

**ESTUDO DE ESTABILIDADE E TENSÕES *IN SITU* NA EXTRAÇÃO  
DE ROCHAS ORNAMENTAIS NO MUNICÍPIO DE SANTO  
ANTÔNIO DE PÁDUA – RJ**

GUILHERME SOLDATI FERREIRA

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da  
Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte  
das exigências para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil.

Orientador: **Prof. Aldo Durand Farfán**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ**  
MARÇO-2004

**ESTUDO DE ESTABILIDADE E TENSÕES *IN SITU* NA EXTRAÇÃO  
DE ROCHAS ORNAMENTAIS NO MUNICÍPIO DE SANTO  
ANTÔNIO DE PÁDUA – RJ**

GUILHERME SOLDATI FERREIRA

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da  
Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das  
exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Civil.

Comissão Examinadora:

---

Orientador: Prof. Aldo Durand Fárfan (D.Sc.) – UENF

---

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas (P.Hd.) – PUC/RJ

---

Prof. Josué Alves Barroso (D.Sc.) – UENF

---

Prof. Paulo Maia (D.Sc.) – UENF

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ferreira, Guilherme Soldati

Estudo de Estabilidade e Processo de Lavra na Extração de Rochas Ornamentais no Município de Santo Antônio de Pádua – RJ/ Guilherme Soldati Ferreira. – 2004  
p.115

Orientador: Aldo Durand Fáfán  
Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia.  
Campos dos Goytacazes, RJ, 2004  
Bibliografia: p.115

1. Mecânica das rochas 2. Maciços rochosos 3. Rochas ornamentais  
4. Tensão e deformação 5. Classificação Geomecânica I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. II. Título.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo;

Ao Professor Dr. Aldo Duran Farfán, pela orientação no decorrer desse trabalho;

A FAPERJ, pelo apoio financeiro, sem o qual seria muito difícil seguir adiante na realização desse trabalho;

Aos professores do LECIV, pelos ensinamentos e estímulos que muito contribuíram com meu desenvolvimento pessoal e da pesquisa;

A empresa Comércio de Pedras Paraíso Ltda de Santo Antônio de Pádua, pela disponibilidade e fornecimento de material durante toda a realização desse trabalho;

Ao técnico do Laboratório de Estruturas da PUC – Rio de Janeiro, Euclídes, pela enorme ajuda e força de vontade no período dos ensaios em laboratório;

Aos amigos Fabrício Corrêa e Jarbas Losano, pelo auxílio na execução dos levantamentos topográficos das pedreiras;

A Andréia, minha noiva, pelo constante apoio e principalmente pelo seu grande amor;

E finalmente a minha família, apoio, incentivo, paciência e carinho em todos os momentos de minha vida.

## RESUMO

O Município de Santo Antônio de Pádua/RJ possui um número expressivo de indústrias de extração, desdobramento e beneficiamento de rochas ornamentais em seu território. Contudo, essa gama de empresas não emprega técnicas de exploração em conformidade com a sua necessidade, ou seja, não utilizam tecnologias que pregam um maior aproveitamento e racionalização das jazidas e do ambiente em torno das mesmas. Para a escolha da técnica mais adequada a ser utilizada na exploração, é de suma importância que se conheça o estado de tensões *in situ* presente no maciço. Dentro desse contexto, esse trabalho tem o objetivo principal de determinar o estado de tensões *in situ* de 02 jazidas de extração de rocha ornamental da região, sendo uma jazida extração de um gnaisse milonitizado cujo nome comercial é “granito” olho de pombo e outra de um gnaisse-feldspático-milonitizado denominado de “pedra madeira”. Para isso foram executadas medições *in situ* em várias direções de deslocamentos em vários pontos fixados nos maciços, que se movimentavam à medida que era explorado e sofria cortes executados com *Flame-Jet* (maçarico) e denotava conseqüentemente, um relaxamento das tensões confinantes e induzidas do mesmo. Tudo isso aliado a ensaios de compressão simples, com corpos de prova munidos de *Strain-Gauges*, para o monitoramento das deformações axial e radial, forneceu ao trabalho condições de se determinar a magnitude e a direção das tensões *in situ* contidas em um plano de cada maciço estudado. Realizou-se também a classificação geomecânica dos maciços baseada no sistