLAND (1972) foi desenvolvido por HOCKING (1976) e esse refinamento foi introduzido para permitir a diferenciação entre o escorregamento de uma cunha ao longo da linha de interseção e ao longo de um dos planos formando a base da cunha. Se a condição para o teste de Markland for satisfeita, a linha de interseção de dois planos cai dentro dasombra mostrada na Figura 2.6b, e se a direção de mergulho de um dos planos cair entre a direção de mergulho da face do talude e a direção da linha de interseção, o escorregamento ocorrerá naquele plano ao invés de ao longo da linha de interseção.

As Figuras 2.6a e 2.6b mostram os planos de descontinuidade com grandes círculos, os dados de campo dessas estruturas são normalmente representadas em termos de pólos. Na Figura 2.6c os dois planos de

descontinuidade são representados pelos seus pólos e, para obter a linha de interseção desses planos, utiliza-se a o pólo do grande círculo que passa pelos pólos dos dois planos.

Como um exemplo do uso do teste de MARKLAND (1972) considere-se o contorno de pólos da projeção hemisférica dado na Figura 2.6d. Isso é necessário para examinar a estabilidade de uma face de talude com um mergulho de  $50^\circ$  e direção de mergulho  $120^\circ$ . Um ângulo de atrito de  $30^\circ$  é assumido na análise. Um *overlay* é preparado no qual as seguintes informações são incluídas:

- O grande círculo representando a face do talude
- O pólo representando a face do talude
- O cone de atrito

Da Figura 2.6d é possível observar que a combinação mais perigosa de descontinuidades é aquela representada pela concentração de pólos número 1,2 e 3. A interseção  $I_{13}$  cai fora da área crítica e é improvável que ela cause instabilidade. A concentração de pólos número 4 não pode estar envolvida em escorregamento. Porém, como mostra a figura, ela pode gerar tombamento ou a abertura de fendas de tração. Os pólos dos planos 1 e 2 caem fora do ângulo incluído entre a direção do mergulho da face do talude e a linha de interseção  $I_{12}$  e portanto ruptura dessa cunha será pelo deslizamento ao longo da linha de interseção  $I_{12}$ . Contudo, no caso dos planos 2 e 3, a representação de pólos do plano 2 cai dentro do ângulo

entre a direção do mergulho da face do talude e da linha de interseção I<sub>23</sub> e portanto a ruptura será por escorregamento do plano 2. Essa pode ser a condição mais crítica de instabilidade e pode controlar o comportamento do talude.

### **2.3.3      *Técnicas Gráficas para Representação de Dados***

Um dos mais importantes aspectos da análise cinemática de estabilidade de taludes, é a coleta sistemática e apresentação dos dados geológicos, sem os quais não é possível avaliar e incorporar os dados na análise da estabilidade. A experiência tem mostrado que a projeção esférica fornece um significado conveniente para a apresentação dos dados geológicos.

Muitos engenheiros se intimidam com os métodos de projeção esférica porque eles não estão familiarizados e porque eles parecem complexos. Muitos tipos de projeção esférica podem ser usadas e discussões sobre esses métodos foram desenvolvidas por vários autores. A projeção que é exclusivamente usada nesse trabalho é a projeção de igual área, algumas vezes chamada de Projeção de Lambert ou de Schmidt.

A projeção de igual ângulo ou Estereográfica oferece certas vantagens, particularmente quando usada para construções geométricas, e é preferida por muitos usuários. A projeção de igual área de LAMBERT (1772) *apud* HOEK e BRAY (1981) é o sistema mais utilizada pelos

geógrafos como representação da forma esférica da terra em superfície plana. Na adaptação dessa projeção para a geologia estrutural, o traço dos planos na superfície de uma esfera de referência é usada para definir o mergulho e a direção de mergulho do plano. Em adição ao grande círculo, a inclinação e orientação de um plano também podem ser definidas pelo pólo do plano. O pólo é o ponto no qual a superfície da esfera é interceptada pela linha radial que é normal ao plano.

Na representação de medidas de campo de mergulho e direção de mergulho, é conveniente trabalhar com pólos ao invés de grandes círculos.

#### **2.3.3.1 Contorno de Densidades de Pólos**

Vários métodos de contagem de pólos foram sugeridos por, BADGLEY (1959), RAGAN (1973).

DENNESS (1972) *apud* HOEK e BRAY (1981) desenvolveu um método de contagem de contorno no qual a esfera de referência é dividida em 100 áreas, com o objetivo de corrigir certas desvantagens dos outros métodos, particularmente aqueles relacionados a concentrações de pólos muito próximos à circunferência da rede de projeção.

O computador é uma ferramenta ideal para processar dados de geologia estrutural em um trabalho de rotina e muitas empresas de engenharia civil e de minas, e consultores em geotécnica usam o computador com esse objetivo.

A contagem e a estatística de pólos auxilia na definição do caimento e da direção média de uma família de juntas, fundamental para a

identificação dos planos potenciais de ruptura em uma análise cinemática de taludes escavados em rocha. A Figura 2.7 representa um estereograma com a densidade de pólos, note que em uma mesma família de juntas podem existir varias direções e mergulhos de planos.

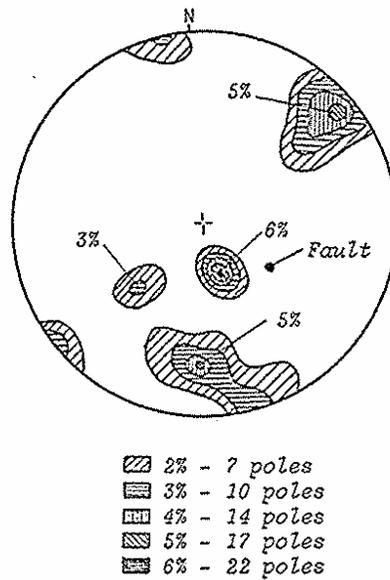


FIGURA2.7: Estereograma com densidade de pólos.



## **CAPITULO 3**

---

### **3 ASPECTOS GERAIS DA ÁREA EM ESTUDO**

Neste capítulo, são descritos aspectos relativos às características geológicas e geomorfológicas locais, e ainda condições de localização e acesso.

#### **3.1 Localização e acesso**

A Mina Casa de Pedra está localizada no Município de Congonhas, porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), Estado de Minas Gerais. Possui uma extensão de 19 km<sup>2</sup>, cujo acesso é feito por uma estrada asfaltada a partir da cidade de Congonhas, ou diretamente a partir da BR-040, que leva à porção sul da mina, Figura 3.1. Uma linha ferroviária passa pela mina, ligando-a diretamente à Companhia Siderúrgica Nacional em Volta Redonda, no Estado do Rio de Janeiro.

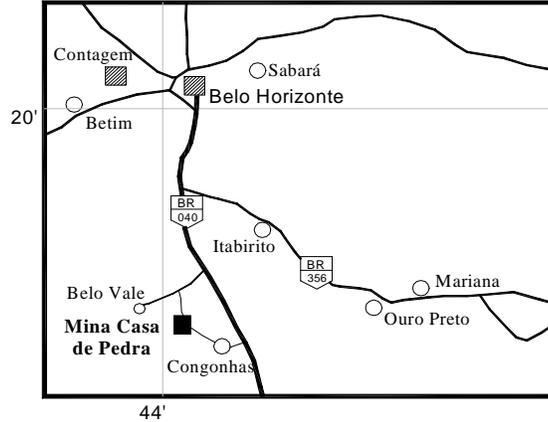


FIGURA 3.1: Mapa de localização da Mina Casa de Pedra e rodovias de acesso.

### 3.2 Geologia

A Mina Casa de Pedra está situada no extremo sudoeste do Quadrilátero Ferrífero (QF) que é uma das províncias geológicas mais bem estudadas no Brasil, devido a sua riqueza mineral.

O primeiro estudo significativo realizado no QF foi o mapeamento sistemático executado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e o United States Geological Survey (USGS). Nesse mapeamento foram geradas 43 quadrículas geológicas na escala 1:25.000, por vários autores que trabalharam no projeto a partir de 1946 até 1969. A figura 3.2 mostra o mapa regional compilado pelo projeto.

A partir do mapeamento realizado pelo projeto DNPM-USGS, Dorr propôs a primeira coluna estratigráfica para o QF em 1969. Com o avanço dos conceitos estruturais e geotectônicos da década de 80 vários autores propuseram modificações na coluna estratigráfica do QF, destacando-se

SCHORSCHER (1978), LADEIRA (1980 e 1985) e ALKMIM e MARSHAK (1998).

O QF fica situado na porção sudeste do Estado de Minas Gerais e tem este nome devido a seu formato semelhante ao de um polígono de quatro lados. Sete grandes estruturas estão presentes no QF, o Sinclinal Moeda, o Sinclinal Dom Bosco, o Anticlinal Mariana, o Sinclinal Ouro Fino, o Anticlinal Conceição, o Sinclinal Gandarela e o Homoclinal Serra do Curral conforme pode ser observado na Figura 3.2.

A Mina Casa de Pedra está situada na junção do Sinclinal Moeda com o Sinclinal Dom Bosco e possui quatro corpos mineralizados conhecidos como Corpo Principal, Corpo Oeste, Corpo Norte e Corpo Serra do Mascate. Nessa Dissertação só serão analisados os corpos que se encontram em operação que são o Corpo Principal e o Corpo Oeste.

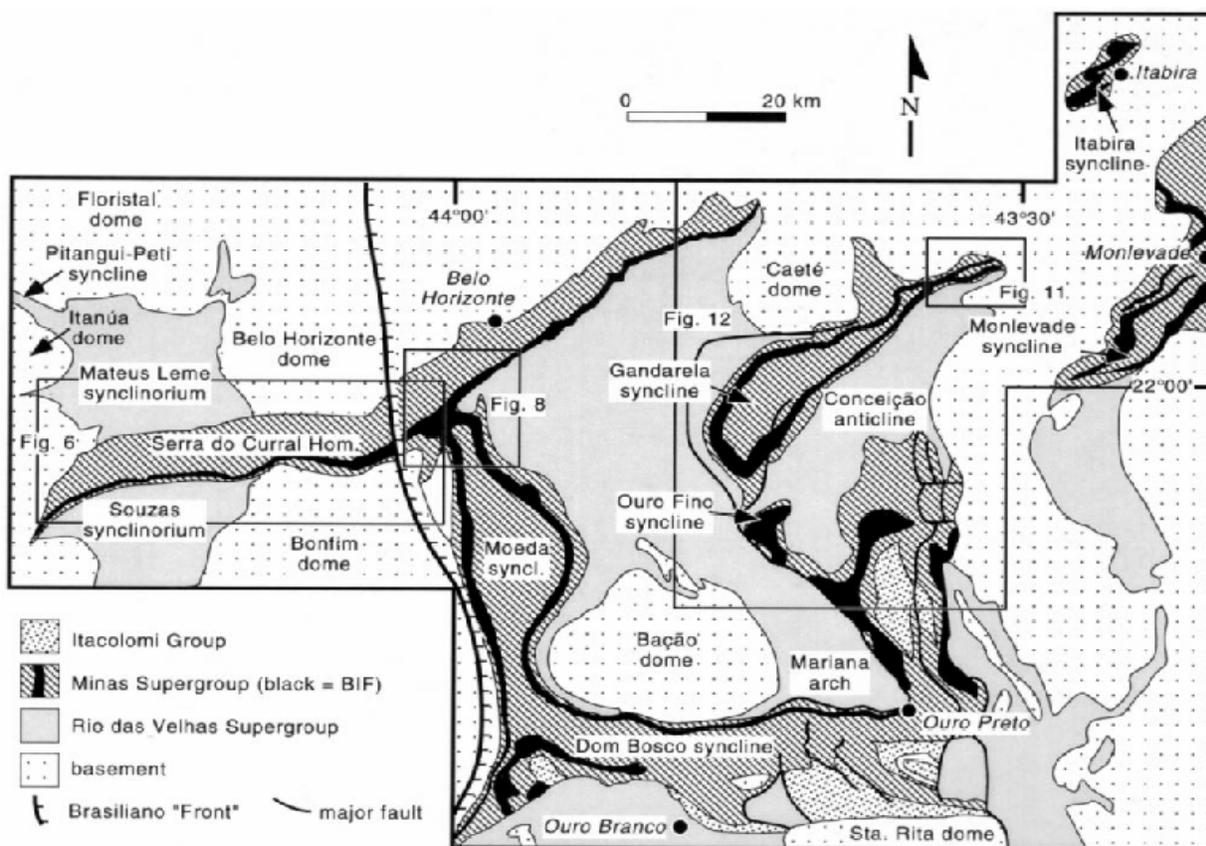


FIGURA 3.2: Mapa de localização e detalhe do Quadrilátero Ferrífero (extraído de ALKMIM e MARSHAK, 1998).

### 3.2.1 *Geologia Estrutural*

Segundo CHEMALE Jr. et al. (1994), a estruturação atual do Quadrilátero Ferrífero resulta, principalmente, da interação de dois grandes grupos de famílias de estruturas, gerados em dois grandes eventos: o transamazônico, de 2.125 a 2.040 milhões de anos e o brasileiro, de 650 a 570 milhões de anos.

## Orogenia Colisional Transamazônica

ALKIMIM e MARSHAK (1998) demonstram que, anteriormente ao desenvolvimento das estruturas brasileiras, a região do Quadrilátero Ferrífero continha estruturas remanescentes de uma orogenia colisional transamazônica, desenvolvida em dois estágios. O primeiro consiste de dobras e empurrões com vergência para NW, que afetaram as seqüências supracrustais, sugerindo que esse conjunto formou um cinturão de dobramento e cavalgamento após 2.125 milhões de anos.

O segundo conjunto consiste em estruturas que definem a arquitetura de domo e quilha do Quadrilátero Ferrífero, colapso do cinturão de dobramento e cavalgamento, conseqüentes da colocação de domos nas supracrustais há 2.095 milhões de anos (evento extensional).

O arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero, segundo ENDO (1997), ALMEIDA et al. (2002), é constituído em sua essência, por dobras de varias direções associadas às diferentes fases e eventos tectônicos que atuaram na região.

Segundo ALMEIDA et al. (2002) as dobras de escala regional podem ser divididas em três gerações.

-Primeira geração: Nappe de Ouro Preto e Nappe de Ouro Branco

-Segunda geração: Sinclinal Ouro Fino, Sinclinal Gandarela, Sinclinal Santa Rita, Serra do Curral, Itabira-Monlevade, Vargem do Lima, Arqueamento Rio das Velhas.

-Terceira geração: Sinclinal Moeda, Sinclinal Dom Bosco.

O arcabouço estrutural da região sudoeste do Quadrilátero Ferrífero foi gerado pelos três eventos distintos citados acima, dividido em quatro fases de deformação. O acamamento, observado em todas as unidades mapeadas, associado aos parâmetros geotais constituíram estruturas guias para a caracterização do arcabouço estrutural da região.

O evento E1 corresponde ao evento tectono-metamórfico Transamazônico ou à orogênese Minas responsável pela geração de toda a trama penetrativa do Supergrupo Minas ou seja uma xistosidade S1 paralela ao acamamento e uma segunda xistosidade S2 oblíqua à primeira. A polaridade tectônica e a vergência dos dobramentos da fase 2 deste evento rumam para SW (ENDO 1997, ALMEIDA et al. 2002), contrária às proposições de CHEMALE et al. (1994) e ALKMIM e MARSHAK (1998) que são para NW. Este evento é constituído de duas fases de deformação sucessivas D1 e D2. Na fase D1 foram geradas dobras recumbentes de escala regional e transportadas sobre uma superfície de descolamento basal ao estilo de uma *nappe*. Ela seria responsável pela sucessão estratigráfica inversa da Formação Cauê sobre as unidades do Grupo Sabará. A fase seguinte D2 caracteriza-se pelo redobrimento coaxial das dobras anteriormente nucleadas.

O evento Ex2 foi responsável pela formação dos sinclinais Moeda e Dom Bosco em uma fase de caráter extensional, como manifestação do fenômeno do colapso do orógeno Minas (e.g. ENDO 1997).

O evento E3 corresponde à compressão E-W responsável pela constrição do sinclinal Moeda e consequente formação de clivagens de crenulação de direção NW-SE associadas às dobras de pequena amplitude e comprimento de onda vergentes para SW.

A fase D5, relativa ao evento distensivo Ex4, gerou um sistema de grabens E-W e N-S para a deposição de sedimentos argilosos avermelhados. Um desses grabens de direção E-W encontra-se exposto na Mina Casa de Pedra na cava Principal.

As estruturas sedimentares presentes em todas as unidades mapeadas, notadamente o acamamento e estruturas geotais, foram determinantes na caracterização do arcabouço estrutural da região. O acamamento é representado pela variação da granulação e/ou composição tanto em escala macro quanto microscópica. São facilmente reconhecíveis nos quartzitos e filitos do Supergrupo Minas.

#### Orogenia Colisional Brasileira

Segundo CHEMALE Jr. et al. (1994), a orogenia brasileira é caracterizada no Quadrilátero Ferrífero por um sistema de cavalgamento, com transporte tectônico de leste para oeste. Este evento é subdividido em três fases deformacionais:

–deformação dúctil, metamorfismo fácies xisto-verde a anfibolito, desenvolvimento de zonas de cisalhamento, falhas de rasgamento e zonas transcorrentes conjugadas;

-deformação em condições de metamorfismo xisto-verde, com geração de dobras mesoscópicas, crenulação do eixo E-W, clivagem planar sub-vertical e falhas transcorrentes;

-deformação desenvolvida sob condições semelhantes à fase 02, gerando falhas reversas, dobras mesoscópicas, crenulação e clivagem espaçadas verticais.

Esse evento compressional brasileiro afetou todas as estruturas previamente geradas, ocasionando inversão, amplificação, translocação e rotação dos megassinclinais pré-existentes.

### **3.2.2 *Geologia Local***

A região do modelo geológico da Mineração Casa de Pedra – CSN compreende uma área de aproximadamente 25 km<sup>2</sup>, localizada entre o Pico do Engenho e a Serra da Boa Vista. Nessa área ocorrem diversas litologias, todas pertencentes ao Supergrupo Minas e Supergrupo Rio das Velhas. Além dos metassedimentos dos Supergrupos, ocorrem coberturas cenozóicas, destacando-se cangas, depósitos de tálus, lateritas e sedimentos quaternários de origem coluvionar.

As rochas expostas na área pertencem aos Grupos Nova Lima, Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará. Os estéreis ocorrem largamente como Xistos, Quartzitos e Filitos, e subordinadamente como Lateritas e Solos de

cobertura. O minério ocorre preferencialmente como Itabiritos na Formação Cauê do Grupo Itabira, e subordinadamente como Hematitas.

As rochas possuem mergulho de acamamento na direção NE, coincidente com a foliação regional nas regiões de flancos de dobras, e acamamento com caimento na direção SE nas regiões de charneiras. As dobras foram geradas durante a primeira fase de deformação compressiva e estão associadas a regimes de cinturão de dobramento e cavalgamento, com vergência para SW.

Um segundo evento de caráter distensivo, caracterizado por estruturas de colapso foi responsável pela rotação dos corpos de Hematitas encaixados na direção do traço das dobras de empurrão (NW-SE), fazendo com que os mesmos se posicionem atualmente com um alto ângulo de mergulho (aproximadamente 45°).

O terceiro evento de caráter compressivo possui regime na direção E-W e foi responsável pelo redobramento das estruturas geradas durante a primeira fase deformacional. Esse evento é caracterizado pela geração de clivagens de crenulação de direção NW-SE associadas a dobras de pequena amplitude e comprimento de onda vergentes para SW.

O quarto evento tem natureza distensiva e gerou um sistema de grabens E-W e N-S para a deposição de sedimentos argilosos avermelhados. Um desses grabens de direção E-W encontra-se exposto na Mina Casa de Pedra na cava do Corpo Principal. Também, de caráter distensivo, ocorrem intrusões de diques básicos encaixados verticalmente

na direção E-W, não se sabe ao certo se esse evento está correlacionado a geração dos grabens.

Uma última fase associada ao alívio de tensões no maciço, gerou a abertura de uma série de fraturas que estruturalmente estão correlacionadas aos eventos compressivos da primeira e terceira fase. Essas fraturas são em sua maioria subverticais e tem relação ortogonal com a foliação plano axial dos eventos compressivos, o que caracteriza uma clivagem de fratura gerada em regime de compressão.

Três elipsóides de tensão-deformação foram responsáveis pela estruturação na área da jazida, o primeiro tem eixos principais na direção 132/05 ( $\sigma_3$ ), 339/40 ( $\sigma_2$ ) e 239/28 ( $\sigma_1$ ); o segundo elipsóide tem eixos principais na direção 085/40 ( $\sigma_1$ ), 175/70 ( $\sigma_2$ ) e 270/50 ( $\sigma_3$ ). O terceiro elipsóide tem direções semelhantes ao segundo porém com caimentos mais suave. Os dois primeiros elipsóides são referentes a regimes compressivos, tendo o primeiro sofrido rotação devido a fase de colapso do orógeno Minas. O terceiro elipsóide tem origem distensiva com caimento da falha principal na direção Sul e orientação E-W.

### ***3.2.2.1 Unidades Litológicas utilizadas na Mineração Casa de Pedra***

Na Mineração Casa de Pedra são utilizadas 25 litologias no modelo geológico da jazida, sendo 10 litologias de minério, 3 litologias de minério marginal e 12 litologias de estéril.

As litologias de minério são aquelas que não apresentam restrição de qualidade sendo tratadas diretamente na usina de beneficiamento para geração dos produtos de minério de ferro. A Tabela 3.1 mostra as litologias de minério e seu critério químico de classificação baseado no teor de ferro.

TABELA 3.1: Litologias de minério.

Litologia	Código	Teor de Ferro (T)
Canga	CGA	T > 60%
Hematita Branda	HBA	T > 64%
Hematita Brechada	HBR	T > 64%
Hematita Compacta	HCP	T > 64%
Itabirito Rico Brando	IRB	58% > T > 64%
Itabirito Rico Compacto	IRC	52% > T > 64%
Itabirito Intermediario Brando	IIB	52% > T > 58%
Itabirito Anfibolitico	IAF	T < 52%
Itabirito Pobre Brando	IPB	T < 52%
Itabirito Pobre Compacto	IPC	T < 52%

As litologias de minério marginal são aquelas que apresentam restrição de qualidade porém com a utilização de outros métodos de beneficiamento podem ser aproveitadas. A Tabela 3.2 mostra as litologias de minério marginal.

TABELA 3.2: Litologias de minério marginal.

Litologia	Código
Filito Ferruginoso	FIF
Itabirito Dolomítico	IDO
Itabirito Manganésífero	IMB

As litologias de estéril são aquelas não possuem teor de ferro, portanto não podem ser aproveitadas nem mesmo com a utilização de outros métodos de beneficiamento. A Tabela 3.3 mostra as litologias de estéril.

TABELA 3.3: Litologias de estéril.

Litologia	Código
Argila	ARG
Aterro	ATE
Brecha	BRC
Clorita Xisto	CLX
Filito	FIL
Laterita	LAT
Pilha de Estéril	PES
Quartzito	QTZ
Rolado	ROL
Solo	SOL
Turfa	TUR
Xisto Básico	XBA

### 3.3 Morfologia dos corpos de minério

A morfologia atual dos corpos de minério é controlada pela geologia estrutural local, que é bastante complexa na Mineração Casa de Pedra, já que a área sofreu quatro eventos tectônicos, sendo que o primeiro deles, de caráter compressional, teve ainda dois pulsos, os corpos apresentam-se dobrados, falhados e rompidos.

Apesar de toda essa complexidade estrutural existem observações que podem ser feitas nesse contexto.

A área toda consiste em dois grandes flancos de uma das dobras, com amplitude de centenas de metros, descritas como tendo sido geradas no primeiro evento compressional que a área sofreu, E1, segundo ENDO (1997), que apresenta dobras parasíticas com diversas amplitudes e formas. Os minérios compactos (itabirito rico compacto e hematita) da mina estão nas zonas de charneira dessas dobras parasíticas, e das dobras posteriores, na forma de “lápiz” (L-Tectonitos). Os corpos de minério

brandos (itabirito pobre brando, itabirito intermediário brando, itabirito rico brando e hematita branda) compõem os flancos dessas dobras parasíticas.



## **CAPÍTULO 4**

---

### **4 DESCRIÇÃO DO TRABALHO (MATERIAIS E MÉTODOS)**

Na análise cinemática, o levantamento e armazenamento das características que influenciam na ocorrência de rupturas em maciços rochosos passam por varias etapas. Na primeira etapa as características das descontinuidades devem ser levantadas através de mapeamento geológico-geotécnico. O mapeamento deve ser realizado para cada tipo de rocha, unidade geológica, onde serão posteriormente analisadas as semelhanças entre os materiais. Numa segunda etapa os parâmetros de resistência devem ser calculados com o auxílio de algum método para cada uma das unidades geológicas e devem ser definidos os campos homogêneos que são agrupamentos de unidades geológicas com características semelhantes. Na última etapa, utilizando os parâmetros de resistência das unidades geológicas e a caracterização das descontinuidades principais do maciço, as áreas devem ser setorizadas em função da orientação das juntas em relação à orientação da escavação para a realização das análises cinemáticas em cada zona.

## 4.1 Classificação Geomecânica

Nesta etapa, orientando-se pela classificação geomecânica abordada no capítulo 2, foram produzidos 7 mapas temáticos referentes às características das descontinuidades consideradas mais importantes na ocorrência de movimentos gravitacionais de massa para a região em estudo: resistência/alteração, RQD, espaçamento da descontinuidade, condição da descontinuidade, pressão d'água, orientação da descontinuidade e RMR. Este sub-item descreve os métodos e os recursos utilizados na coleta de dados, produção e confecção de cada um desses mapas. Essas atividades constituíram-se basicamente das seguintes etapas:

- 1ª etapa: levantamento das informações já existentes, como fotos aéreas, mapas geológicos, mapas topográficos e relatórios pertencentes a outros trabalhos. Definição do mapa geológico e topográfico base utilizado no levantamento das características e no zoneamento das cavas;
- 2ª etapa: planejamento dos trabalhos de campo com a criação da ficha de campo utilizada na etapa seguinte e definição das técnicas de mapeamento a serem utilizadas. Os trabalhos de campo foram conduzidos de forma a se caracterizar os atributos do meio físico listados no capítulo 2, utilizando bússola, trena de 50 metros, martelo de geólogo, caderneta de campo e canivete;
- 3ª etapa: nesta etapa, foi realizado o trabalho de campo com ajuda de planilhas de campo de modo a levantar as informações

necessárias para a classificação do maciço rochoso, definir a localização e dimensões mais precisas das feições geológicas, identificar e classificar os materiais existentes na área;

- 4ª etapa: digitalização das informações e confecção dos mapas temáticos, utilizando o sistema de informação geográfica ArcView®, para o armazenamento e tratamento das informações.

Apresenta-se a seguir o detalhamento dos procedimentos utilizados em cada etapa.

#### **4.1.1      *Dados existentes***

Foram utilizados dados do mapa topográfico das cavas da Mineração Casa de Pedra (escala 1:4000 ano de execução: outubro 2003), contendo as seguintes informações:

- coordenadas UTM reduzidas;
- curvas de níveis de 13 em 13m;
- acessos a mina e geometria das pilhas de estéril;

Para esse trabalho foi importado o arquivo da topografia georeferenciado em formato \*.dwg para o ArcView. A partir deste mapa básico, todos os demais mapas utilizaram o mesmo sistema de coordenadas.

O mapa geológico das cavas (atualização mensal de outubro de 2003), contém 10 litologias de minério, 3 litologias de minério marginal e 11 litologias de estéril, utilizadas na operação de lavra e controle de

qualidade. O mapa geológico foi importado para o ArcView em formato \*dwg e serviu como base para o mapeamento geológico-geotécnico realizado na segunda etapa.

#### **4.1.2 *Planejamento do Trabalho de Campo***

Logo após a definição do mapa topográfico e geológico base, utilizados nessa Dissertação, tiveram início os trabalhos de planejamento das atividades de campo. A primeira atividade foi desenvolver uma planilha de campo, contendo colunas com os 6 parâmetros utilizados na classificação de maciço RMR, e colunas para as observações das estruturas geológicas que influenciam na análise cinemática. Esta etapa foi conduzida com o objetivo de se caracterizar e identificar os parâmetros relacionados na Tabela 2.1 mostrada no capítulo 2 deste trabalho.

A segunda atividade foi definir uma metodologia de mapeamento de campo, para a obtenção dos parâmetros necessários na classificação do maciço rochoso. Para o mapeamento na escala 1:4000 foram coletadas informações a cada 4 metros, cito:

- estimativas de resistência a compressão uniaxial, estimados através do uso do martelo de geólogo no campo e canivete;
- dados de RQD, estimados pelo número de juntas com espaçamento maior de 10 cm, com persistência da altura de um banco (13m) a cada dois metros de extensão;

- espaçamento médio das descontinuidades a cada dois metros de extensão;
- observação das características físicas mais freqüentes nas descontinuidade mapeadas, como relação de deslocamento, abertura e preenchimento da superfície;
- observação da presença de água na superfície;
- medidas de caimento dos planos de foliação, acamamento, falhas e fraturas a cada quatro metros.

As áreas mapeadas foram definidas através da análise do mapa geológico. As duas cavas foram separadas em quatro subáreas, domínio norte, sul, leste e oeste. Os domínios foram mapeados nos bancos onde o acesso foi possível e foram observadas as características geológico-geotécnicas das litologias utilizada na mina.

#### **4.1.3      *Trabalho de campo***

Como mencionado nos itens anteriores, o trabalho de campo foi conduzido de forma a coletar os dados necessários para classificar o maciço de Casa de Pedra segundo a classificação RMR. No mapeamento foi utilizada uma trena de 50 metros para marcar com estacas os pontos a serem observados a cada quatro metros. As informações foram coletadas, e armazenadas na planilha de campo, com o auxílio de uma trena de 2



para cada um dos atributos utilizados na classificação geomecânica foram calculados com base no mapeamento geológico-geotécnico e com o auxílio de planilhas foram inseridas no programa ArcView para gerar cada um dos mapas. Esse procedimento foi realizado em todos os parâmetros necessários para a classificação RMR.

Após a definição de todos os pesos de cada unidade geológica foi possível definir a classificação do maciço utilizando-se a somatória de cada peso em uma tabela do ArcView, como mostra a Figura 4.2.

FID	Shape*	Layer	Linetype	Resistenci	RQD	Espaçament	Descontinu	Pressãoagu	Orient_Des	RMR
0	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
1	Polígono	LIT_UMB	CONTINUOUS	1	3	5	10	15	0	34
2	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
3	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
4	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
5	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
6	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
7	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
8	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
9	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
10	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
11	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
12	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	1	3	5	1	15	0	25
13	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
14	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
15	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
16	Polígono	LIT_IPB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
17	Polígono	LIT_IIB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
18	Polígono	LIT_UMB	CONTINUOUS	1	3	5	10	15	0	34
19	Polígono	LIT_PILHA	CONTINUOUS	0	0	0	0	0	0	0
20	Polígono	LIT_PILHA	CONTINUOUS	0	0	0	0	0	0	0
21	Polígono	LIT_IRB	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
22	Polígono	LIT_HBR	CONTINUOUS	12	10	10	25	15	-5	67
23	Polígono	LIT_HBA	CONTINUOUS	2	3	5	1	15	0	26
24	Polígono	LIT_JPC	CONTINUOUS	7	13	15	25	15	-12	63

FIGURA 4.2: Tabela utilizada para geração do mapa de classificação do maciço RMR

## **4.2 Parâmetro de Resistência do Maciço Rochoso**

Nesta etapa foram determinados os parâmetros de resistência de maciço rochoso para cada uma das 24 unidades geológicas levando-se em consideração o critério de ruptura de Hoek-Brown. Foram também definidos os campos homogêneos, ou seja, foram agrupadas as unidades geológicas que possuem a mesma resistência. Este subitem descreve os métodos utilizados na produção dos dados e na definição dos campos homogêneos. Essas atividades podem ser divididas em três etapas:

- 1ª etapa: determinação dos parâmetros de entrada GSI, para cada uma das unidades geológicas, necessários para a estimativa da resistência de maciços rochosos utilizando o critério de Hoek-Brown;
- 2ª etapa: avaliação da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta para cada uma das unidades geológicas, necessária para a estimativa utilizando o critério de Hoek-Brown;
- 3ª etapa: cálculo da resistência do maciço rochoso para cada uma das unidades geológicas e definição dos campos homogêneos que são o agrupamento das litologias com parâmetros de resistência de maciço rochoso semelhantes.

Apresenta-se a seguir o detalhamento dos procedimentos utilizados em cada etapa.

#### 4.2.1 *Determinação do parâmetro GSI*

Nesta etapa foram determinados o parâmetro GSI para cada uma das 24 unidades geológicas utilizadas pela geologia de Casa de Pedra. O parâmetro GSI é utilizado no critério de ruptura de Hoek-Brown para a escolha do critério original quando os materiais são mais resistentes ou modificado quando o material está muito decomposto. Nesta Dissertação foram usados os valores obtidos na classificação RMR para cada uma das litologias como o valor atribuído ao GSI. A utilização do RMR' modificado é comum entre os consultores em geotécnica que trabalham com análise de estabilidade no Quadrilátero Ferrífero. O RMR' atribui peso máximo ao parâmetro “condição de água no maciço”, e não faz correção referente à “orientação das descontinuidades”.

A Figura 4.3 mostra o campo para a entrada dos dados no programa RocLab®. Produzido pela empresa Rocscience Inc.®, os valores obtidos pela classificação RMR representam a mesma faixa de valores para o GSI que vai de 0 a 100.

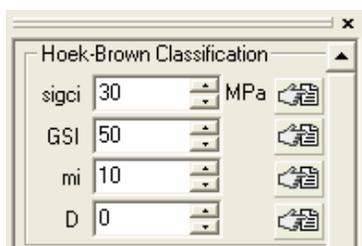


FIGURA 4.3: Parâmetros necessários para o cálculo da resistência de maciços rochosos utilizando o RocLab da Rocscience.

#### 4.2.2 Avaliação da resistência à compressão uniaxial

Nesta etapa foram definidas a resistência à compressão uniaxial para cada uma das unidades geológicas. A resistência à compressão uniaxial foi estimada através do método de determinação de campo, orientando-se pela Tabela 2.3 proposta no capítulo 2. A compressão uniaxial é um dos parâmetros necessários para a definição da resistência de maciços rochosos utilizando o critério de ruptura de Hoek-Brown.

A Figura 4.4 mostra o critério de classificação de campo fornecida pelo programa RocLab, que é semelhante à Tabela 2.3 utilizada nessa Dissertação, na etapa de levantamento de dados em campo.

Field Estimate of Strength	Examples	Strength (MPa)
Specimen can only be chipped with a geological hammer.	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite.	>250
Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it.	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff.	100-250
Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it.	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale.	50-100
Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer.	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone.	25-50
Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer.	Chalk, rocksalt, potash.	5-25
Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife.	Highly weathered or altered rock.	1-5
Indented by thumbnail.	Stiff fault gouge.	0.25-1

Uniaxial Compressive Strength (sigci):  MPa

FIGURA 4.4: Estimativa da resistência a compressão uniaxial utilizando o teste de campo.

### ***4.2.3 Cálculo dos parâmetros de resistência de maciço rochoso e definição dos campos homogêneos***

Nesta etapa foram calculados os parâmetros de resistência de maciço rochoso para cada unidade geológica. Cada litologia foi tratada separadamente como um maciço rochoso com características das descontinuidades e resistência à compressão uniaxial distintas. A resistência de cada litologia foi calculada com o auxílio do programa RocLab da Rocscience, para tanto foi necessária a determinação dos parâmetros obtidos nas duas etapas anteriores e de mais dois parâmetros a saber:  $m_i$  que é uma constante do material e  $D$  que é o fator de perturbação sofrido pelo maciço devido à escavação. Foram definidos três valores distintos para a constante  $m_i$ , sendo eles: as litologias de minério, litologias de minério marginal e para as litologias de estéril. O valor da constante  $D$  utilizado neste trabalho foi 0,7 que é o valor considerado para taludes escavados mecanicamente, conforme ilustra a Figura 4.5.

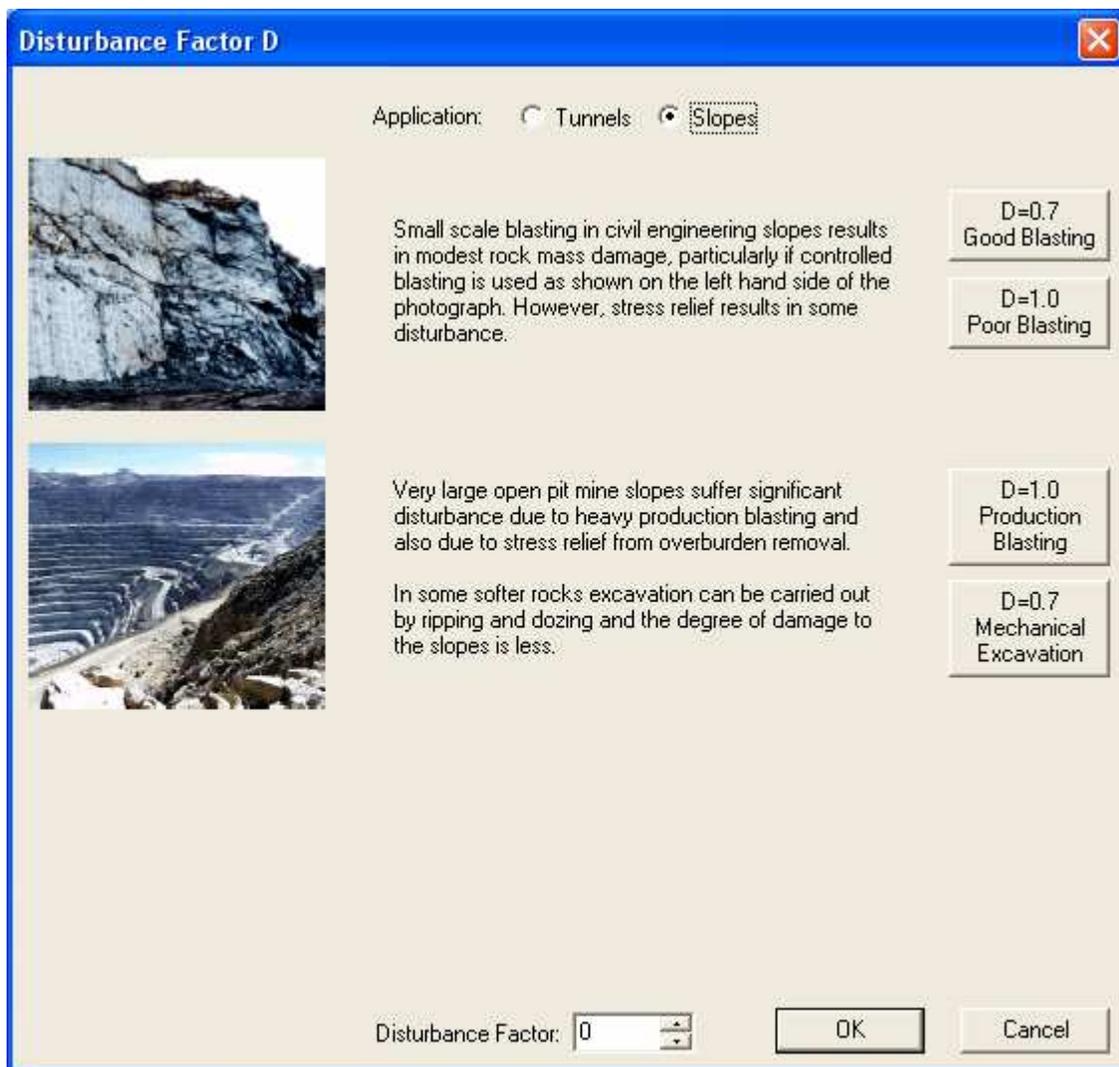


FIGURA 4.5: Fator de perturbação D sofrido pela escavação em maciços rochosos.

A segunda atividade para a determinação do parâmetro de resistência de cada litologia é a utilização do RocLab. Após a identificação dos parâmetros de entrada compressão uniaxial, RMR,  $m_i$  e  $D$ , o programa fornece os parâmetros utilizados no critério de Hoek-Brown, no critério de Morh-Coulomb e os parâmetros do maciço rochoso, conforme Figura 4.6.

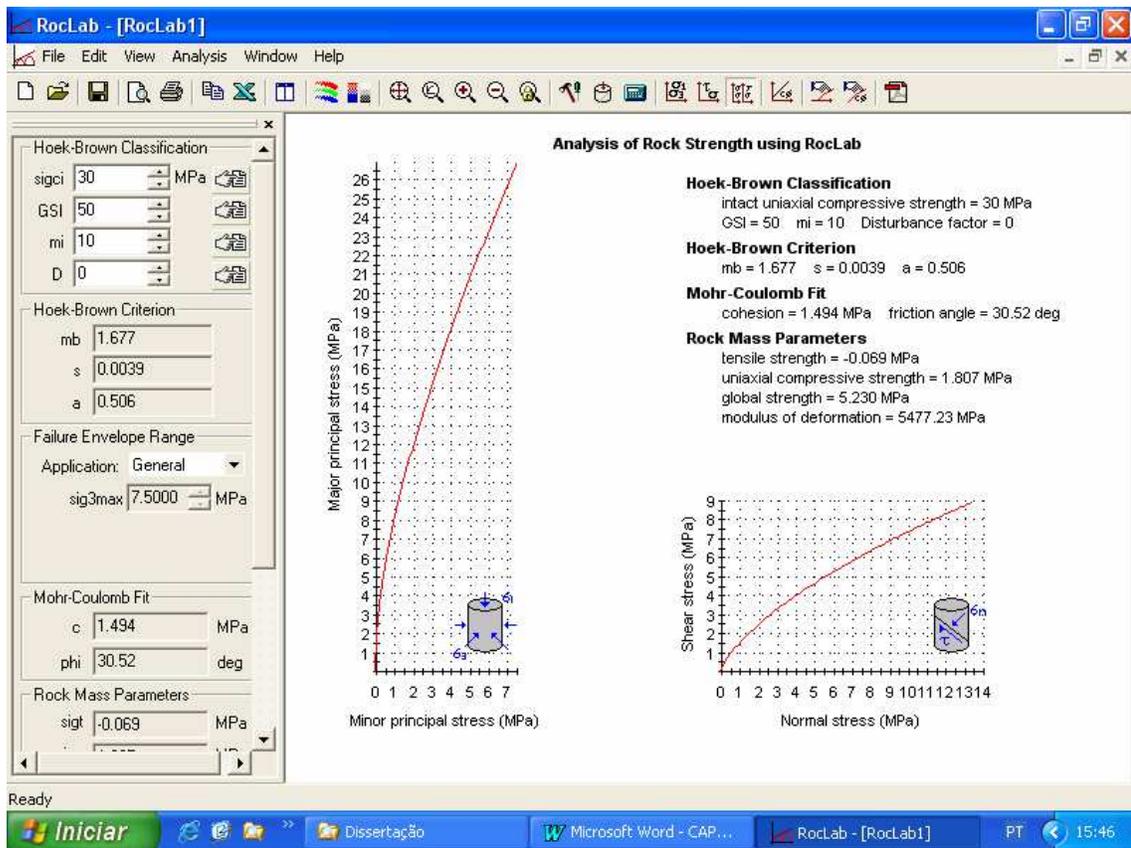


FIGURA 4.6: Dados dos parâmetros reduzidos de Morh-Coulomb obtidos pelo critério de Hoek-Brown.

Após a determinação dos parâmetros de coesão e o ângulo de atrito de cada uma das unidades geológicas as litologias foram agrupadas de acordo com a semelhança dos parâmetros de resistência do maciço rochoso. Esse grupamento é utilizado na identificação dos campos homogêneos necessários para a definição da resistência do maciço rochoso que deve ser utilizado na etapa de análise cinemática.

A escolha do parâmetro de resistência do maciço rochoso baseou-se na semelhança dos valores entre os campos homogêneos, isto é quando os valores são próximos utilizado-se aqueles menor resistência. Também foi

considerada a escala do trabalho, ou seja, o grupo que tem maior presença dentro de cada zona geométrica definida na etapa de análise cinemática.

### **4.3 Análise Cinemática**

Na análise cinemática foram identificadas as descontinuidades que exercem maior influência na instabilidade do maciço. Para tanto foi necessário verificar principalmente a persistência dos planos de descontinuidade. Durante o mapeamento estrutural foi possível notar que existem duas foliações principais com persistência elevada, da ordem de centenas de metros. Foram também definidas as zonas ou setores da mina em função da geometria da cava e orientação das descontinuidades. Este subitem descreve os métodos utilizados na identificação e tratamento dos dados de direção e caimento de planos e na definição dos setores que serão analisados. Essas atividades podem ser divididas em três etapas:

- 1ª etapa: levantamento de dados de caimento e mergulho de plano através do mapeamento estrutural da mina;
- 2ª etapa: análise das populações de dados e identificação dos tipos de estruturas;
- 3ª etapa: definição das estruturas principais e setorização da mina em função da geometria da cava.

Apresenta-se a seguir o detalhamento dos procedimentos utilizados em cada etapa.

#### **4.3.1 Mapeamento estrutural**

A coleta de dados estruturais foi realizada a cada 4 m durante o mapeamento geológico-geotécnico. Foram coletados a direção do mergulho e o mergulho dos planos de descontinuidade que ocorrem em cada unidade geológica, com o auxílio da bússola Clair.

A segunda atividade do levantamento dos dados de caimento dos planos foi montar um banco de dados com a direção do caimento e o mergulho de cada uma dessas populações de dados das 14 descontinuidades. A Figura 4.7 mostra um dos arquivos em formato \*.txt, contendo as medidas do acamamento de uma das estruturas presentes na mina.

Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
340.0	48.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
348.0	66.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
0.0	60.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
5.0	51.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
23.0	75.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
358.0	80.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
300.0	75.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
20.0	70.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
31.0	85.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
15.0	84.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
350.0	85.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
5.0	50.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
19.0	90.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
15.0	85.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
5.0	88.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
14.0	70.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
28.0	66.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
36.0	80.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
356.0	89.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
40.0	70.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
30.0	78.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
351.0	86.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
0.0	75.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
0.0	73.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	
20.0	79.0	P	Foliação Sn+1. transcorrência zona cisalhamento	

FIGURA 4.7: Arquivo \*txt contendo na primeira coluna o azimute da direção do mergulho e na segunda coluna o mergulho do plano.

#### 4.3.2 *Análise das populações de dados e tipos de estruturas*

Os dados levantados através do mapeamento estrutural foram analisados segundo a estruturação conhecida nessa região do Quadrilátero Ferrífero, orientando-se pelo capítulo 3 dessa Dissertação. As amostras coletadas a quatro metros foram divididas segundo o tipo de acamamento/dobramento, de foliação, de falha, de zona de cisalhamento, de fraturas. As direções das populações ou famílias de juntas foram divididas segundo a direção das fases de deformação que as unidades geológicas sofreram nos eventos **E1**, **Ex2**, **E3**, e **Ex4**.

A segunda atividade da análise das populações de dados de caimento de plano foi plotar os dados de pólos dos planos para cada uma

das populações de estruturas. A Figura 4.8 mostra um diagrama com os pólos dos planos de acamamento da fase compressiva **E3**.

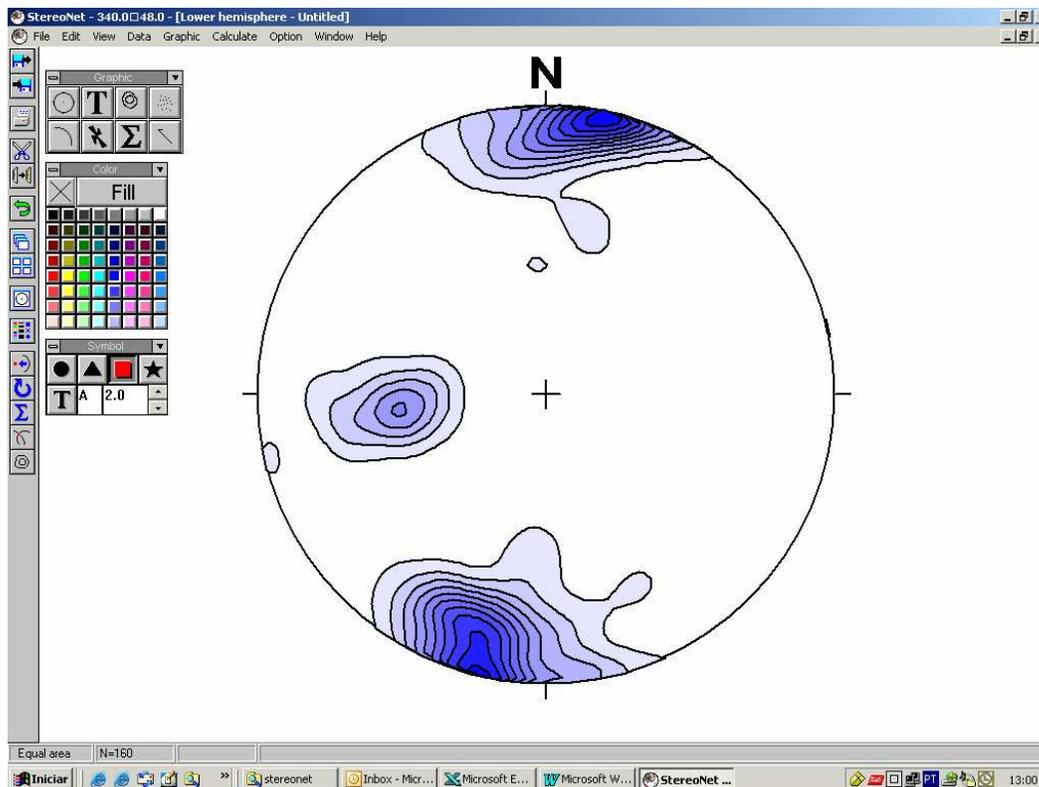


FIGURA 4.8: Projeção estereográfica das atitudes de acamamento da fase **E3**.

### 4.3.3 *Setorização das cavas*

Nesta etapa do trabalho foram definidas as estruturas principais através do grau de persistência das discontinuidades quando trabalhado na escala global, ou seja, discontinuidades com persistência menor do que 13 m e de baixa frequência foram consideradas de baixa influência nos processos de ruptura do talude.

Após a definição das estruturas principais que seriam consideradas na análise cinemática foram definidas as zonas em função da orientação

das estruturas e da direção dos taludes. Estruturas principais com a mesma direção apresentam comportamentos diferentes quando escavadas em direções diferentes.

A segunda atividade para a realização da análise cinemática foi a geração dos estereogramas para cada uma das zonas com a população de pólos da anisotropia principal do setor, o grande círculo da atitude média da população, o grande círculo da atitude do talude de maior altura e mais representativo do setor, e o cone de atrito do material mais presente na área.

## **CAPÍTULO 5**

---

### **5 COLETA, PRODUÇÃO E ARMAZENAMENTO DOS DADOS**

O levantamento, produção e armazenamento dos parâmetros do meio físico que influenciam na ocorrência dos movimentos gravitacionais de massa, além da determinação dos parâmetros de resistência e da análise cinemática, passam por várias etapas, desde a coleta de informações já existentes, trabalhos de campo, amostragem, análises de laboratório, uso de sistema de informações geográficas, até o armazenamento na forma de mapas temáticos e tabelas das informações referentes a cada parâmetro levantado. Esta metodologia é seguida pela maioria dos autores que trabalham com o mapeamento geotécnico, determinação de parâmetros de resistência e análise cinemática, variando apenas em relação ao detalhamento que se faz necessário em função da escala de trabalho, das características regionais da área em estudo e da lista de atributos influentes, além dos recursos disponíveis, experiência anterior etc.

## **5.1 Mapeamento Geotécnico**

O mapeamento geológico-geotécnico, como mencionado nos itens anteriores, foi conduzido de forma a coletar os dados necessários para classificar o maciço rochoso de Casa de Pedra segundo a classificação RMR. Desta forma, o trabalho de campo visou coletar informações sobre a resistência a compressão uniaxial, o RQD, o espaçamento das descontinuidades, a condição das descontinuidades, a presença de água, a litologia e a estrutura e tipo de descontinuidade geológica.

### **5.1.1 Unidades Geológicas**

O mapeamento geológico-geotécnico de campo utilizando a geologia das cavas que compreende 20 unidades geológicas das 25 unidades utilizadas no modelo de reservas da Mineração Casa de Pedra, possibilitou o levantamento das principais características relevantes para a classificação do maciço. Para cada litologia foram levantados os parâmetros de resistência a compressão uniaxial, alteração, RQD, espaçamento das descontinuidades, condição das descontinuidades, condição de água e a classificação geral do maciço. A tabela 5.1 mostra o peso geral dos parâmetros da classificação RMR para cada litologia mapeada nas cavas da mina. As 20 unidades mapeadas nas cavas e suas características são:

TABELA5.1: Classificação RMR Geral

Classe	Litologia	Codigo	Resistência	RQD	Espaçamento	Descontinuidade	Agua	RMR
Minério	Canga	CGA	8	10	9	8	15	50
	Hematita Branda	HBA	2	3	5	0	15	25
	Hematita Brechada	HBR	12	10	9	25	15	71
	Hematita Compacta	HCP	12	10	9	25	15	71
	Itabirito Anfibolítico	IAF	2	3	5	0	15	25
	Itabirito Intermédario Brando	IIB	2	3	5	0	15	25
	Itabirito Pobre Brando	IPB	1	3	5	0	15	24
	Itabirito Pobre Brando	IPB	2	3	5	0	15	25
	Itabirito Pobre Compacto	IPC	7	13	10	25	15	70
	Itabirito Rico Brando	IRB	2	3	5	0	15	25
	Itabirito Rico Comapcto	IRC	7	13	10	25	15	70
Minério Marginal	Filito Ferruginoso	FIF	1	3	5	10	15	34
	Itabirito Dolomítico	IDO	12	13	10	25	15	75
	Itabirito Manganésífero	IMB	1	3	5	10	15	34
Estéril	Brecha	BRC	8	10	9	0	15	42
	Clorita Xisto	CLX	4	17	15	10	15	61
	Filito	FIL	0	3	5	0	15	23
	Laterita	LAT	0	3	5	0	15	23
	Quartzito	QTZ	0	3	5	0	15	23
	Rolado	ROL	4	3	5	0	15	27
	Xisto Básico	XBA	1	17	15	10	7	50
	Xisto Básico	XBA	2	17	15	10	10	54

## HBA

A hematita branda ocorre com resistência predominante R2 podendo variar em menores proporções a R3, o que leva a processos de ruptura exclusivamente circulares. A alteração apresenta-se mais na forma de desagregação dos grãos devido a relativa baixa reatividade dos grãos quimicamente. Devido a desagregação a rocha que está muito alterada e não apresenta planos preferenciais de ruptura, podendo apenas a foliação insipiente NE oferecer alguma influência na estabilidade. A alta permeabilidade da hematita permite a rápida drenagem da água e rápida dissipação da poro pressão.

## HCP

A hematita compacta ocorre com resistência predominante R5 podendo variar a R4 e R6, o que leva à exclusividade de processos de rupturas planares e em cunha. A única alteração visível é a presença de manganês e caulim nas fraturas que possivelmente tem origem hidrotermal/metamórfica. A rocha encontra-se fraturada na direção NW-SE e na direção NE-SW com caimento subvertical e espaçamento médio de 20 a 60 cm, o que leva a um grau de fraturamento F4 a F2. A frequência das fraturas varia com a posição da hematita na charneira sendo mais espaçada na região logo acima da mesma. As fraturas são em geral pouco rugosas, planares com abertura menor do que 1mm.

## HBR

A hematita brechada ocorre com resistência predominante R5 podendo variar a R4 e R6, o que leva exclusivamente a processos de rupturas planares e em cunha. A única alteração visível nas fraturas é a presença de alguma oxidação. A rocha encontra-se fraturada na direção NW-SE e na direção NE-SW com caimento subvertical e espaçamento médio de 20 a 60 cm, o que leva a um grau de fraturamento F4 a F2, a foliação intensa na direção E-W com caimento subvertical, também exerce grande influência na estabilidade dos taludes nesses materiais. As fraturas são planares e lisas, pouco rugosas com abertura menor do que 1mm.

## IRC

O itabirito rico compacto ocorre com resistência predominante R4 podendo variar em menores proporções a R5, o que leva a processos de ruptura exclusivamente planares e em cunha. A rocha encontra-se fraturada na direção NW-SE e na direção NE-SW com caimento subvertical e espaçamento médio de 20 cm, o que leva a um grau de fraturamento F3, a foliação cai invariavelmente na direção NE nos dois corpos e não apresentam grande redução na estabilidade do material. As fraturas são planares e lisas enquanto que a foliação apresenta-se fechada, o bandamento dobrado confere uma maior resistência ao material. A foliação com caimento na direção leste oferece maior redução dos parâmetros de resistência, devendo ser

levadas em consideração como fator de redução.

#### IRB

O itabirito rico brando ocorre com resistência predominante R2 podendo variar a R1 e R3, o que leva exclusivamente a processos de rupturas circulares. A única estrutura incipiente é a foliação com caimento na direção NE e E. A foliação com caimento para NE tem espaçamento centimétrico o que leva a um grau de fraturamento F5 e F4, a foliação com caimento para E tem espaçamento da ordem de 50cm o que leva a um grau de fraturamento F3 a F5. A foliação de NE é plano axial, plana e lisa, e com abertura menor do que 1mm, já a foliação para E é de fase de cisalhamento raso com geração de transpressão local, com abertura maior do que 1mm plana e lisa.

#### IIB

O itabirito intermediário brando ocorre com resistência predominante R2 podendo variar a R3, o que leva exclusivamente a processos de rupturas circulares. A única estrutura incipiente é a foliação com caimento na direção NE e E. A foliação com caimento para NE tem espaçamento centimétrico o que leva a um grau de fraturamento F5 e F4, a foliação com caimento para E tem espaçamento da ordem de 50cm o que leva a um grau de fraturamento F3 a F5. A foliação de NE é plano axial, plana e lisa, e com abertura menor do que 1mm, já a foliação para E é de fase cisalhamento raso

com geração de transpressão local, com abertura maior do que 1mm plana e lisa.

#### IPB

O itabirito pobre brando ocorre com resistência predominante R2, R1 podendo variar a R3, o que leva preferencialmente a processos de rupturas circulares. A única estrutura incipiente é a foliação com caimento na direção NE e E. A foliação com caimento para NE tem espaçamento centimétrico o que leva a um grau de fraturamento F5 e F4, a foliação com caimento para E tem espaçamento da ordem de 50cm o que leva a um grau de fraturamento F3 a F5. A foliação de NE é plano axial, plana e lisa, e com abertura menor do que 1mm, já a foliação para E é de fase cisalhamento raso com geração de transpressão local, com abertura maior do que 1mm plana e lisa.

#### IPC

O itabirito pobre compacto ocorre com resistência predominante R4 podendo variar a R5, o que leva a processos de ruptura exclusivamente planares e em cunha. A rocha encontra-se fraturada na direção NW-SE e na direção NE-SW com caimento subvertical e espaçamento médio de 20 cm, o que leva a um grau de fraturamento F3, a foliação cai na direção NE nos dois corpos e não apresentam grande redução na estabilidade do material, pois se encontram fechadas; a foliação com caimento na direção E tem espaçamento da

ordem de 50cm o que leva a um grau de fraturamento F3 a F5 e tem abertura próxima de 1mm o que reduz o parâmetro de resistência. As fraturas são planares e lisas enquanto que a foliação apresenta-se fechada, o bandamento dobrado confere uma maior resistência ao material. A foliação com caimento na direção E oferece maior redução dos parâmetros de resistência, devendo ser levadas em consideração como fator de redução.

#### IAF

O itabirito anfibolítico ocorre com resistência predominante R2, podendo variar a R3 e R1, o que leva exclusivamente a processos de rupturas circulares. A única estrutura incipiente é a foliação com caimento na direção NE. A foliação com caimento para NE tem espaçamento centimétrico o que leva a um grau de fraturamento F5 e F4. A foliação de NE é plano axial, plana e lisa, e com abertura menor do que 1mm, o bandamento encontra-se dobrado e tem caimento nas direções NE e E, dependendo da posição na cava.

#### ILB

O itabirito pobre brando ocorre com resistência predominante R2, R1 podendo variar a R3, o que leva exclusivamente a processos de rupturas circulares. A única estrutura incipiente é a foliação com caimento na direção NE e E. A foliação com caimento para NE tem espaçamento centimétrico o que leva a um grau de fraturamento F5 e

F4, a foliação com caimento para E tem espaçamento da ordem de 50cm o que leva a um grau de fraturamento F3 a F5. A foliação de NE é plano axial, plana e lisa, e com abertura menor do que 1mm, já a foliação para E é de fase cisalhamento raso com geração de transpressão local, com abertura maior do que 1mm plana e lisa.

#### IMB

O itabirito manganésífero brando ocorre com resistência predominante R1 podendo variar a R2, o que leva exclusivamente a processos de rupturas circulares. A única estrutura incipiente é a foliação com caimento na direção N, S, NE e E. As foliações tem espaçamento centimétrico o que leva a um grau de fraturamento F5 e F4, a foliação com caimento para E tem espaçamento da ordem de 50cm o que leva a um grau de fraturamento F3 a F5. A foliação de NE é plano axial, plana e lisa, e com abertura menor do que 1mm, já a foliação para E é de fase cisalhamento raso com geração de transpressão local, com abertura maior do que 1mm plana e lisa; a foliação para N e S é da fase de cisalhamento raso com geração de transcorrência local.

#### IDO

O itabirito dolomítico exposto atualmente e analisado pelas sondagens ocorre com resistência predominante R5 podendo variar a R6, o que leva a processos de ruptura exclusivamente planares e em

cunha. A rocha deve encontra-se fraturada na mesma direção do fraturamento levantado na direção NW-SE e na direção NE-SW com caimento subvertical e espaçamento médio de 20 cm, o que leva a um grau de fraturamento F3. A foliação em posições mais profundas da cava deve cair invariavelmente na direção NE com menor inclinação (foliação plano axial) nos dois corpos e não apresentam grande redução na estabilidade do material, pois se encontram fechadas; a foliação com caimento na direção E pode não estar presente a grande profundidades. As fraturas são planares e lisas enquanto que a foliação apresenta-se fechada, o bandamento nessas profundidades devem estar obliteradas pela foliação plano axial.

#### FIF

O filito ferruginoso ocorre com resistência predominante R1 podendo variar a R2, o que leva exclusivamente a processos de rupturas circulares. A única estrutura incipiente é a foliação com caimento na direção N e S. As foliações tem espaçamento centimétrico o que leva a um grau de fraturamento F5 e F4 e são da fase de cisalhamento raso com geração de transcorrência local.

## CLX

O clorita xisto ocorre com resistência predominante R3, podendo variar a R4, o que leva a um processo de escorregamento plano-circular e planar. O bandamento encontra-se quase todo obliterado pela foliação com caimento NE que se encontra fechada, a foliação com caimento para N e S é a mais proeminente e são da fase de cisalhamento raso com geração de transcorrência local. A rocha encontra-se fraturada na direção NW-SE e na direção NE-SW com caimento subvertical e espaçamento médio de 60 cm, o que leva a um grau de fraturamento F2, elas são os possíveis planos de ruptura juntamente com a foliação para E que exerce grande redução nos parâmetros de resistência. A foliação para E tem abertura maior do que 1mm e apresenta lineação de estiramento o que indica movimentação.

## XBA

O xisto básico que se encontra exposto na cava atualmente ocorre com resistência predominante R3, podendo variar a R2 e R1, o que leva a um processo de escorregamento plano-circular e circular. O bandamento encontra-se quase todo obliterado pela foliação com caimento NE que se encontra fechada. A rocha encontra-se fraturada na direção NW-SE e na direção NE-SW com caimento subvertical e espaçamento médio de 60 cm, o que leva a um grau de fraturamento F2, elas são os possíveis planos de ruptura que exercem grande

redução nos parâmetros de resistência geral do maciço, principalmente devido a presença de água nas mesmas. As fraturas têm abertura maior do que 1mm e esporadicamente ocorrem preenchidas por argila.

#### LAT

A laterita se encontra exposta na direção leste-oeste do corpo principal ocorre com resistência predominante R3, podendo variar a R2 e R1, o que leva a um processo de escorregamento plano-circular e circular. A rocha não apresenta bandamento, mas está fraturada e consolidada por um processo de subsidência da bacia onde ela se encaixa. Esse aumento da espessura da laterita e carregamento constante reativou as falhas normais do half-graben gerando um sistema de fraturamento intenso nas lateritas principalmente as encaixadas nas partes mais profundas onde a movimentação foi maior. As fraturas têm abertura maior do que 1mm e nas regiões mais baixas apresentam infiltração com elevada pressão d'água.

#### BRC

A brecha ocorre com resistência predominante R2 na matriz e R5 nos fragmentos, podendo variar a R3 na matriz, o que leva a um processo de escorregamento circular e rolamento de blocos. A rocha tem origem tectônica e portanto não apresenta bandamento. O contato com as demais litologias encaixantes é coincidente com a foliação

com caimento para N e S que são da fase de cisalhamento raso com geração de transcorrência local. A rocha encontra-se muito blocada e os vazios entre os grãos estão preenchidos por laterita que foram substituindo a parte mais fina de itabiritos falhados (gouge) levados por lixiviação.

### **5.1.2 Mapas Temáticos**

Baseado nos trabalhos anteriores, a execução dos mapas temáticos foi orientada pela observação dos seguintes parâmetros para a individualização das unidades na área em estudo: definição de campos geomecânicos homogêneos em relação a, resistência do material, coesão, RQD, compacidade, condição e espaçamento das discontinuidades, presença de água e este último considerando, principalmente, a presença de estruturas geológicas relevantes aos processos de instabilidade como, foliação, bandamento composicional, falhas, fraturas e zonas de cisalhamento.

As Figuras 5.1 a 5.6 apresentam as cartas geotécnicas relativas a cada parâmetro da classificação geomecânica para as cavas da mineração Casa de Pedra e a Figura 5.7 apresenta a classificação final para o maciço rochoso da Mineração Casa de Pedra.

As litologias de minério e estéril da Mineração Casa de Pedra foram agrupadas de acordo com as características físicas relacionadas aos parâmetros de resistência, ângulo de atrito e coesão.

#### **5.1.2.1 Resistência**

Cinco grupos foram definidos em função dos teores de sílica (relacionado ao ângulo de atrito) e de alumina (relacionada à coesão): Grupo das Hematitas, baixa sílica; Grupo dos Itabiritos, alta sílica; Grupo dos Itabiritos Secundários, alta alumina; Grupo dos Xistos, alta alumina e Grupo das Lateritas (Figura 5.1).

Durante o mapeamento de campo foi possível notar uma maior coesão dos materiais com maior quantidade de minerais hidratados e com minerais muito finos, que foram classificados na Mineração Casa de Pedra como itabiritos secundários. A presença de níveis de quartzo em bandas alternadas também confere uma menor resistência e coesão aos materiais classificados como itabiritos na mineração. Os materiais conhecidos como hematitas são os mais resistentes, eles não tem presença de níveis de quartzo o que acaba conferindo uma resistência maior devido à ausência de planos de fraqueza.

As hematitas apresentam resistência a vários golpes de martelo quando pouco alteradas, formando lascas quando quebradas. Quando estão muito decompostas elas apresentam relativa coesão podendo algumas vezes formar sulcos com o canivete e não se desagregam ao

golpe do martelo.

Os itabiritos de alta sílica quando pouco alterados quebram com um único golpe de martelo ou com poucos golpes em um plano regular que coincide com o acamamento. Quando muito alterados não podem ser moldados pelo canivete e se desagregam facilmente com golpes de martelo as vezes até mesmo com um canivete.

Os itabiritos secundários não ocorrem na forma pouco alterada. Quando muito alterados eles apresentam uma coesão elevada podendo as vezes ser moldados pelo canivete; não apresentam resistência ao golpe do martelo quebrando facilmente na direção do acamamento.

Os materiais de estéril Xistos e Lateritas ocorrem na forma decomposta e não tem muita resistência ao golpe do martelo, eles tem coesão elevada devido à presença de argilominerais.

#### **5.1.2.2 RQD**

O RQD das litologias de Itabirito e Hematita muito alteradas foi de qualidade muito ruim (<25); quando menos alterados variaram de <45 a 60, qualidade pobre a regular. A presença de planos de foliação penetrativos devido a três eventos compressivos que atuaram sobre o maciço da mineração Casa de Pedra permitiu a maior alteração da rocha entre os planos de foliação que tem espaçamento muito pequeno da ordem de poucos centímetros. Esse espaçamento

entre os planos de foliação foi responsável pelo baixo RQD das litologias mais alteradas de hematitas e itabiritos. Quando os itabiritos e hematitas estão menos alterados, geralmente na posição dos eixos de dobras onde os cristais de minerais tem maior tamanho e conseqüentemente menos espaço para a percolação de fluidos. Os planos que controlam o RQD são as fraturas de clivagem que tem um espaçamento da ordem de decímetros nas hematitas e itabiritos. O espaçamento das nove famílias de juntas geradas nos dois eventos compressivos e no evento distensivo foram responsáveis pelo RQD um pouco maior nas litologias de itabirito e hematitas mais resistentes.

Os Xistos apresentaram um padrão mais regular independente do grau de alteração da rocha, com RQD de boa qualidade (80). As Lateritas apresentaram padrões de fraturamento semelhantes aos Xistos das cavas (Figura 5.2). Os planos que dominam o comportamento do RQD para as litologias de estéril são os planos de clivagem de fratura, com espaçamento métrico. O espaçamento dos xistos é métrico devido a seu comportamento mais rúptil em relação aos itabiritos e hematitas o que confere a eles um maior RQD.

### ***5.1.2.3 Espaçamento das Descontinuidades***

O espaçamento das descontinuidades possuem padrões semelhantes ao RQD, variando de < 6 cm a 80 cm (Figura 5.3). As litologias de

hematitas e itabiritos menos decompostos possuem maior espaçamento das famílias de juntas e quando decompostas apresentam espaçamento pequeno dos planos de foliação como descontinuidade principal.

As litologias de estéril apresentam as famílias de juntas como descontinuidades principais e tem maior espaçamento do que as juntas dos itabiritos e hematitas.

#### ***5.1.2.4 Condição das Descontinuidades***

As litologias Itabiritos e Hematitas muito alteradas apresentam juntas com aberturas  $> 1$  mm, com paredes totalmente desagregadas; quando menos alteradas, as paredes são duras e com abertura  $< 1$  mm. Os Itabiritos Secundários apresentam juntas moles  $> 1$  mm. Os Xistos e Lateritas possuem juntas com superfície estriada e preenchidas (Figura 5.4).

Os itabiritos e hematitas muito decompostos apresentam os planos de foliação com aberturas maiores do que 1 mm e as camadas de quartzo encontram-se totalmente desagregadas esfarelando-se ao menor esforço de compressão. Quando menos decompostos os planos de foliação apresentam-se fechados prevalecendo a abertura das clivagens de fratura que são menores do que 1 mm e lisas. Dependendo do grau de alteração sofrido pela rocha menos decomposta é comum a presença de óxidos de manganês e caulim

preenchendo as juntas de fratura.

Os Itabiritos Secundários ocorrem na forma muito decomposta prevalecendo a abertura maior de 1 mm nos planos de foliação. As juntas apresentam decomposição e oxidação nas paredes devido a presença de minerais oxidados e de alta alumina que são muito reativos na presença de água.

As litologias de estéril, Xistos e Lateritas, apresentam juntas com abertura maior do que 1 mm preenchidas por argilominerais e com superfície estriada devido as movimentações relativas entre os planos.

#### ***5.1.2.5 Presença de Água***

Os Itabiritos e Hematitas apresentam-se secos, pois são materiais muito drenantes, enquanto os Xistos e Lateritas ocorrem úmidos e molhados no talude Nordeste da Cava devido a sobreposição de uma bacia de sedimentos terciária (Figura 5.5).

Os Itabiritos e as Hematitas são rochas com permeabilidade da ordem de  $10^{-3}$  cm/s o que permite uma drenagem rápida do material. O nível de água estático do maciço de Casa de Pedra encontra-se na cota 1150 e vem sendo rebaixado por um sistema de poços a uma taxa de 540m<sup>3</sup>/h.

O talude nordeste da cava do Corpo Principal apresenta um aquífero suspenso superficial devido a presença de uma bacia de sedimentos

sobre um material argiloso. A água que infiltra na bacia fica retida pela baixa permeabilidade dos xistos decompostos da ordem de  $10^{-11}$  cm/s. Os Xistos que se encontram acima da cota 1269 ficam molhados durante o ano todo.

#### ***5.1.2.6 Orientação das Descontinuidades***

Apenas os taludes dos setores I e II da Cava Oeste da mina apresentaram atitudes das descontinuidades (foliação), muito desfavorável e desfavorável, em relação a face do talude (Figura 5.6).

A foliação que é subparalela ao acamamento é a principal descontinuidade na escala geral que considera a altura máxima do talude. As fraturas de clivagem são dominantes nas litologias compactas que são menos decompostas e ocorrem em menor proporção nos taludes.

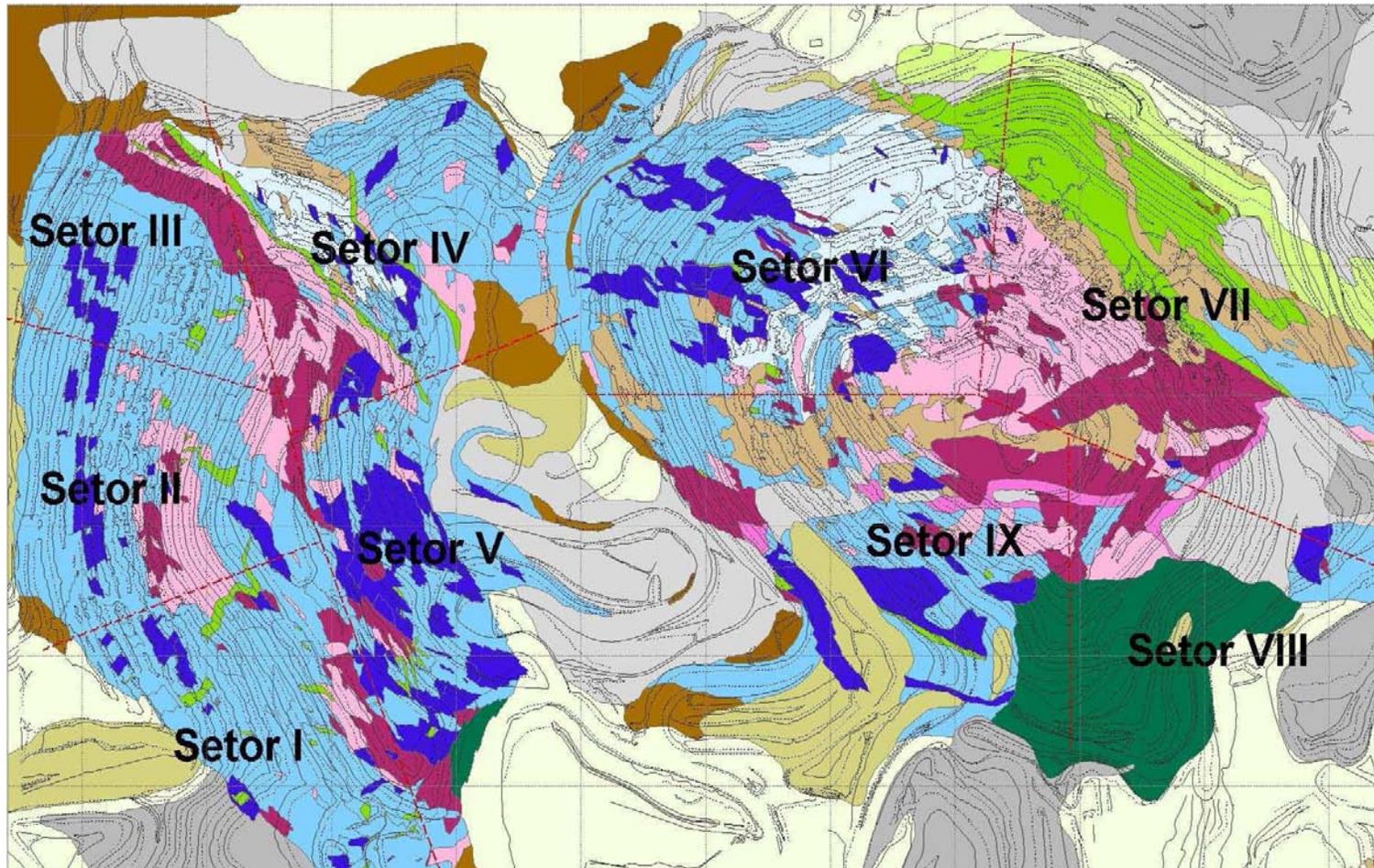
No Corpo Oeste foram individualizados cinco setores: setor I com a foliação na mesma direção da face do talude, setor II com a foliação fazendo aproximadamente  $10^\circ$  com a face do talude, setor III com a foliação fazendo aproximadamente  $25^\circ$  com a face do talude, setor IV com a foliação mergulhando na direção contrária a face do talude, e setor V com a foliação mergulhando na direção contrária fazendo aproximadamente  $10^\circ$  com a face do talude.

No Corpo Principal foram individualizados quatro setores: setor VI

com a foliação fazendo aproximadamente  $90^\circ$  com a face do talude, setor VII com a foliação mergulhando na direção contrária a face do talude, setor VIII com a foliação fazendo aproximadamente  $45^\circ$  com a face do talude, e setor IX com a foliação fazendo aproximadamente  $20^\circ$  com a face do talude.

#### ***5.1.2.7 Classificação Geomecânica***

A Figura 5.7 apresenta a classificação final das cavas da Mineração Casa de Pedra. Nela os Itabiritos e Hematitas muito alterados possuem classificação ruim, com ângulos de atrito e coesão baixos. Os Xistos e Lateritas possuem classificação regular, com ângulos de atrito de  $25$  a  $30^\circ$  e coesão relativamente alta. Os Itabiritos e Hematitas pouco alterados possuem classificação muito boa, com ângulo de atrito e coesão altos.



**Lito, Resistência**

ARG, 0	ATE, 0	SOL, 0	TUR, 0	QZT, 0		
FIL, 0	FIF, 1	IMB, 1	ROL, 4	CANGA, 8	IDO, 12	
IPB, 1	IRB, 2	IPB, 2	IIB, 2	IAF, 2	IPC, 7	IRC, 7
HBA, 2	BRC, 8	HBR, 12	HCP, 12			
XBA, 1	XBA, 2	CLX, 4				
LAT, 0	PILHA, 0					

Figura 5.1: Mapa geotécnico de resistência

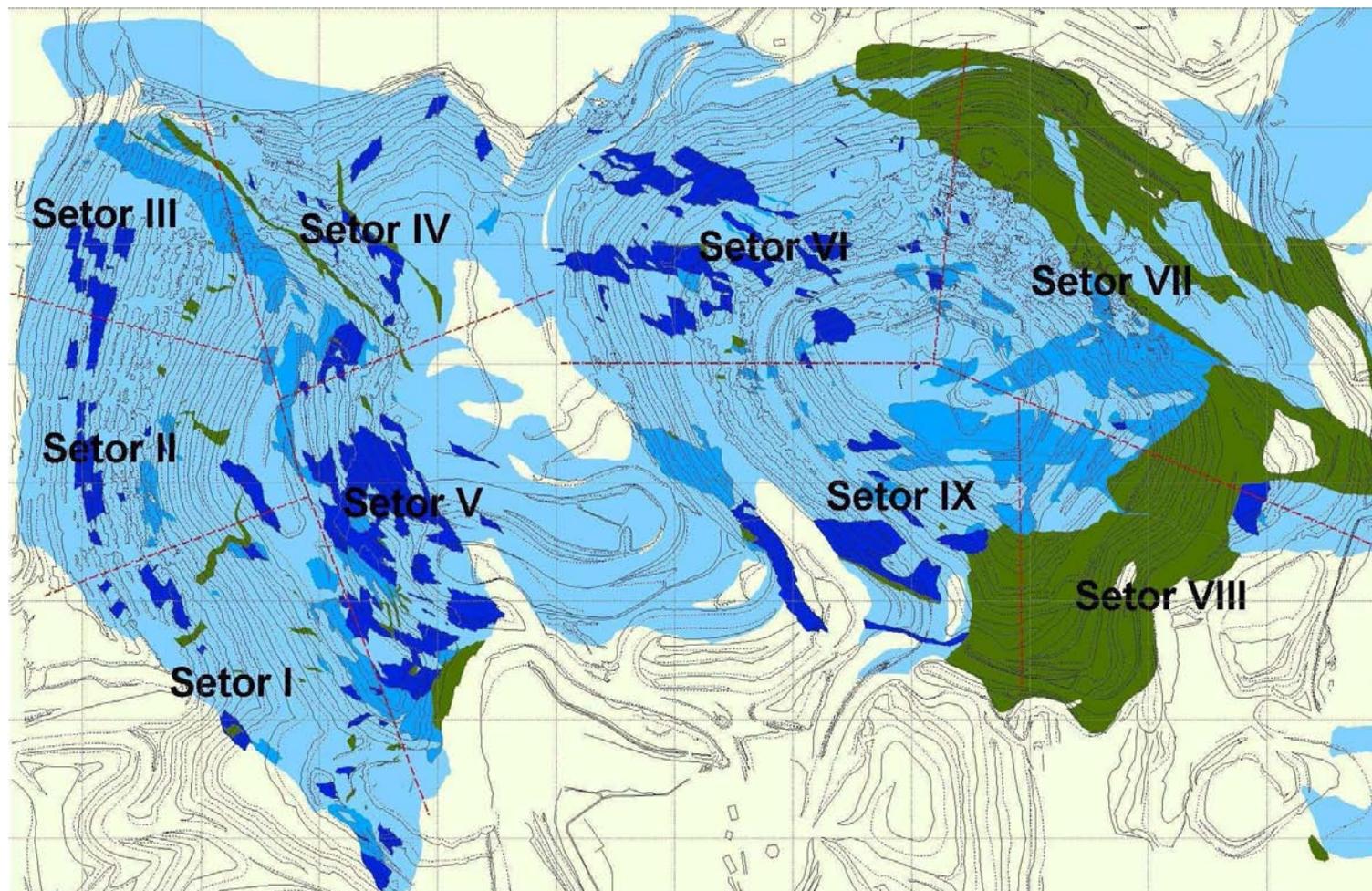


Figura 5.2: Mapa geotécnico de RQD

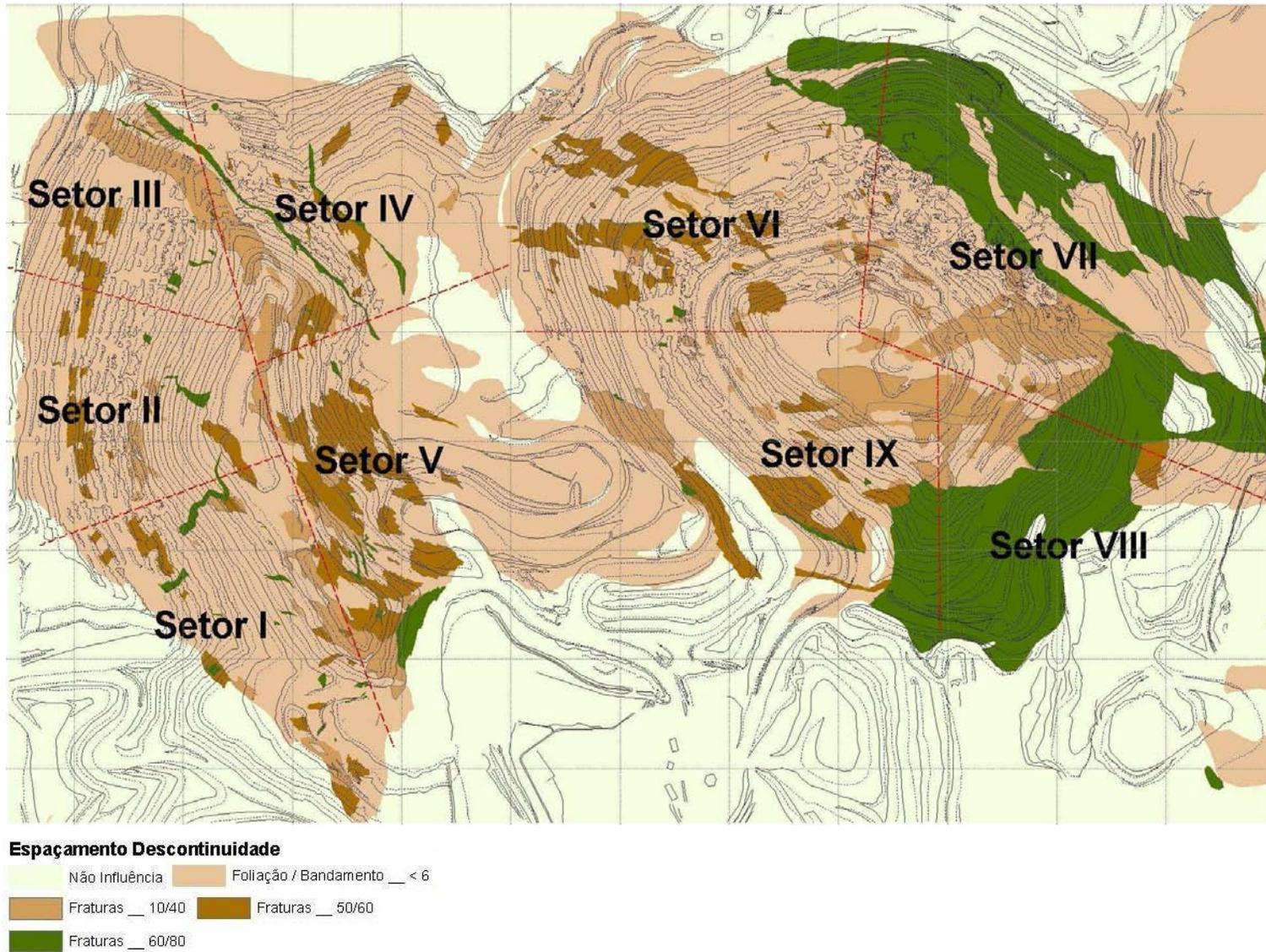
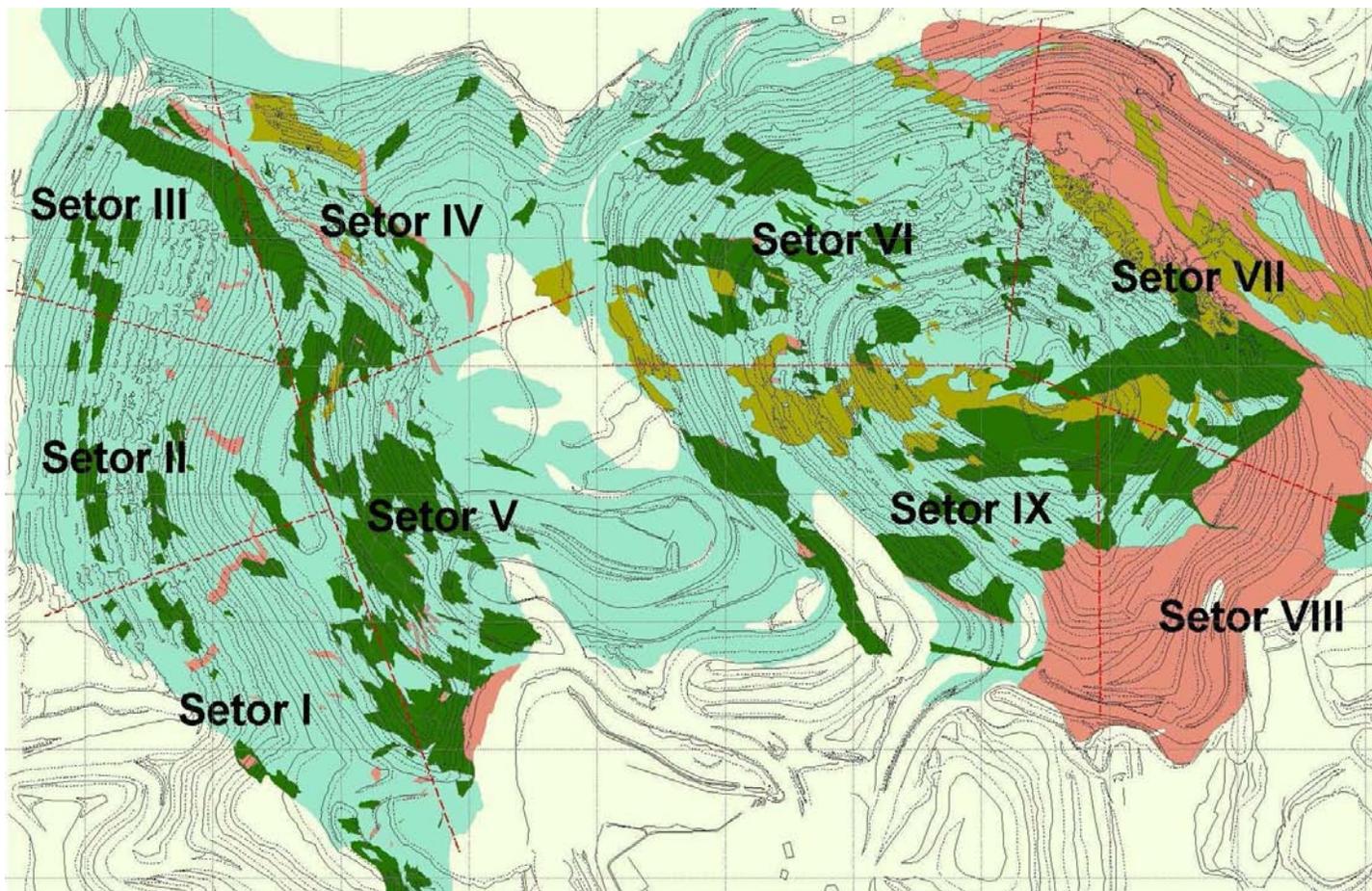


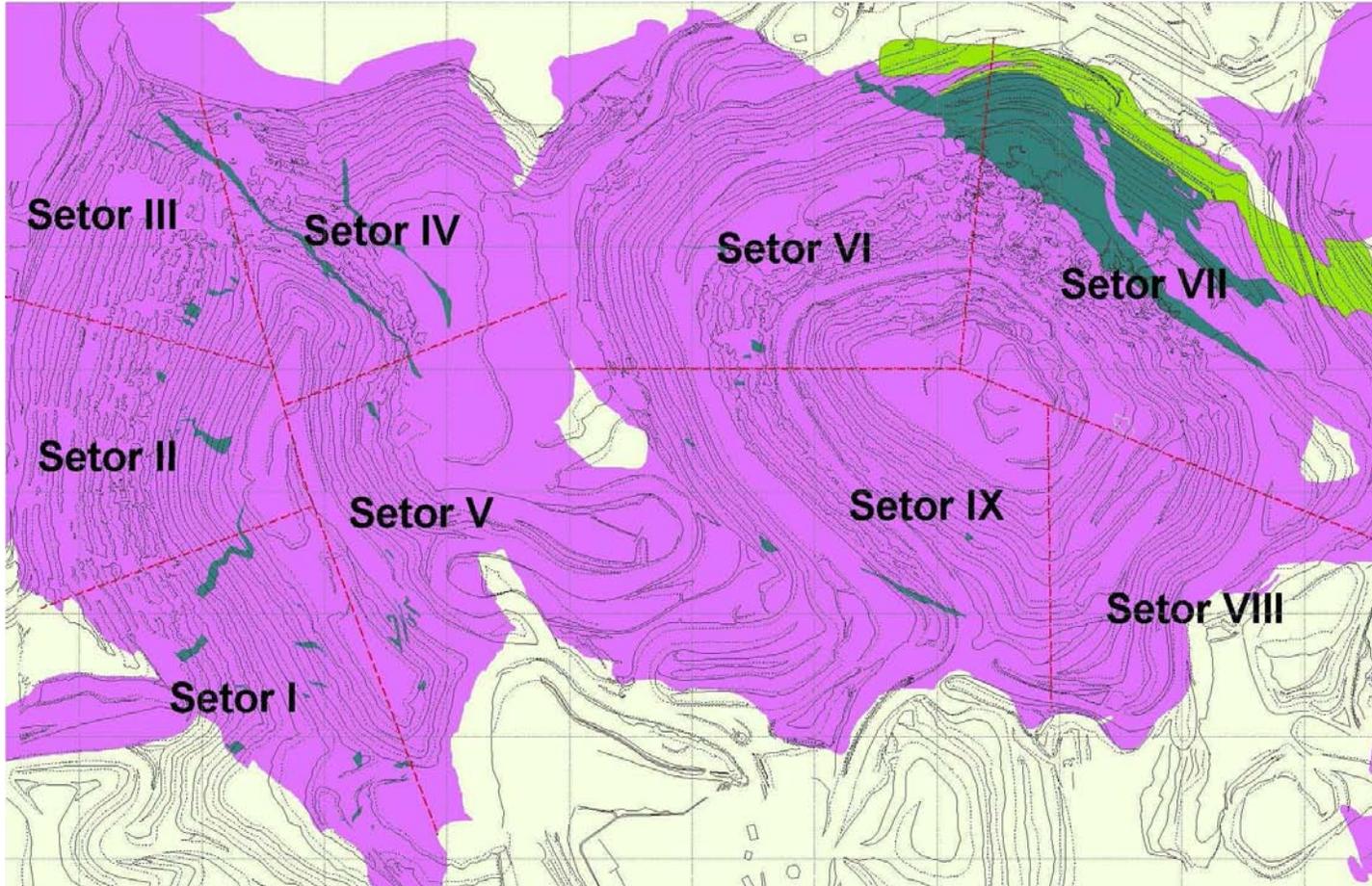
Figura 5.3: Mapa geotécnico de espaçamento das descontinuidades



**Descontinuidade**

- Não Influência
- Preenchimento mole de 5mm, Foliação Contínua
- Superfícies pouco rugosas, abertura < 1mm, paredes duras
- Abertura de Foliação 1 - 5mm, Foliação Contínua
- Superfícies estriadas ou preenchimento < 5mm

Figura 5.4: Mapa geotécnico de condição das descontinuidades



**Pressão d' água**  
Não Influência Molhado Úmido Seco

Figura 5.5: Mapa geotécnico de pressão d' água

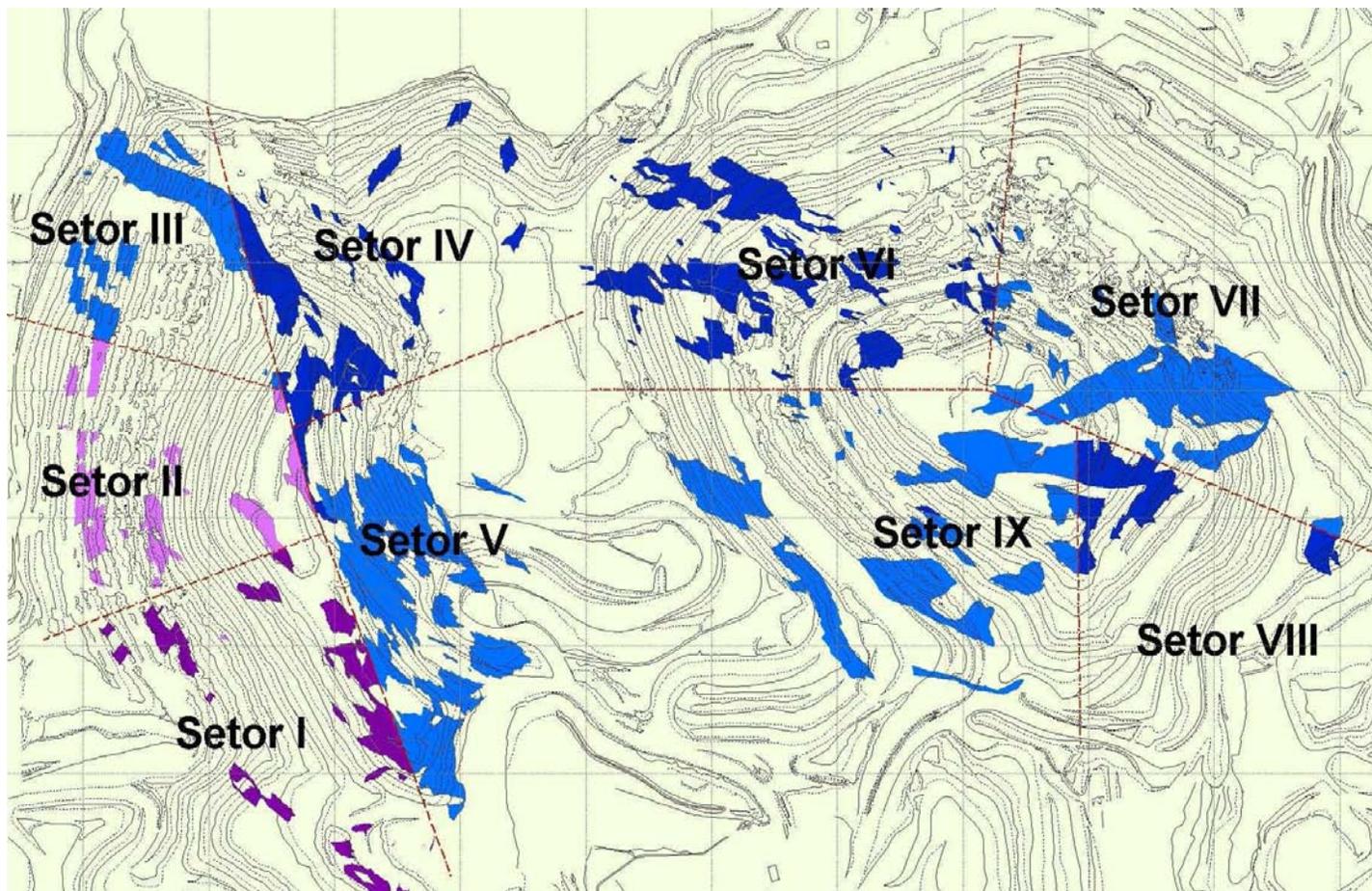


Figura 5.6: Mapa geotécnico de orientação das descontinuidades

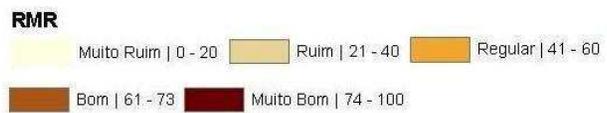
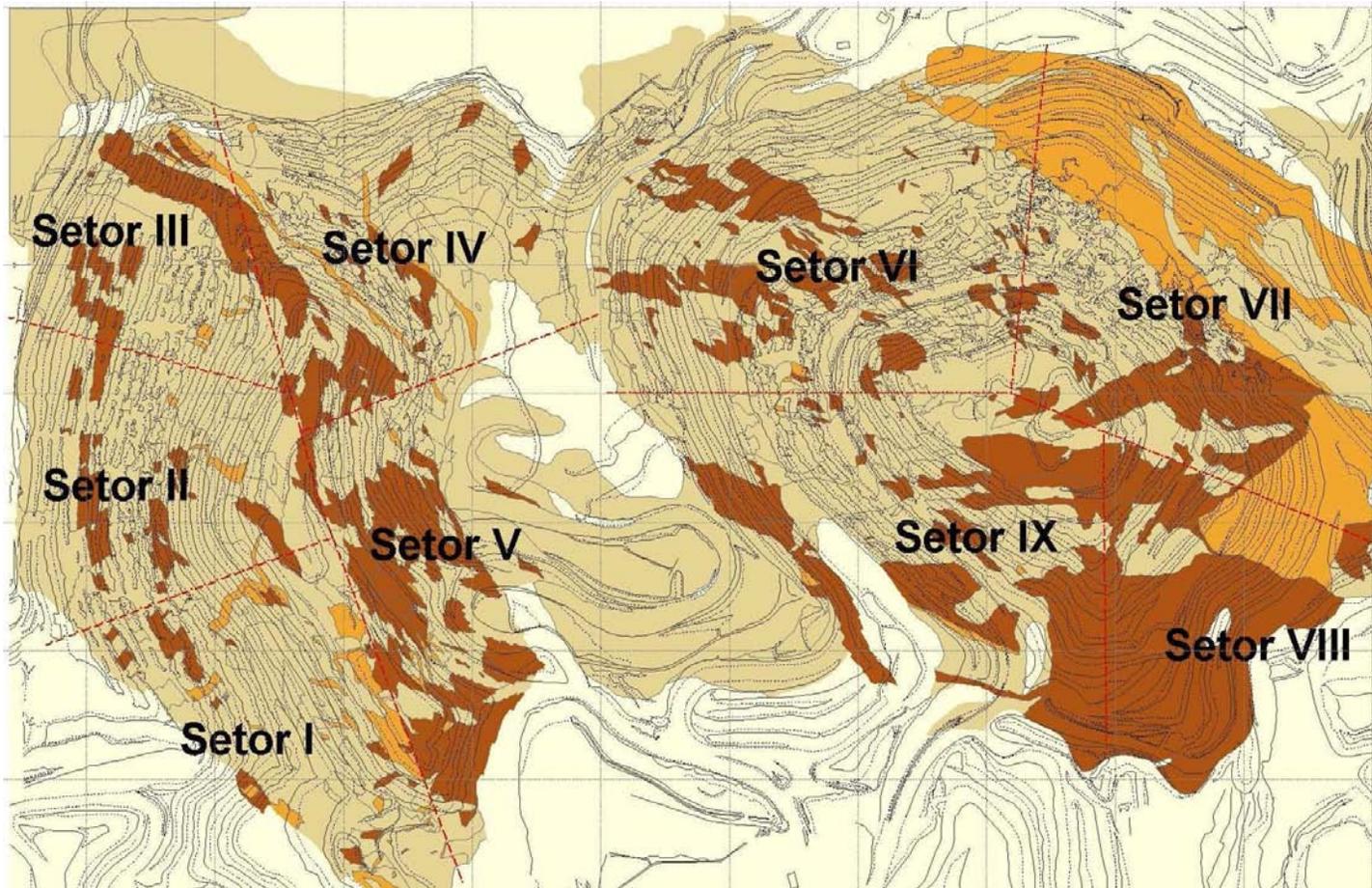


Figura 5.7: Mapa geotécnico de classificação do maciço

## 5.2 Parâmetros de Resistência do Maciço

Os Parâmetros de resistência do maciço rochoso de Casa de Pedra foram calculados com o auxílio do RocLab da Rocscience que é um software desenvolvido pelo Hoek et al. (2002) e cujo algoritmo é aceito internacionalmente. Os parâmetros foram calculados para cada unidade geológica variando os possíveis valores da compressão simples estimada no campo em 25%, 50% e 75%. Esta variação teve o objetivo de estudar a sensibilidade da incerteza da estimativa de campo para a obtenção do parâmetro de resistência de maciço rochosos. O critério de ruptura considerado nos cálculos é o de Hoek-Brown 2002.

Campos homogêneos foram definidos pelo agrupamento de unidades geológicas com resistência semelhantes. Os parâmetros de resistência da litologia predominante em cada setor definido na etapa de mapeamento geológico-geotécnico foram utilizados na etapa de análise cinemática para cada um dos três cenários: resistência a compressão simples de 25%, 50% e 75%.

### **5.2.1 Unidades Geológicas**

O mapeamento geológico-geotécnico de campo utilizando a geologia das cavas que compreende 20 unidades geológicas das 25 unidades utilizadas no modelo de reservas da Mineração Casa de Pedra, possibilitou o levantamento das principais características relevantes para o cálculo dos parâmetros de resistência do maciço. Para cada unidade geológica foram estimados os parâmetros de resistência à compressão uniaxial e a classificação geral RMR do maciço. A tabela 5.2 mostra os valores possíveis para a resistência do maciço calculados para cada litologia mapeada nas cavas da mina. As 20 unidades geológicas e suas características são:

Tabela 5.2: Valores dos parâmetros obtidos pela estimativa de campo.

Classe	Litologia	Codigo	Resistência a compressão simples	RMR	Massa	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
					Específica t/m³	MPa	MPa	MPa
Minério	Canga	CGA	50-100 MPa	50	2,400	62,5	75	87,5
	Hematita Branda	HBA	5-25 MPa	25	3,267	10	15	20
	Hematita Brechada	HBR	100-150 MPa	71	3,800	112,5	125	137,5
	Hematita Compacta	HCP	100-150 MPa	71	4,700	112,5	125	137,5
	Itabirito Anfibolítico	IAF	5-25 MPa	25	2,323	10	15	20
	Itabirito Intermédario Brando	IIB	5-25 MPa	25	2,566	10	15	20
	Itabirito Pobre Brando	IPB	1-5 MPa	24	2,529	2	3	4
	Itabirito Pobre Brando	IPB	5-25 MPa	25	2,529	10	15	20
	Itabirito Pobre Compacto	IPC	50-100 MPa	70	3,273	62,5	75	87,5
	Itabirito Rico Brando	IRB	5-25 MPa	25	2,762	10	15	20
Minério Marginal	Itabirito Rico Comapcto	IRC	50-100 MPa	70	3,647	62,5	75	87,5
	Filito Ferruginoso	FIF	1-5 MPa	34	2,315	2	3	4
	Itabirito Dolomítico	IDO	100-150 MPa	75	2,800	112,5	125	137,5
Estéril	Itabirito Manganésífero	IMB	1-5 MPa	34	1,799	2	3	4
	Brecha	BRC	50-100 MPa	42	4,700	62,5	75	87,5
	Clorita Xisto	CLX	25-50 MPa	61	1,880	31,25	37,5	43,75
	Filito	FIL	0,25-1 MPa	23	1,631	0,4375	0,625	0,8125
	Laterita	LAT	0,25-1 MPa	23	1,971	0,4375	0,625	0,8125
	Quartzito	QTZ	0,25-1 MPa	23	1,670	0,4375	0,625	0,8125
	Rolado	ROL	25-50 MPa	27	2,200	31,25	37,5	43,75
	Xisto Básico	XBA	1-5 MPa	50	1,837	2	3	4
Xisto Básico	XBA	5-25 MPa	54	1,837	10	15	20	

### HBA

A hematita branda ocorre com resistência à compressão simples estimada em 5 a 25 MPa. A classificação RMR obtida pelo mapeamento de campo foi: classificação geral = 25. A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 3,267 t/m<sup>3</sup>.

### HCP

A hematita compacta ocorre com resistência à compressão simples estimada em 100 a 150 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 71). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 4,7 t/m<sup>3</sup>.

### HBR

A hematita brechada ocorre com resistência à compressão simples estimada em 100 a 150 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 71). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 3,8 t/m<sup>3</sup>.

### IRC

O itabirito rico compacto ocorre com resistência à compressão simples estimada em 50 a 100 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 70). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 3,647 t/m<sup>3</sup>.

### IRB

O itabirito rico brando ocorre com resistência à compressão simples estimada em 5 a 25 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 25). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 2,762 t/m<sup>3</sup>.

### IIB

O itabirito intermediário brando ocorre com resistência à compressão simples estimada em 5 a 25 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 25). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 2,566 t/m<sup>3</sup>.

### IPB

O itabirito pobre brando ocorre com resistência à compressão simples estimada em 1 a 5 MPa, e 5 a 25 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 24 e 25). A

massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra atualmente é de 2,529 t/m<sup>3</sup>.

#### IPC

O itabirito pobre compacto ocorre com resistência à compressão simples estimada em 50 a 100 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 70). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 3,273 t/m<sup>3</sup>.

#### IAF

O itabirito anfibolítico ocorre com resistência à compressão simples estimada em 5 a 25 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 25). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 2,323 t/m<sup>3</sup>.

#### ILB

O itabirito pobre brando ocorre com resistência à compressão simples estimada em 5 a 25 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 25). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 2,362 t/m<sup>3</sup>.

### IMB

O itabirito manganesífero brando ocorre com resistência à compressão simples estimada em 1 a 5 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 34). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 1,799 t/m<sup>3</sup>.

### IDO

O itabirito dolomítico exposto atualmente e analisado pelas sondagens ocorre com resistência predominante à compressão simples estimada em 100 a 150 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral estimada = 75). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 2,8 t/m<sup>3</sup>.

### FIF

O filito ferruginoso ocorre com resistência predominante à compressão simples estimada em 1 a 5 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 34). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 2,315 t/m<sup>3</sup>.

### CLX

O clorita xisto ocorre com resistência à compressão simples estimada em 25 a 50 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo

foi: (classificação geral = 61). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 1,88 t/m<sup>3</sup>.

#### XBA

O xisto básico que se encontra exposto na cava atualmente ocorre com resistência à compressão simples estimada em 1 a 5 MPa, e 5 a 25 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 50 e 54). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 1,837 t/m<sup>3</sup>.

#### LAT

A laterita se encontra exposta na direção leste-oeste do corpo principal ocorre com resistência à compressão simples estimada em 0.25 a 1 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 23). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 1,971 t/m<sup>3</sup>.

#### BRC

A brecha ocorre com resistência à compressão simples estimada em 50 a 100 MPa. A classificação obtida pelo mapeamento de campo foi: (classificação geral = 42). A massa específica média da litologia utilizada pela geologia de Casa de Pedra é de 4,7 t/m<sup>3</sup>.

### **5.2.2 Parâmetros de Resistência**

Os parâmetros de resistência para cada unidade geológica foram calculados para três cenários distintos: 25%, 50% e 75% da resistência a compressão uniaxial estimada em campo. Este método de estudar cenários teve como objetivo principal avaliar a sensibilidade e a influência da variação dos valores de resistência estimados em campo na análise cinemática. A Tabela 5.3 apresenta o resultado dos cálculos de resistência de cada unidade geológica para cada cenário analisado.

Tabela 5.3: Valores dos Parâmetros de resistência para cada litologia.

Classe	Litologia	Codigo	Resistência a compressão simples	RMR	Massa Específica t/m <sup>3</sup>	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Angulo	Coesão 1	Angulo	Coesão 2	Angulo
						MPa	MPa	MPa	Atrito 1	MPa	Atrito 2	MPa	Atrito 3
Minério	Canga	CGA	50-100 MPa	50	2,400	62,5	75	87,5	42,37°	1,280	43,71 °	1,397	44,82°
	Hematita Branda	HBA	5-25 MPa	25	3,267	10	15	20	19,94°	0,428	22,39°	0,505	24,22°
	Hematita Brechada	HBR	100-150 MPa	71	3,800	112,5	125	137,5	48,13°	4,185	48,77°	4,517	49,34°
	Hematita Compacta	HCP	100-150 MPa	71	4,700	112,5	125	137,5	46,79°	4,464	47,47°	4,799	48,06°
	Itabirito Anfibolítico	IAF	5-25 MPa	25	2,323	10	15	20	22,11°	0,345	24,69°	0,406	26,60°
	Itabirito Intermédiario Brando	IIB	5-25 MPa	25	2,566	10	15	20	21,36°	0,371	23,90°	0,437	25,78°
	Itabirito Pobre Brando	IPB	1-5 MPa	24	2,529	2	3	4	12,94°	0,180	14,79°	0,214	16,21°
	Itabirito Pobre Brando	IPB	5-25 MPa	25	2,529	10	15	20	21,60°	0,363	24,15°	0,427	26,04°
	Itabirito Pobre Compacto	IPC	50-100 MPa	70	3,273	62,5	75	87,5	45,05°	2,592	46,26°	2,915	47,26°
	Itabirito Rico Brando	IRB	5-25 MPa	25	2,762	10	15	20	20,92°	0,388	23,42°	0,457	25,29°
Itabirito Rico Comapcto	IRC	50-100 MPa	70	3,647	62,5	75	87,5	44,45°	2,678	45,69°	3,004	46,70°	
Minério Marginal	Filito Ferruginoso	FIF	1-5 MPa	34	2,315	2	3	4	15,08°	0,214	17,21°	0,255	18,84°
	Itabirito Dolomítico	IDO	100-150 MPa	75	2,800	112,5	125	137,5	50,46°	4,677	51,01°	5,101	51,49°
	Itabirito Manganésífero	IMB	1-5 MPa	34	1,799	2	3	4	16,35°	0,186	18,59°	0,222	20,29°
Estéril	Brecha	BRC	50-100 MPa	42	4,700	62,5	75	87,5	34,99°	1,586	36,36°	1,711	37,53°
	Clorita Xisto	CLX	25-50 MPa	61	1,880	31,25	37,5	43,75	41,93°	1,053	43,25°	1,159	44,35°
	Filito	FIL	0,25-1 MPa	23	1,631	0,4375	0,625	0,8125	7,51°	0,058	8,55°	0,068	9,40°
	Laterita	LAT	0,25-1 MPa	23	1,971	0,4375	0,625	0,8125	6,91°	0,065	7,88°	0,077	8,68°
	Quartzito	QTZ	0,25-1 MPa	23	1,670	0,4375	0,625	0,8125	8,60°	0,072	9,78°	0,084	10,72°
	Rolado	ROL	25-50 MPa	27	2,200	31,25	37,5	43,75	31,37°	0,524	32,68°	0,562	33,80°
	Xisto Básico	XBA	1-5 MPa	50	1,837	2	3	4	19,72°	0,247	22,28°	0,295	24,20°
Xisto Básico	XBA	5-25 MPa	54	1,837	10	15	20	31,87°	0,524	34,92°	0,624	37,10°	

### 5.2.3 Campos Homogêneos

A definição dos campos homogêneos baseou-se no agrupamento das unidades geológicas com parâmetros de resistência semelhantes. Seis campos homogêneos foram definidos em função das variações dos parâmetros de resistência de cada unidade: campo HBR-HCP-IDO, campo CGA-IPC-IRC-CLX, campo BRC-ROL-XBA, campo HBA-IAF-IIB-IPB-IRB-XBA, campo FIF-IMB-IPB, e campo FIL-LAT-QTZ. As características de cada campo homogêneo são:

Campo HBR-HCP-IDO:

Cenário 1 – ângulo de atrito de  $48^{\circ}$  a  $50.5^{\circ}$  e coesão de 4.2 a 4.7 MPa;

Cenário 2 – ângulo de atrito de  $48.8^{\circ}$  a  $51^{\circ}$  e coesão de 4.5 a 5.1 MPa;

Cenário 3 – ângulo de atrito de  $49^{\circ}$  a  $51,5^{\circ}$  e coesão de 4.8 a 5.5 MPa.

Campo CGA-IPC-IRC-CLX:

Cenário 1 – ângulo de atrito de  $42.^{\circ}$  a  $45^{\circ}$  e coesão de 1 a 2.7 MPa;

Cenário 2 – ângulo de atrito de  $43^{\circ}$  a  $46^{\circ}$  e coesão de 1.2 a 3 MPa;

Cenário 3 – ângulo de atrito de  $44^{\circ}$  a  $47^{\circ}$  e coesão de 1.3 a 3.3 MPa.

Campo BRC-ROL-XBA:

Cenário 1 – ângulo de atrito de  $31^{\circ}$  a  $35^{\circ}$  e coesão de 0.5 a 1.6 MPa;

Cenário 2 – ângulo de atrito de  $32.7^{\circ}$  a  $36.4^{\circ}$  e coesão de 0.6 a 1.7 MPa;

Cenário 3 – ângulo de atrito de  $33.8^{\circ}$  a  $37.6^{\circ}$  e coesão de 0.6 a 1.8 MPa.

Campo HBA-IAF-IIB-IPB-IRB-XBA:

Cenário 1 – ângulo de atrito de  $19.8^{\circ}$  a  $22^{\circ}$  e coesão de 0.25 a 0.43 MPa;

Cenário 2 – ângulo de atrito de  $22.3^{\circ}$  a  $24.7^{\circ}$  e coesão de 0.3 a 0.5 MPa;

Cenário 3 – ângulo de atrito de  $24.2^{\circ}$  a  $26.6^{\circ}$  e coesão de 0.33 a 0.56 MPa.

Campo FIF-IMB-IPB:

Cenário 1 – ângulo de atrito de  $13^{\circ}$  a  $16.3^{\circ}$  e coesão de 0.18 a 0.21 MPa;

Cenário 2 – ângulo de atrito de  $14.8^{\circ}$  a  $18.6^{\circ}$  e coesão de 0.22 a 0.26 MPa;

Cenário 3 – ângulo de atrito de  $16.2^{\circ}$  a  $20.3^{\circ}$  e coesão de 0.25 a 0.29 MPa.

Campo FIL-LAT-QTZ:

Cenário 1 – ângulo de atrito de 6.9° a 8.6° e coesão de 0.06 a 0.07 MPa;

Cenário 2 – ângulo de atrito de 7.9° a 9.8° e coesão de 0.07 a 0.08 MPa;

Cenário 3 – ângulo de atrito de 8.7° a 10.7° e coesão de 0.08 a 0.09 MPa.

### **5.3 Análise Cinemática**

As descontinuidades presentes no maciço rochoso da Mineração Casa de Pedra foram levantadas durante o mapeamento geológico-estrutural. A região sudoeste do Quadrilátero Ferrífero sofreu quatro eventos tectônicos (**E1**, **Ex2**, **E3**, e **Ex4**) que foram responsáveis pela geração de dobras, foliações, falhamentos, zonas de cisalhamento e fraturamento do maciço rochoso. As principais estruturas geológicas e suas características no maciço rochoso de Casa de Pedra são:

#### **Dobras**

Na Mineração Casa de Pedra o bandamento das rochas do Supergrupo Minas encontram-se bastante dobrados, como dobras em bainha, dobras isoclinais apertadas e dobras parasíticas de diversas dimensões, associadas à fase compressiva E1. Associados a fase compressiva E3, ocorrem dobras do tipo Kink Bands, em regime

compressivo raso com dimensões métricas e direção E-W. Um terceiro tipo de dobramento associado à interferência da fase E3 na fase E1, ocorre na forma de dobras simétricas abertas de comprimento de onda de centenas de metros (Formato de Concha).

As dobras em bainha estão associadas as Nappes de Ouro Branco e Ouro Preto (ENDO 1997, ALMEIDA 2003). Elas tem dimensões da ordem de alguns quilômetros, a dobra associada à Nappe de Ouro Preto foi identificada através das relações de acamamento e foliação. O principal indicio da dobra, na cava do Corpo Principal, são os flancos invertidos caracterizados pela sobreposição dos Itabiritos Dolomíticos, Formação Gandarela, sobre os itabiritos e hematitas da Formação Cauê; e a sobreposição dos quartzitos Moeda sobre os filitos do Grupo Piracicaba, no vale do Esmeril. Além desses indícios a relação do acamamento mergulhando mais do que a foliação, indica a posição de flanco invertido dessas rochas.

O segundo pulso da fase compressiva E1, gerou dobras isoclinais apertadas, de dimensões da ordem de centenas de metros associadas a elas dobras parasíticas métricas. O bandamento das rochas do Supergrupo Minas, fase D2 localizados acima da coordenada N 7.736.200, tem atitude média (068/48) variando de 030 a 170/85 a 30 (isto é, direção em torno de NW-SE com mergulho médio para NE). Sua atitude média é paralela a atitude média da foliação o que caracteriza uma estruturação do tipo L-Tectonito. O diagrama do StereoNett mostra uma guirlanda com duas concentrações de pontos

polares, uma relativa ao posicionamento da charneira (atitude média, 120/42), e outra relativa aos flancos normais e invertidos (atitude média, 068/48). No Corpo Principal a estruturação é do tipo S-Tectonito, predominando a charneira com atitude 120/42. No Corpo Oeste a estruturação é do tipo L-Tectonito, sendo caracterizado pela presença de um homoclinal de flanco invertido rompido, cuja atitude média é de 059/66.

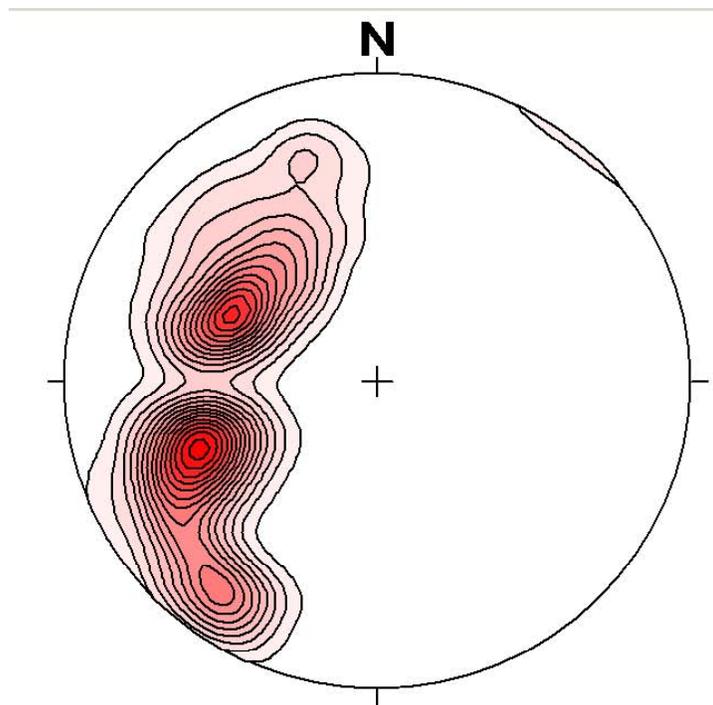


Figura5.8: Estereograma dos pontos polares da dobra D2 da fase E1.

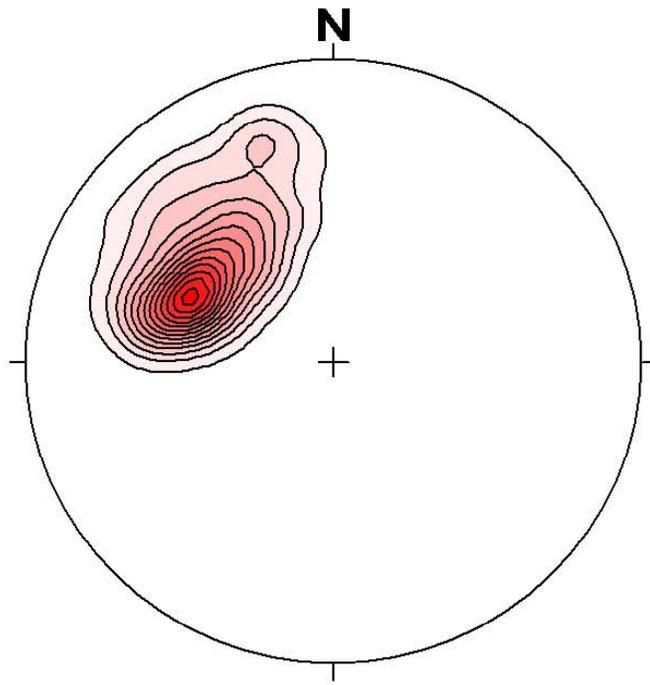


Figura5.9: Estereograma dos pontos polares da charneira fase E1.

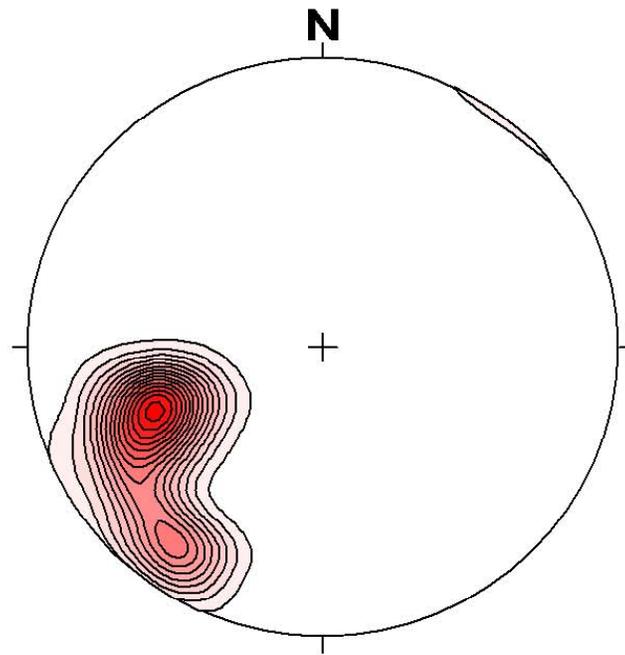


Figura5.10: Estereograma dos pontos polares do flanco da fase E1.

O bandamento composicional das rochas do Grupo Piracicaba, Grupo Sabará e Formação Nova Lima, localizados abaixo da coordenada N 7.736.200, evidenciam a presença do segundo evento compressivo E3. Sua atitude média tem caimento na direção (171/84) variando de 076 a 358/89 a 30 (isto é, direção em torno de ENE-WSW com mergulho médio subvertical para S). Sua atitude média indica o maior número de amostragem na Zona de Cisalhamento Transcorrente do Corpo Principal. O diagrama do StereoNett mostra três concentrações de ponto polares, duas delas são relativas a transcorrência da Zona de Cisalhamento com direção E-W e mergulho subvertical, a outra é relativa a estruturação de transpressão, com rampa frontal (reversa) cuja orientação é de 086/42. No Corpo Oeste a zona de cisalhamento tem característica de zona rasa com formação de dobras do tipo Kink Band, com mesmas atitudes da zona mais profunda do Corpo Principal.

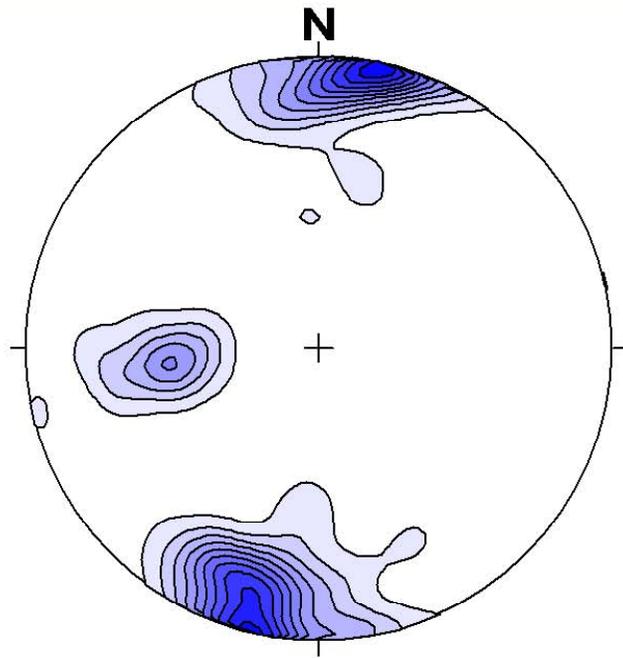


Figura5.11: Estereograma dos pontos polares da dobra Kink da fase E3.

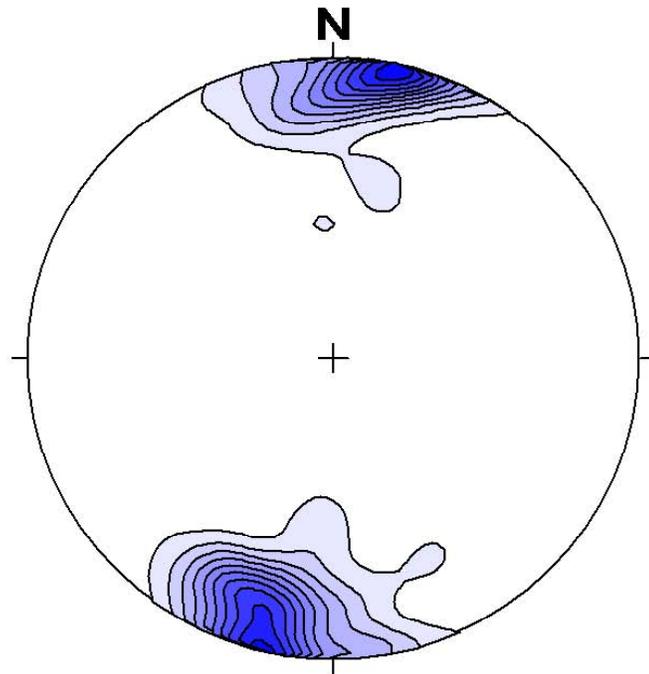


Figura5.12: Estereograma dos pontos polares da Zona Transcorrente da fase E3.

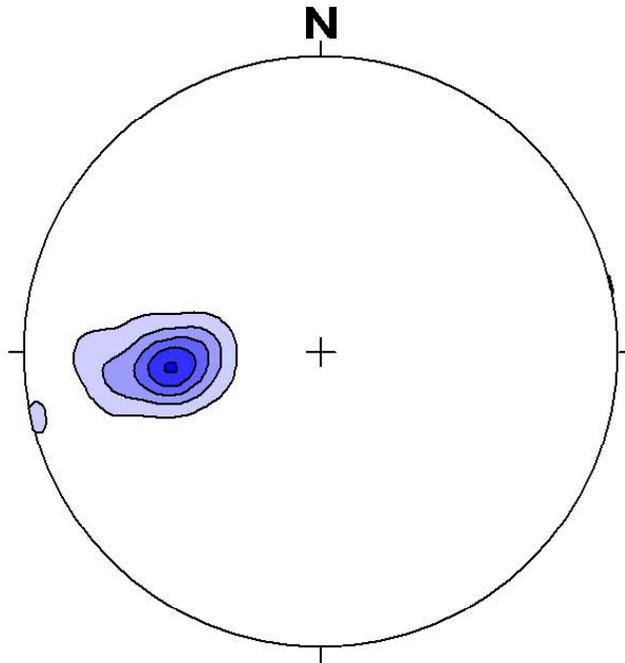


Figura5.13: Estereograma dos pontos polares da Zona Transpressiva da fase E3.

As rochas do Supergrupo Minas que ocorrem abaixo da coordenada E 612.800, mais precisamente no Corpo Oeste e no Vale do Esmeril, mostram um padrão de dobramento aberto, simétrico com grandes comprimentos de onda. Esse dobramento está associado a interferência da fase E3 sobre a fase E1, e tem como característica uma dobra simétrica com vergência para E. Sua atitude média tem caimento na direção (090/48) variando de 035 a 285/85 a 35 (isto é, direção em torno de N-S com mergulho médio de 48° para E). O diagrama do EstereoNett mostra uma dispersão dos valores próximo a média o que indica o arqueamento dos planos devido a interferência da fase E3 sobre a fase E1.

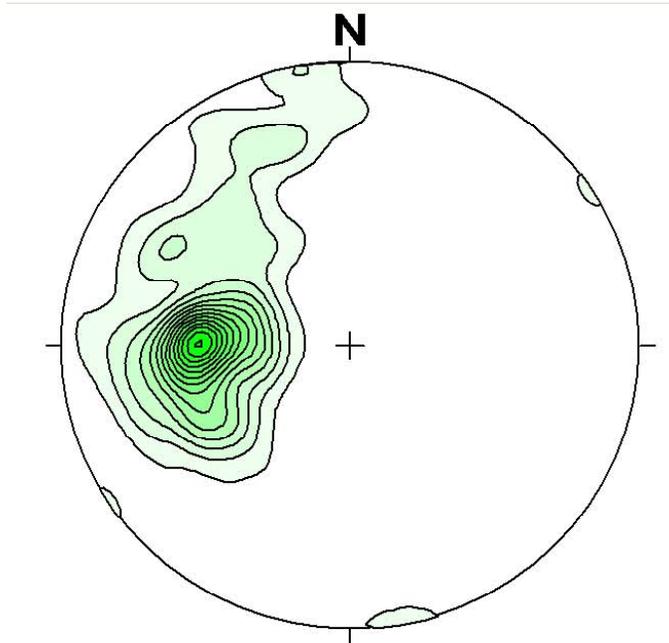


Figura5.14: Estereograma dos pontos polares da interferência da fase E3 sobre a E1.

### Foliação

A foliação está representada na área pelos planos de clivagem contínua, xistosidade, e foliação milonítica. A clivagem contínua ocorre na posição dos planos principais de maior tensão. A análise cinemática relativa aos planos de clivagem juntamente com as juntas indicam a posição dos planos principais relativos aos eventos compressivos E1 e E3. A xistosidade ocorre associada ao plano axial dos mesmos eventos compressivos citados acima e está paralela à clivagem contínua do plano principal maior. A foliação milonítica ocorre preferencialmente nas regiões de falha de cavalgamento, fase E1, e na falha transcorrente, fase E3.

A clivagem continua encontra-se desenvolvida em todas as litologias

associadas ao Supergrupo Minas. Ela apresenta vários padrões de espaçamento que estão diretamente relacionados à difração, devido as diferenças de densidade das litologias. Nos filitos o padrão é de clivagem contínua, centimétrica, nos filitos Nova Lima, Batatal, Piracicaba e Sabará. Nos quartzitos o padrão é de clivagem de fratura contínua, decimétrica e sem lineação mineral. Nos itabiritos das formações Cauê e Gandarela o padrão é de clivagem contínua com maior espaçamento nas litologias alteradas e menor espaçamento nas litologias compactas. A atitude média da fratura de clivagem da fase E1, tem caimento na direção (045/64) variando de 028 a 063/85 a 25 (isto é, direção em torno de NW-SE com mergulho médio de 64° para NE). A Fratura de clivagem da fase E3, tem caimento na direção (087/76) variando de 078 a 105/90 a 25 (isto é, direção em torno de N-S com mergulho médio de 76° para E).

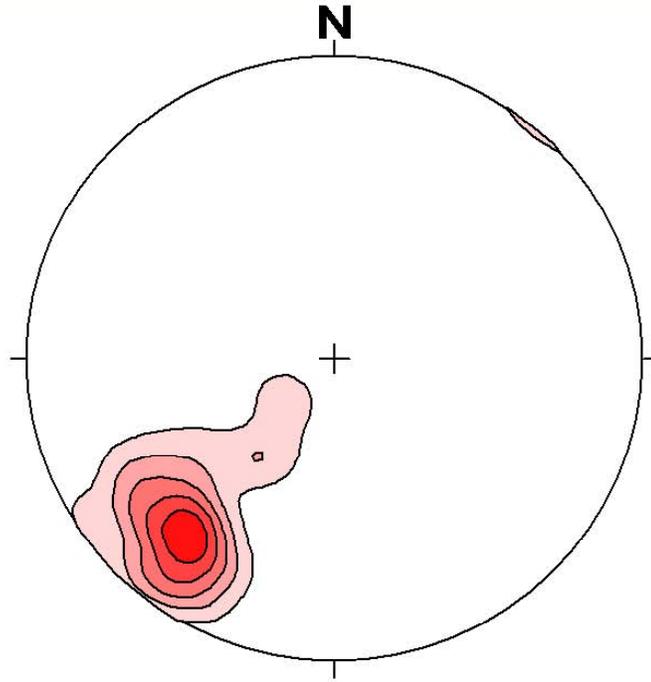


Figura5.15: Estereograma dos pontos polares da Fratura família E11.

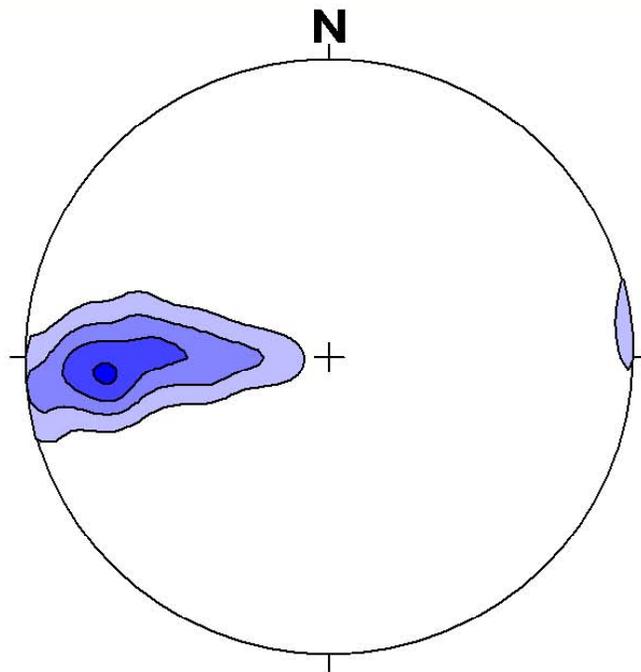


Figura5.16: Estereograma dos pontos polares da Fratura família E31.

A xistosidade encontra-se melhor desenvolvida nos quartzitos Moeda e nos xistos do Grupo Sabará, nelas a foliação é anastomosada, contem dois planos (fase E1 e E3), ela envolve grãos e agregados de quartzo. Nos Itabiritos da Formação Cauê a foliação é caracterizada por planos discretos de foliação axial da fase E1. A atitude média da foliação plano axial da fase E1, tem caimento na direção (048/60) variando de 020 a 065/68 a 20 (isto é, direção em torno de NW-SE com mergulho médio de 60° para NE). A foliação da fase E3, tem caimento na direção (094/42) variando de 077 a 095/66 a 25 (isto é, direção em torno de N-S com mergulho médio de 42° para E).

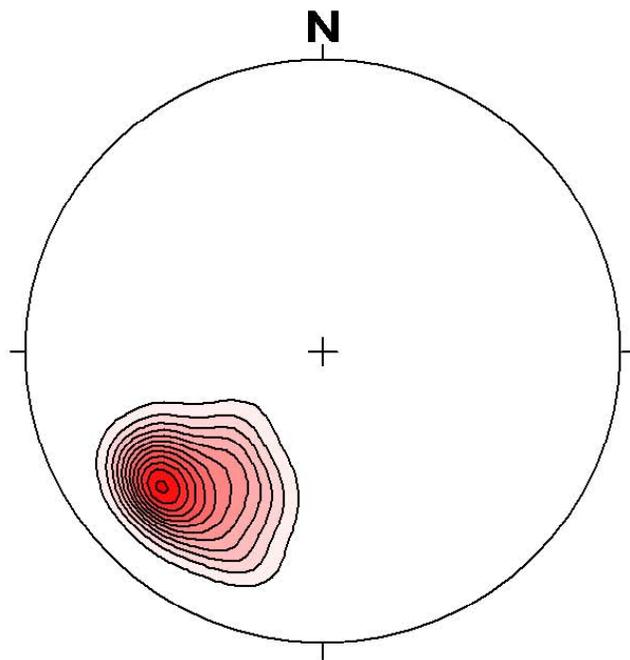


Figura5.17: Estereograma dos pontos polares da Foliação fase E1.

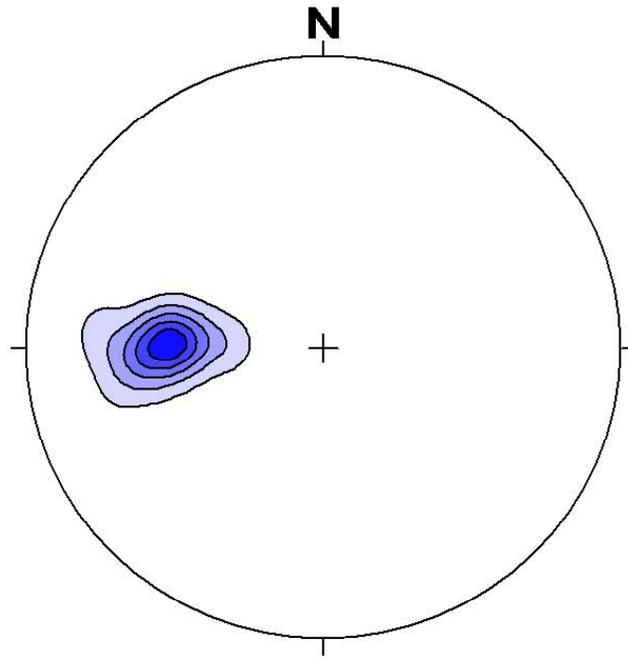


Figura5.18: Estereograma dos pontos polares da Foliação fase E3.

A foliação milonítica está representada pela zona de cisalhamento da fase E3 e pelas bases das nappes de empurrão da fase E1. Ela está caracterizada pela presença de Filito Ferruginoso contendo porfiros delta, com estiramento 5 vezes maior do que a espessura do porfiro, no sul do Corpo Principal; por agregados de quartzo com sombras de pressão em matriz fina milonítica, na nappe dos quartzitos Moeda, na base da Serra do Batateiro; e pela foliação anastomosada com lineação de estiramento, nos xistos básicos do Nordeste do Corpo Principal. Não foram coletados muitos dados, mas a atitude média da foliação milonítica é de 104/25, compatível com um regime de cavalgamento cujas falhas são de baixo mergulho.

Lineações

As lineações mais desenvolvidas, na área do modelo da Jazida de Casa de Pedra, são as de interseção, as minerais e as de estiramento. Subordinadamente também ocorre orientação de cristais prismáticos de quartzo recristalizados e agregados de quartzo alongados, orientados em rocha com xistosidade alta.

A Lineação de Interseção é a mais bem desenvolvida na área, ocorrendo principalmente nos itabiritos da Formação Cauê. A lineação mais proeminente é a de interseção do plano axial com o bandamento na região de charneira do Corpo Principal, associada a fase E1. Nas regiões de flanco a lineação de interseção reflete a interseção das foliações S1 e S3, das fases E1 e E3.

As lineações minerais dos itabiritos são visíveis em alguns planos de foliação axial onde se encontram mais proeminentes, sendo caracterizada por cristais especularíticos, prismáticos e orientados. Nos Xistos do Grupo Sabará que ocorrem no vale do esmeril a lineação mineral é caracterizada pela orientação de cristais prismáticos de andalusita (?).

A lineação de estiramento está mais proeminente nos xistos básicos do Sudeste do Corpo Principal, sendo caracterizada por slicken-sides de mineral micáceo e talco. Nos depósitos de diamictito basal e nas lateritas, também ocorrem lineação de estiramento nos planos de falhas normais, associados a fase distensiva Ex4.

A lineação de interseção tem orientação média (113/36), e caracteriza a direção do eixo das dobras D1 e D2 da fase

compressiva E1, a lineação mineral que ocorre nos xistos do Grupo Sabará (vale do Esmeril), tem caimento em direção semelhante. A lineação de estiramento tem caimento médio na direção (094/48) e está associada a fase compressiva E3. Poucos dados de lineação mineral foram coletados nos itabiritos, porém no talude Nordeste do Corpo Principal a lineação tem caimento na direção (120/35), que corresponde a movimentação da charneira da fase E1, no eixo de deformação de menor tensão.

#### Juntas

As juntas estão divididas em oito famílias. As três primeiras estão associadas a fase compressiva E1 e as três últimas estão associadas à fase compressiva E3. Outras duas famílias ocorrem com direção média (125/72) e (189/84), essas famílias não tem correlação com as fases compressivas. As famílias associadas à fase compressiva E1 tem caimento médio na direção (045/64), Família E11; na direção (141/52), Família E12; e na direção (300/48), Família E13. As siglas E11 a E13 são referentes a fase E1 planos de deformações  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ . As famílias associadas à fase compressiva E3 tem caimento médio na direção (087/76), Família E31; na direção (266/42), Família E32; e na direção (355/72), Família E33. A siglas E31 a E33 seguem a mesma lógica para a fase compressiva E3.

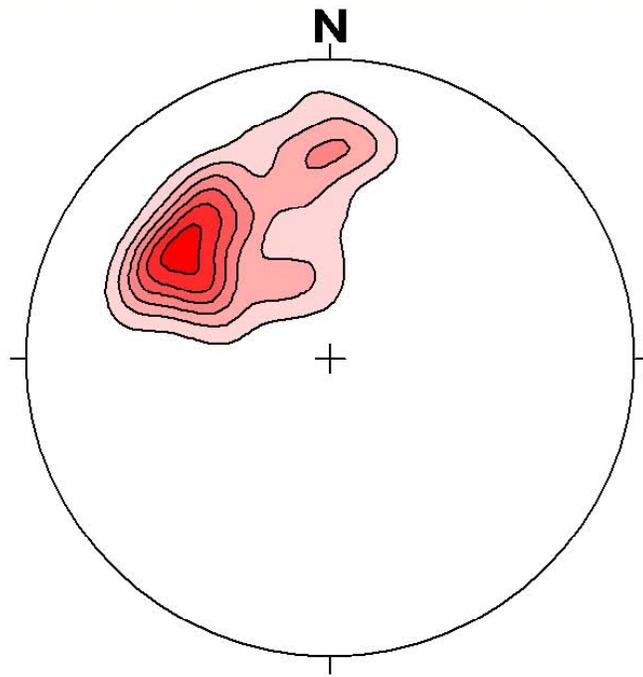


Figura5.19: Estereograma dos pontos polares da Fratura familia E12.

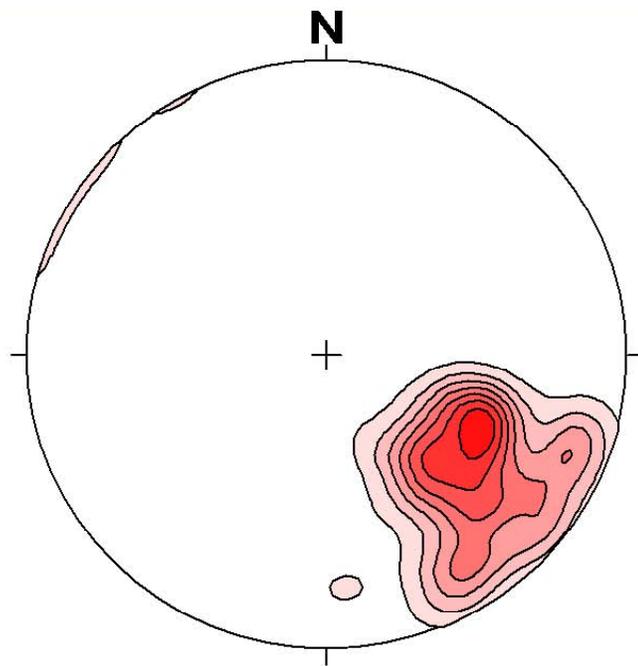


Figura5.20: Estereograma dos pontos polares da Fratura familia E13.

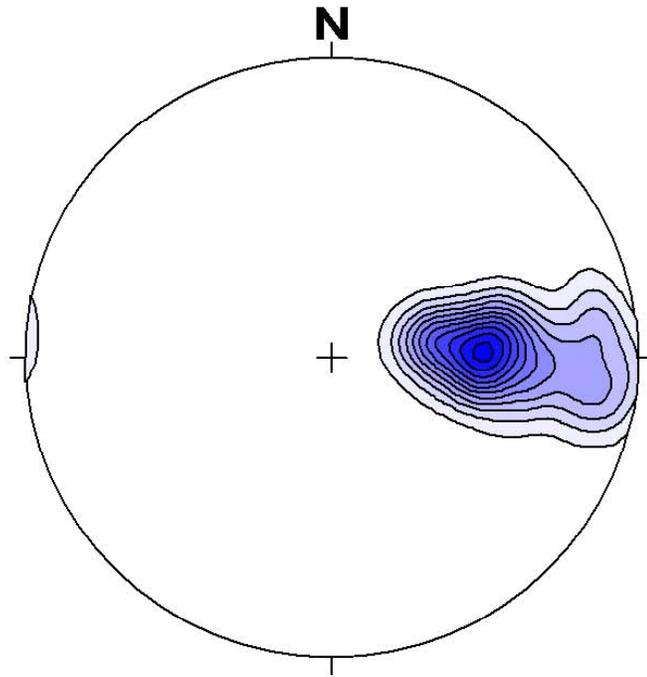


Figura5.21: Estereograma dos pontos polares da Fratura família E32.

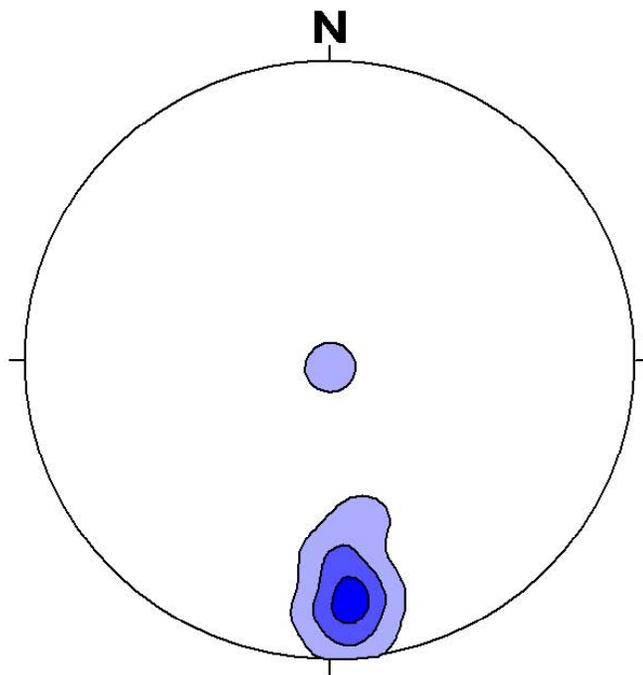


Figura5.22: Estereograma dos pontos polares da Fratura família E33.

As juntas das famílias E11 e E31 são clivagens de fratura contínuas, geradas em regime compressivo, na direção do plano principal. As demais famílias de juntas de origem compressiva, E12, E13, E32 e E33, são ortogonais entre si e ortogonais com o plano de foliação. As juntas são mais proeminentes nas litologias mais compactas, e têm maior persistência quando ortogonais à direção de maior esforço (E12 e E32).

As juntas tem espaçamento menor, da ordem de centímetros, nas litologias menos competentes como os itabiritos e os filitos. Nas litologias mais resistentes como os quartzitos e quartzo xistos o espaçamento das juntas é maior, da ordem de decímetros. Essa padrão é reflexo da diferença de densidade entre as litologias, o que ocasiona difração das ondas que geraram a compressão do maciço.

#### Zona de Cisalhamento

Ocorrem varias zonas de cisalhamento na área da jazida que são reflexo das direções de deformação associadas às fases compressivas E1 e E3.

A primeira zona ocorre na base das falhas de empurrão que geraram as foliações S1 e S2, coaxiais, com vergência para SW. A zona de cisalhamento que ocorre na base da dobra em bainha da Nappe de Ouro Preto no vale do Esmeril, que gerou a foliação S1, é caracterizada por uma foliação milonítica (matriz fina) com agregados de quartzo Delta (sombras de pressão). Essa zona de

cisalhamento passa a uma xistosidade menos proeminente nos quartzitos Moeda, a medida que se afasta do contato tectônico. Sistemas de falhamento de empurrão de menor magnitude ocorrem no Corpo Norte e no Corpo Principal, sendo caracterizado pela foliação e milonitização do Xisto Básico posicionado na soleira do empurrão da fase E1, que gerou a foliação S2 e o dobramento D2.

A segunda zona de cisalhamento ocorre no sul das cavas do Corpo Principal e Oeste, e estão associadas a fase deformacional E3, com direção E-W. A zona ocorre como uma faixa transcorrente com rampa frontal reversa, localmente desenvolvida em zona de transpressão. A zona de cisalhamento tem direção E-W e mergulho subvertical para S. A rocha característica da zona de transcorrência é o Filito Ferruginoso, com porfiros sigmas indicando movimento sinistral. No Corpo Oeste a zona é caracterizada por um movimento sinistral raso, com desenvolvimento de dobras do tipo Kink Bands.

#### Falhas

A falha de maior expressão que ocorre na área do modelo é uma falha de empurrão que coloca as rochas da base do Supergrupo Minas (SGM) sobre as rochas do topo do SGM, próximo ao vale do Esmeril. Ela foi gerada na fase E1 e está associada à geração da foliação S1 e dobra D1. Segundo ENDO 2003, essa falha está associada a uma dobra recumbente de quilômetros de amplitude gerada pela Nappe de Ouro Preto. Falhas de empurrão de menor magnitude ocorrem nos

Corpos Norte e Principal e estão associadas à geração da foliação S2 e dobramento D2, ambos coaxiais com a foliação S1 e dobramento D1. Um último sistema de falhamento, com geração de grabens, ocorre no Corpo Principal, tendo sido gerado na fase Ex4 de caráter extensional.

A falha da Nappe de Ouro Preto ocorre no Vale do Esmeril, sua característica principal é a repetição da seqüência estratigráfica e a inversão das camadas adjacentes. A falha coloca as rochas da Formação Moeda sobre os xistos do Grupo Sabará, próximo ao vale do Esmeril. A lineação de estiramento na soleira da falha tem direção de caimento (074/25). O baixo mergulho da foliação milonítica desenvolvida na base da falha é um fato congruente com as atitudes de planos de cavalgamento.

As falhas de cavalgamento do Corpo Norte e Principal foram responsáveis pela geração das dobras D2, associadas aos eixos de hematitas. Ela está representada pela zona de cisalhamento que passa pelos xistos básicos a Nordeste da jazida de Casa de Pedra. O sistema de falhamento indica uma série de embricamentos a Nordeste do Corpo Principal, que gerou um dobramento isoclinal sem raiz, com caimento de eixo na direção 120/45. A direção do eixo paralela ao traço dos litotipos e da falha de empurrão, coaduna com a hipótese de dobramento isoclinal.

No sul do Corpo Principal ocorre um sistema de falhamento do tipo graben, com falhas normais de caimento para S e E. As falhas foram

formadas em um sistema lístrico e foram preenchidas por diamictitos basais e lateritas. O graben tem dimensão da ordem de 200 metros de espessura. O preenchimento do graben pelos diamictitos gerou uma subsidência da bacia com reativação das falhas normais e geração de sistema de fraturamento associado nas lateritas. Essa fase está associada a distensão Ex4.

### **5.3.1 Zoneamento**

As cavas foram divididas em nove setores considerando-se a orientação das descontinuidades em relação ao talude como definido na etapa da classificação do maciço. O zoneamento foi definido em função da orientação dos taludes típicos em cada um dos setores e da predominância dos materiais definidos como campo homogêneo. A seguir estão sintetizadas as principais características de cada zona:

Setor 1 – predomínio de itabiritos pobres IPB, com ângulo de atrito mínimo de  $19.8^{\circ}$  a  $22^{\circ}$  e coesão mínima de 0.25 a 0.43 MPa. A anisotropia principal é o bandamento composicional com orientação média de 086/42, correspondente à fase E3. O talude típico de maior altura tem orientação 058/35 e altura 146;

Setor 2 – predomínio de itabiritos pobres IPB e hematitas brandas HBA, com ângulo de atrito mínimo de  $19.8^{\circ}$  a  $22^{\circ}$  e coesão mínima de 0.25 a 0.43 MPa. A anisotropia principal é o bandamento

composicional com orientação média de 090/48, correspondente à interferência da fase E3 sobre a fase E1. O talude típico de maior altura tem orientação 090/37 e altura 208;

Setor 3 – predomínio de itabiritos pobres IPB e hematitas compacta HCP, com ângulo de atrito mínimo de 19.8° a 22° e coesão mínima de 0.25 a 0.43 MPa para IPB e ângulo de atrito de 48° a 50.5° e coesão de 4.2 a 4.7 MPa para HCP. A anisotropia principal é a foliação com orientação média de 068/48, correspondente à fase E1. O talude típico de maior altura tem orientação 110/36 e altura 280;

Setor 4 – predomínio de hematitas compacta HCP e hematitas brandas HBA, com ângulo de atrito mínimo de 19.8° a 22° e coesão mínima de 0.25 a 0.43 MPa para HBA e ângulo de atrito de 48° a 50.5° e coesão de 4.2 a 4.7 MPa para HCP. A anisotropia principal é a foliação com orientação média de 068/48, correspondente à fase E1. O talude típico de maior altura tem orientação 176/37 e altura 240;

Setor 5 – predomínio de itabiritos pobres compactos IPC, com ângulo de atrito mínimo de 42.° a 45° e coesão mínima de 1 a 2.7 MPa. A anisotropia principal é o bandamento composicional com orientação média de 090/48, correspondente à interferência da fase E3 sobre a fase E1. O talude típico de maior altura tem orientação

260/35 e altura 143;

Setor 6 – predomínio de itabiritos pobres brandos IPB e itabiritos pobres compactos IPC, com ângulo de atrito mínimo de 19.8° a 22° e coesão mínima de 0.25 a 0.43 MPa para IPB e ângulo de atrito de 42.° a 45° e coesão de 1 a 2.7 MPa para IPC. A anisotropia principal é o bandamento composicional da charneira com orientação média de 120/42, correspondente à fase E1. O talude típico de maior altura tem orientação 154/30 e altura 300;

Setor 7 – predomínio de hematita branda e xisto básico XBA, com ângulo de atrito mínimo de 19.8° a 22° e coesão mínima de 0.25 a 0.43 MPa para HBA e ângulo de atrito de 31° a 35° e coesão de 0.5 a 1.6 MPa para XBA. A anisotropia principal é a foliação com orientação média de 048/60, correspondente à fase E1. O talude típico de maior altura tem orientação 212/32 e altura 390;

Setor 8 – predomínio de clorita xisto CLX e laterita LAT, com ângulo de atrito mínimo de 42.° a 45° e coesão mínima de 1 a 2.7 MPa para CLX e ângulo de atrito de 6.9° a 8.6° e coesão de 0.06 a 0.07 MPa para LAT. A anisotropia principal é a foliação com orientação média de 094/42, correspondente à fase E3. O talude típico de maior altura tem orientação 305/34 e altura 312;

Setor 9 – predomínio de itabiritos pobres IPB e hematitas brechadas HBR, com ângulo de atrito mínimo de  $19.8^{\circ}$  a  $22^{\circ}$  e coesão mínima de 0.25 a 0.43 MPa. A anisotropia principal é a foliação com orientação média de 094/42, correspondente à fase E3. O talude típico de maior altura tem orientação 042/30 e altura 182.

### **5.3.2 Análise Cinemática**

A análise cinemática foi realizada em cada um dos nove setores da mina. Na análise foi determinada a concentração máxima dos pólos da descontinuidade principal e a partir do seu centro, foi representado o grande círculo correspondente. Na rede de Schmidt-Lambert foi representado o grande círculo do talude, da descontinuidade e o cone de atrito. No deslizamento planar três condições devem ocorrer: o ângulo de mergulho da descontinuidade deve ser maior do que o ângulo de atrito do plano; a direção da descontinuidade deverá afastar-se de no máximo  $20^{\circ}$  em relação à direção da face do talude; e a face do talude deverá ter um mergulho maior do que o mergulho da descontinuidade. A seguir estão sintetizadas as principais características analisadas em cada zona:

Setor 1 – na representação estereográfica é possível notar que o setor 1 é estável para a estrutura analisada. O rumo de mergulho da descontinuidade não intercepta a área hachurada que é potencialmente instável. A única condição desfavorável para este setor é o mergulho da descontinuidade maior do que o ângulo de atrito. As condições favoráveis são a face do talude com ângulo menor do que o ângulo da descontinuidade e o afastamento entre os rumos dos planos ser maior do que  $20^\circ$ . A figura 5.23 representa o diagrama do setor 1.

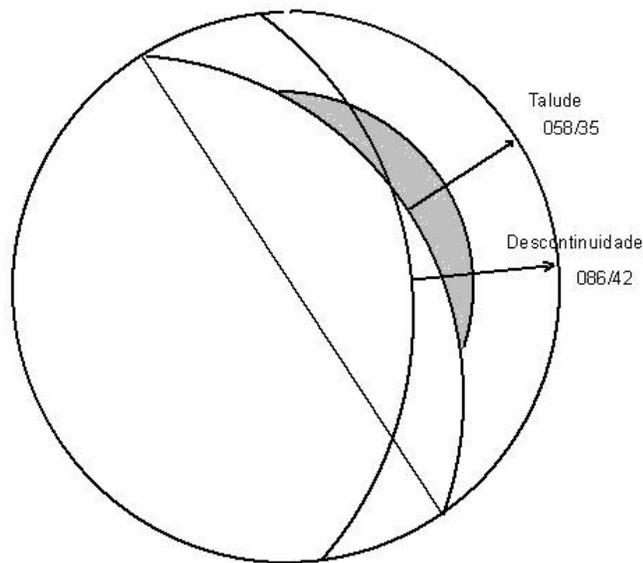


Figura 5.23: Análise cinemática do setor 1.

Setor 2 – na representação estereográfica é possível notar que o setor 2 é estável para a estrutura analisada. O rumo de mergulho da descontinuidade não intercepta a área hachurada que é potencialmente instável. As condições desfavoráveis para este setor são: o mergulho da descontinuidade maior do que o ângulo de atrito e o rumo dos planos estarem no mesmo sentido. A condição favorável é a face do talude com ângulo menor do que o ângulo da descontinuidade. A figura 5.24 representa o diagrama do setor 2.

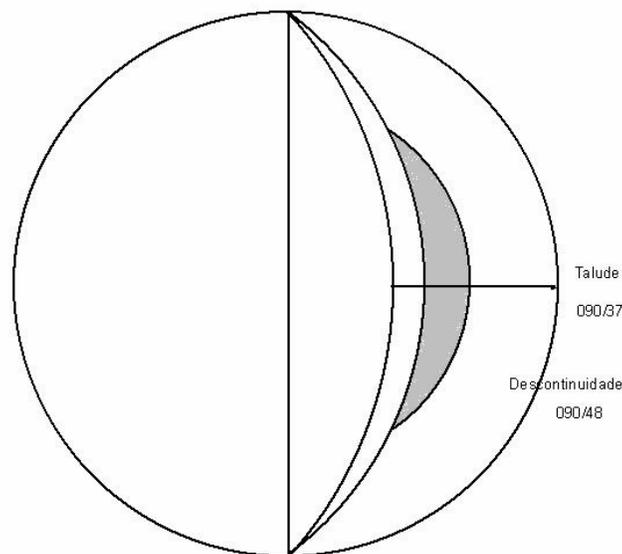


Figura 5.24: Análise cinemática do setor 2.

Setor 3 – na representação estereográfica é possível notar que o setor 3 é estável para a estrutura analisada. O rumo de mergulho da descontinuidade não intercepta a área hachurada que é potencialmente instável. A única condição desfavorável para este setor é o mergulho da descontinuidade maior do que o ângulo de atrito. As condições favoráveis são a face do talude com ângulo menor do que o ângulo da descontinuidade e o afastamento entre os rumos dos planos ser maior do que  $20^\circ$ . A figura 5.25 representa o diagrama do setor 3.

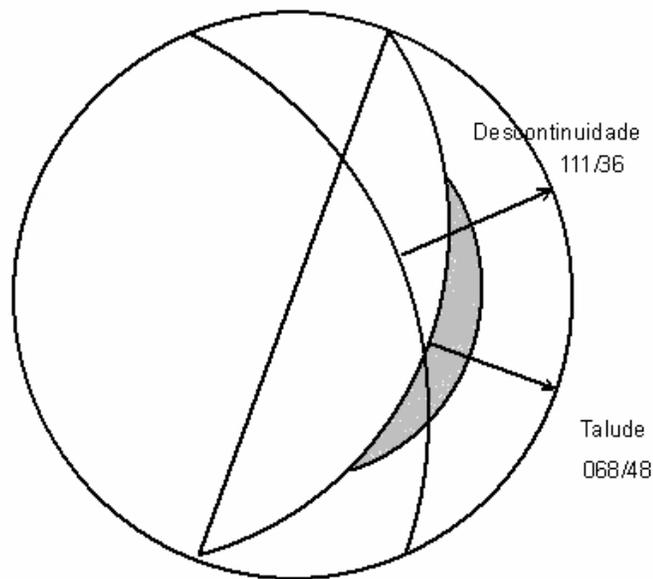


Figura 5.25: Análise cinemática do setor 3.

Setor 4 – na representação estereográfica é possível notar que o setor 4 é estável para a estrutura analisada. O rumo de mergulho da descontinuidade não intercepta a área hachurada que é potencialmente instável. A única condição desfavorável para este setor é o mergulho da descontinuidade maior do que o ângulo de atrito. As condições favoráveis são a face do talude com ângulo menor do que o ângulo da descontinuidade e o afastamento entre os rumos dos planos ser maior do que  $20^\circ$ . A figura 5.26 representa o diagrama do setor 4.

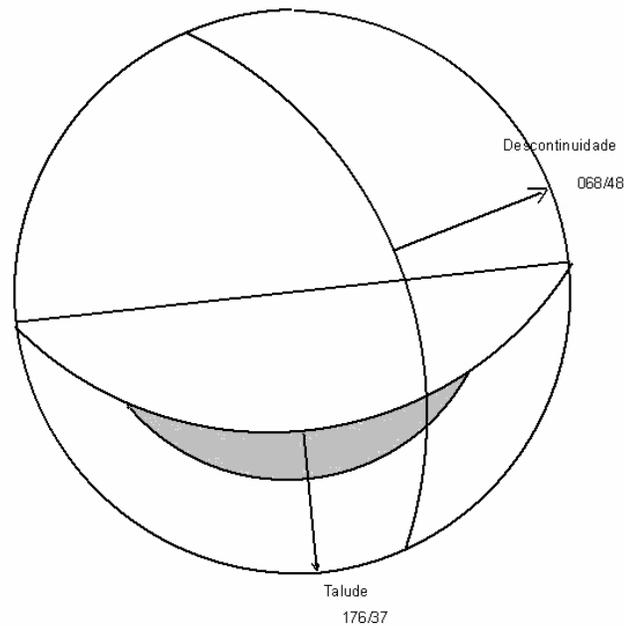


Figura 5.26: Análise cinemática do setor 4.

Setor 5 – na representação estereográfica é possível notar que o setor 5 é estável para a estrutura analisada no caso de ruptura planar. O rumo de mergulho da descontinuidade não intercepta a área hachurada que é potencialmente instável. Neste caso o talude é potencialmente instável para tomamentos de blocos, pois os planos mergulham em sentidos opostos. A figura 5.27 representa o diagrama do setor 5.

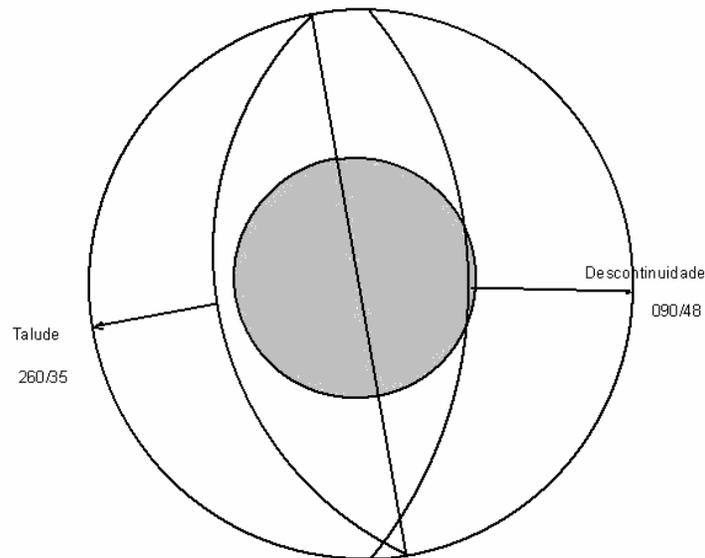


Figura 5.27: Análise cinemática do setor 5.

Setor 6 – na representação estereográfica é possível notar que o setor 6 é estável para a estrutura analisada. O rumo de mergulho da descontinuidade não intercepta a área hachurada que é potencialmente instável. A única condição desfavorável para este setor é o mergulho da descontinuidade maior do que o ângulo de atrito. As condições favoráveis são a face do talude com ângulo menor do que o ângulo da descontinuidade e o afastamento entre os rumos dos planos ser maior do que  $20^\circ$ . A figura 5.28 representa o diagrama do setor 6.

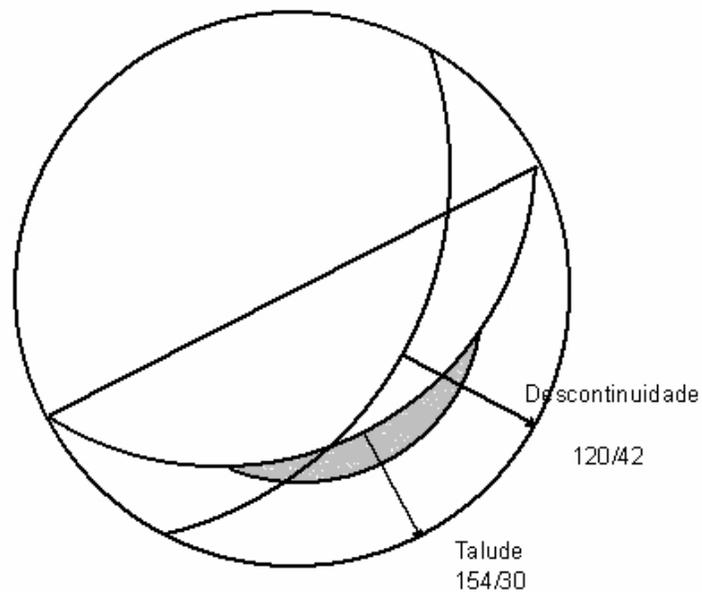


Figura 5.28: Análise cinemática do setor 6.

Setor 7 – na representação estereográfica é possível notar que o setor 7 é estável para a estrutura analisada. O rumo de mergulho da descontinuidade não intercepta a área hachurada que é potencialmente instável. Neste caso o talude é potencialmente instável para tomamentos de blocos, pois os planos mergulham em sentidos opostos. A figura 5.29 representa o diagrama do setor 7.

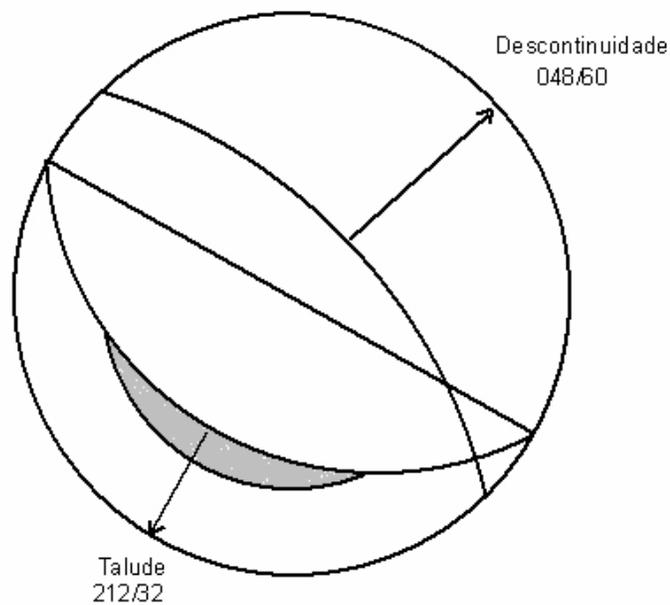


Figura 5.29: Análise cinemática do setor 7.

Setor 8 – na representação estereográfica é possível notar que o setor 8 é estável para a estrutura analisada. O rumo de mergulho da descontinuidade não intercepta a área hachurada que é potencialmente instável. Neste caso o talude é potencialmente instável para tomamentos de blocos, pois os planos mergulham em sentidos opostos. A figura 5.30 representa o diagrama do setor 8.

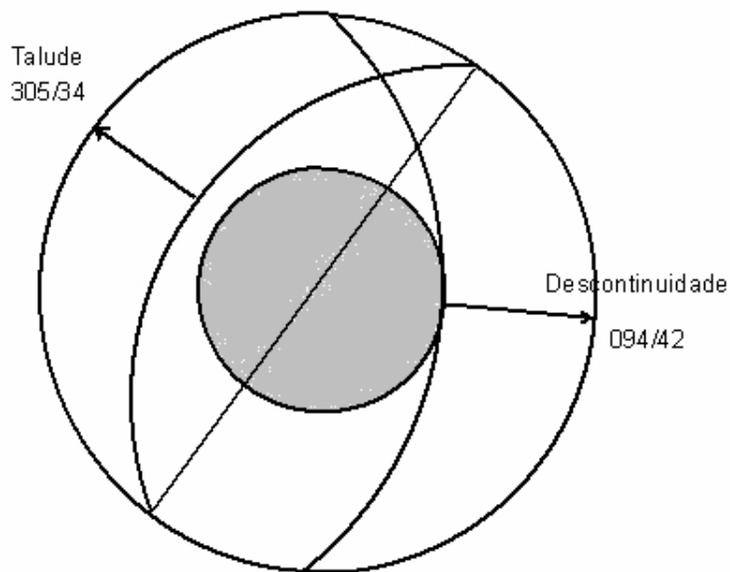


Figura 5.30: Análise cinemática do setor 8.

Setor 9 – na representação estereográfica é possível notar que o setor 9 é estável para a estrutura analisada. O rumo de mergulho da descontinuidade não intercepta a área hachurada que é potencialmente instável. A única condição desfavorável para este setor é o mergulho da descontinuidade maior do que o ângulo de atrito. As condições favoráveis são a face do talude com ângulo menor do que o ângulo da descontinuidade e o afastamento entre os rumos dos planos ser maior do que  $20^\circ$ . A figura 5.31 representa o diagrama do setor 9.

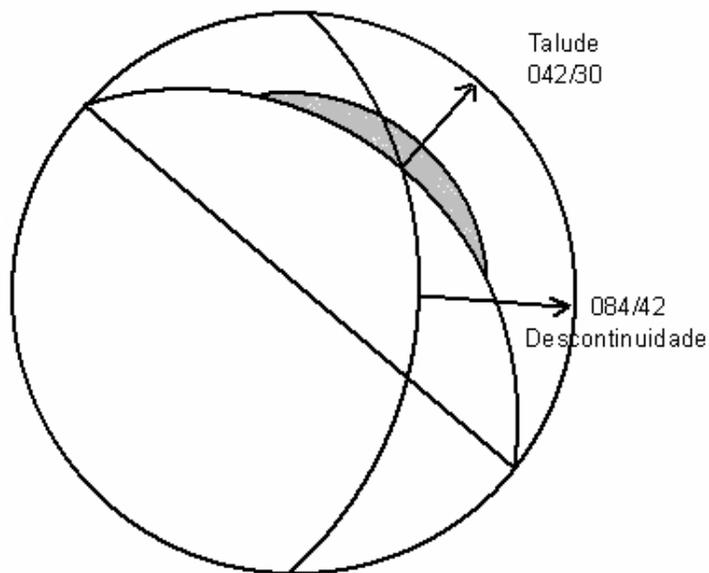


Figura 5.31: Análise cinemática do setor 9.



## **CAPÍTULO 6**

---

### **6 DISCUSSÕES DOS DADOS COLETADOS E PRODUZIDOS**

Neste capítulo serão discutidos os principais aspectos e influência de cada resultado gerado no capítulo 5. Na classificação geomecânica foram identificados os principais pesos e a influência deles na classificação final do maciço rochoso. Na determinação dos parâmetros de resistência do maciço foi discutido o efeito da imprecisão da classificação de campo para a obtenção do parâmetro utilizando o critério de Hoek-Brown. Na análise cinemática foi abordada a importância da identificação das estruturas dominantes e a principal condição que satisfaz o quesito segurança de um talude escavado em material rochoso.

#### **6.1 Mapeamento Geotécnico**

Após o tratamento dos dados e do mapeamento geotécnico foram identificados alguns aspectos característicos da aplicação do método na Mineração de Ferro da Companhia Siderúrgica Nacional. Os principais aspectos sobre a utilização do RMR para classificação do maciço de itabiritos estão resumidos a seguir:

Na classificação RMR o peso dado à resistência/alteração do material reflete bem a faixa de resistência à compressão simples das litologias presentes na Mineração Casa de Pedra. Durante o mapeamento geotécnico foi possível notar uma correlação entre a presença de minerais hidratados e argilosos com o aumento da coesão das litologias. Os materiais classificados na mina como minérios marginais são mais coesos e possuem maior quantidade do elemento alumínio que é um reflexo da presença de hidróxidos e minerais hidratados, fato este que corrobora a hipótese da influência destes na coesão. Os materiais classificados como minério são menos hidratados e se desagregaram mais facilmente ao golpe do martelo durante a estimativa de campo. Porém, quanto menos alterados, estes últimos apresentam resistências maiores aos golpes de martelo devido ao maior atrito fornecido pelos minerais não hidratados.

Os pesos que mais influenciam a classificação RMR em um maciço de itabiritos são o RQD e o espaçamento das descontinuidades. O itabirito quando está alterado não preserva o espaçamento das fraturas e desagrega-se muito facilmente, praticamente não gerando fragmentos de rocha com mais de 10 cm. O espaçamento entre os planos de acamamento e foliação, que são as principais estruturas que dominam a ruptura do material, geralmente têm espaçamento muito pequeno da ordem de centímetros. Os sistemas de fraturas são as descontinuidades que dominam a ruptura do material quando menos alterado. Nos itabiritos compactos a foliação encontra-se fechada e, como o espaçamento das fraturas fica em torno de

10 a 50 cm, isso faz com que o RDQ e o espaçamento tenham um peso alto na classificação RMR.

A classificação RMR não deve ser utilizada na forma proposta por Bieniawski para classificar Itabiritos muito alterados, devido ao baixo peso atribuído ao RQD e ao espaçamento na classificação final do maciço. Os dados históricos do Quadrilátero Ferrífero e os relatórios internos de análises de laboratório realizadas nos materiais da Mineração Casa de Pedra indicam valores de ângulo de atrito maiores do que  $30^\circ$  para os itabiritos com resistência R2. O RQD e o espaçamento das descontinuidades deve ser desconsiderado neste itabiritos e o valor do RMR deve ser recalculado tendo como máximo o valor de 60 e posteriormente ponderado para os valores correspondentes da classificação que variam de 0 a 100.

## **6.2 Parâmetros de Resistência do Maciço**

Após o tratamento dos dados e o cálculo da resistência das litologias através do critério de Hoek-Brown foram identificados alguns aspectos característicos da aplicação do critério na Mineração Casa de Pedra. Os principais aspectos sobre os parâmetros de resistência do maciço estão resumidos abaixo:

No critério de Hoek-Brown a classificação GSI que determina as condições das descontinuidades é o principal fator de redução da

resistência de um maciço. O aumento do GSI diminui logaritmicamente uma função exponencial de redução do parâmetro de resistência.

O segundo fator que mais influencia a redução da resistência do maciço rochoso de Casa de Pedra é a altura do talude, quanto maior a altura do talude maiores são as tensões que este sofrerá pelo aumento da coluna de rocha. Um acréscimo de 50% na altura de um talude representou em média 3° de diminuição no ângulo de atrito e 0,100 MPa na coesão.

O terceiro fator que mais influencia na redução da resistência do maciço rochoso de Casa de Pedra é a densidade do material. Acréscimos de 50% na densidade dos materiais resultou em diminuição de 2,5° no ângulo de atrito devido ao aumento da pressão atuante no maciço e causa um aumento 0,150 MPa na coesão devido ao aumento da pressão confinante.

O fator que exerce menor influência na redução do parâmetro de resistência do maciço rochoso de Casa de Pedra é a resistência a compressão simples. A diminuição em 50% da resistência à compressão simples do material acarretou em média 2° de diminuição no ângulo de atrito e 0,200 MPa na coesão. Devido ao alto grau de decomposição dos materiais expostos na mina Casa de Pedra a resistência a compressão simples, não exerceu grande influencia.

### **6.3 Análise Cinemática**

Após a análise cinemática do maciço rochoso na Mineração Casa de Pedra, alguns aspectos relevantes foram identificados e estão resumidos a seguir:

O mapeamento geológico-geotécnico-estrutural que antecedeu a análise cinemática mostrou-se de grande importância para a definição das principais descontinuidades que governam os mecanismos de ruptura dos taludes. O Quadrilátero Ferrífero é uma região polideformada onde podem ser identificados dezenas de planos de descontinuidade. A observação durante o mapeamento geotécnico é de suma importância em uma análise de estabilidade.

Os itabiritos do Sudoeste do Quadrilátero Ferrífero têm mergulhos fortes, em média maiores do que  $40^\circ$ , quando próximos das abas dos grandes sinclinais e anticlinais gerados na fase de colapso do orógeno Minas. O forte mergulho das camadas e da foliação possibilita um melhor aproveitamento dos minérios, pois permite que as minas operem com taludes utilizando ângulos de face geral em torno de  $40^\circ$ .

Na prática nenhum talude analisado na Mineração Casa de Pedra se mostrou instável para o caso de ruptura planar, pois nenhum satisfaz a condição de estar com o ângulo de face maior do que o ângulo do caimento da descontinuidade.

Apenas dois taludes, os dos setores 5 e 8 mostraram alguma susceptibilidade ao tombamento de blocos devido ao caimento das

descontinuidades. No setor 5 predominam materiais menos alterados o que acarreta ocasionalmente em tombamentos de blocos. Porém os blocos são de dimensões decimétricas e sempre ficam retidos pelas bermas de segurança. No setor 8 predominam materiais mais decompostos, o que acarreta em arqueamento das litologias em função do peso que estas exercem sobre as camadas, que não tem como deslizar sobre a descontinuidade que está com mergulho contrário à face do talude.

## CAPÍTULO 7

---

### 7 CONCLUSÕES

O principal objetivo dessa Dissertação foi testar uma metodologia de trabalho para avaliar o potencial de ruptura dos taludes da Mineração Casa de Pedra. O objetivo foi alcançado através das seguintes etapas:

- revisão bibliográfica e coleta de informações sobre o tema e dados já existentes para a Mineração Casa de Pedra;
- levantamento, produção e armazenamento das características geológicas, geotécnicas e estruturais das cavas da mineração;
- classificação geomecânica do maciço da mineração utilizando as informações coletadas no campo;
- determinação dos parâmetros de resistência do maciço rochoso utilizando a classificação RMR;
- identificação dos campos homogêneos e escolha dos parâmetros de menor valor a favor da segurança;
- identificação das principais estruturas geológicas que dominam os mecanismos de ruptura;
- zoneamento das cavas em função das estruturas geológicas identificadas e em função da geometria das cavas;
- análise cinemática de ruptura dos taludes da Mineração Casa de Pedra.

De uma maneira geral, pode-se concluir que a avaliação de áreas sujeitas a processos de ruptura envolve um enorme grau de incerteza. A previsão de eventos perigosos que são causados pela interação de vários fatores que nem sempre são conhecidos é uma tarefa difícil. Neste contexto, pode-se dizer que a etapa mais importante, e também a mais complexa, para a realização deste trabalho, foi a coleta dos dados e a identificação das principais feições geológicas que exercem maior influência no mecanismo de ruptura.

Em relação a classificação geomecânica RMR, foi possível verificar que ela não é adequada para a qualificação de um maciço de itabirito com resistência R2. Os pesos atribuídos ao RQD e ao espaçamento das descontinuidades forçam a classificação para valores abaixo dos utilizados e ensaiados neste tipo de material.

Na determinação do parâmetro de resistência de um maciço rochoso, utilizando o critério de Hoek-Brown, foi possível verificar que o fator mais importante é o índice GSI. Na metodologia utilizada nessa Dissertação o índice GSI foi substituído pelo RMR, que se mostrou eficiente na determinação dos parâmetros de resistência do maciço rochoso da Mineração Casa de Pedra. De fato as primeiras formulações criadas por Hoek consideravam o RMR ou o Sistema-Q ao invés do GSI que é uma simplificação dos sistemas de classificação geomecânica.

Apesar da classificação geomecânica RMR não conseguir reproduzir a resistência mais próxima da real para os itabiritos R2 da mina, que são a

grande maioria do maciço, ela foi utilizada nesse trabalho pois a redução nos parâmetros do maciço favorece a segurança durante a análise cinemática.

O segundo fator que mais causa impacto na redução dos parâmetros de resistência equivalentes do maciço rochoso de Casa de Pedra é a altura do talude. Aumentos da ordem de 50% na altura do talude acarretam em diminuições de até 4° no ângulo de atrito, mas em contrapartida aumentam a coesão entre as partículas dos minerais.

Em relação à análise cinemática foi verificado que é fundamental o entendimento e reconhecimento das estruturas geológicas que dominam os mecanismos de ruptura.

Por fim pode-se concluir que a avaliação do potencial de risco de ruptura, atingiu um resultado satisfatório considerando-se a análise a nível de bancada dos taludes da Mineração Casa de Pedra. De fato a mina vem operando a varias décadas com taludes de altura superior a 100m e nunca ocorreu nenhuma ruptura de escala global. Por outro lado, durante a operação da lavra é comum a ocorrência de rupturas na escala de da bancada de 13m.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. **Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero.** Precambrian Research, v. 90, p. 29-58, 1998.
- ALMEIDA, L. G.; EMDO, I.; FONSECA, M. A. **Sistemas de nappes na porção meridional do Quadrilátero Ferrífero, MG.** In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 41, João Pessoa, Anais, 2002. 615 p.
- BADGLEY, P. C. **Structural methods for the exploration geologist.** New York: Harper & Brothers, 1959. 280 p.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. **Engineering classification of rock masses for design of tunnel support.** Rock Mechanics, v.6, n.4, p. 189-236, 1974.
- BARTON, N. R. **Review of a new shear strength criterion for rock joints.** Engineering Geology, v. 7, p. 287-332, 1973.
- BIENIAWSKY, Z.T. **Engineering Rock Mass Classification - A complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering.** New York: John Wiley & Sons, 1989. 251p.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Rock mass classification in rock engineering.** In: Exploration for rock engineering, proc. of the symp.: Balkema, 1978. p. 97-106.
- BIENIASWKI, Z. T. **Estimating the strength of rock materials.** J. Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 74, p. 312-320, 1974.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering Classification of Jointed Rock Masses.** Transactions of the South African Institution of Civil Engineering, v.15, n.12, p. 335-344, 1973.
- CHEMALE, F. Jr.; ROSIÈRE, C. A.; ENDO, I. **The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** Precambrian Research, v. 65, p. 25-54, 1994.
- D'ALESSANDRO, J. R. P. **Metodologia de Mapeamento Geológico-Geotécnico para Obtenção de Classificação de Maciço Rochoso (RMR).** In: COBRAMSEG, IV Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, v.4, Curitiba, 2006. 6 p.
- DEERE, D. U.; MILLER, R. P. **Engineering classification and index properties for intact rock.** Technical Report n. AFNL-TR-65-116 Air Force Weapons Laboratory, New Mexico, 1966.
- DEERE, D. U. **Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes.** Rock Mechanics and Engineering Geology, v. 1, n. 1, p. 17-22, 1946.

- ENDO, I. **Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da placa sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais.** São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1997. 243 p. (Tese de Doutorado).
- ESRI. **ArcGis Developer's Guide.** United States.
- FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos da mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes.** Paraná: Editora UFPR, 2001. 550 p.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. I. "A new classification system for underground assessment using surface data". Intern Symp. Eng. Geol. and Underground Construction, Lisboa: LNEC, v. 1, 1983.
- GOODMAN, R. E. **Introduction to Rock Mechanics.** 2. ed. New York: Wiley & Sons, 1989.
- GOODMAN, R. E. **Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rock.** New York: Wiley & Sons, 1980.
- HOCKING, G. **A method for distinguishing between single and double plane sliding of tetrahedral wedges.** Inter. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 13, p. 225-226, 1976.
- HOEK, E.; CARRANZA-TORRES, C. T.; CORKUM, B. **Hoek-Brown failure criterion.** 2002. ed. Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto, July, 2002.
- HOEK, E.; KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. **Support of underground excavations in hard rock.** Rotterdam: Balkema, 1995.
- HOEK, E.; WOOD, D.; SHAH, S. **A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses.** Proc. rock characterization, symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock '92, (J.Hudson ed.), p. 209-213, 1992.
- HOEK, E.; BROWN, E. T. **The Hoek-Brown failure criterion – a 1988 update.** In: Proc. 15<sup>th</sup> Canadian Rock Mech. Symp. n. 15, Toronto: J.H. Curran, Civil Engineering Dept., University of Toronto, p. 31-38, 1988.
- HOEK, E. **Strength of jointed rock masses.** 23<sup>rd</sup> Rankine Lecture, In: Géotechnique, n. 33, p. 187-223, 1983.
- HOEK, E.; BRAY, J. **Rock slope engineering.** 3. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981. 358 p. Edição revisada.
- HOEK, E.; BROWN, E. T. **Underground Excavation in Rock.** London: Inst. Min. Metall, 1980. 527 p.
- HOEK, E. **An empirical strength criterion and its use in designing slopes and tunnels in heavily jointed weathered rock.** Proc. Sixth Southeast Asian Conf. on Soil Engineering, Taipei, Taiwan, v. 2, 1980.

- KENDORSKI, F.; CUMMINGS, R.; BIENIAWSKI, Z. T.; SKINNER, E. **Rock mass classification for block caving mine drift support**. Proc. 5<sup>th</sup> Congr. Int. Soc. Rock Mech. Rotterdam, Melbourne: Balkema, 1983.
- LADANYI, B.; ARCHAMBAULT, G. **Evaluation de la résistance au cisaillement d'un massif rocheux fragmenté**. Proc. 11<sup>th</sup> Symposium on Rock Mechanics, Montreal, 1972.
- LADANYI, B.; ARCHAMBAULT, G. **Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass**. Proc. 24<sup>th</sup> International Geological Congress, New York: AIME, 1970.
- LADEIRA, E. A. **Metalogênese do Ouro na Mina de Morro Velho e no Distrito de Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. In: Contribuições à Geologia e Petrologia. Belo Horizonte, CBMM, (Núcleo de Minas Gerais, SBG, Boletim Especial), p. 95-151, 1985.
- LADEIRA, E. A. **Metallogenesis of Gold at the Morro Velho mine, and in Nova Lima district, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. Ph.D. Thesis, Univ. of Western Ontario, Canada, 1980. 274 p.
- LAUBESCHER, D. H. **Design aspects and effectiveness of support systems in different mining conditions**. Trans. Instn. Min. Metall., v. 93, p. 70-82, 1984.
- LAUBESCHER, D. H. **Geomechanics classification of jointed rock masses – Mining applications**. Trans. Instn. Min. Metall., v. 86, p. 8, 1977.
- MARKLAND, J. T. **A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the ridge wedge sliding type of failures is expected**. Imperial College Rock Mechanics Research Report, n. 19, 1972. 10 p.
- MCMAHON, B. K. **Design of Rock Slopes Against Sliding on Pre-Existing Fractures**. In: Advances in Rock Mechanics, Proc. 3<sup>rd</sup> Congress of the International Society for Rock Mechanics, Denver, v. IIB, Washington D.C: National Academy of Sciences, p. 803-808, 1974.
- PITEAU, D. R. **Geological factors significant to the stability of slopes cut in rock**. Proc. Symposium on Planning Open Pit Mines. Johannesburg: A. A. Balkema, Amsterdam, p. 33-35, 1971.
- RAGAN, D. M. **Structural Geology, an introduction to geometrical techniques**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1973. 208 p.
- ROBERTSON, A. M. **The interpretation of geological factors for use in slope theory**. Proc. Symposium on Planning Open Pit Mines. Johannesburg: A. A. Balkema, Amsterdam, p. 55-70, 1971.
- ROCSCIENCE, INC. **RocLab Rock Mass Strength Analysis Using the Hoek-Brown Failure Criterion**. 2002.

- ROMANA, M.R.. **“New adjustment ratings for application of Bieniawski’s classification to slopes” - The role of rock mechanics in excavations for mining and civil works.** Proceedings, ISRM Symposium on Rock Mechanics, Zacatecas, Mexico, p. 49-53, 1985.
- SCORSCHER, J. H. D. **Komatiitos na estrutura “Greenstone belt”, Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, SBG, p. 292-293, 1978.
- SERAFIN, J. L.; PEREIRA, J. P. **Consideration of the Geomechanics Classification of Bieniaswki.** Int. Symp. On Exploration for Rock Engineering, 1983.
- TERZAGHI, K. **“Rock Defects and Loads on Tunnel Supports”, Rock Tunneling with Steel Support,** R. V. Proctor e T. White. Youngstown, Ohio: Comercial Shearing and Stamping Co., 1946.
- UNAL, E. **Design guidelines and roof control standards for coal mine roofs.** Pennsylvania State University, 1983. Ph.D. thesis.
- WICKHAM, G. E.; TIEDEMANN, H. R.; SKINNER, E. H. **Support Determinations Based on Geologic Predictions.** Proceedings, First Rapid Excavation and Tunneling Conference, Chicago, 1972.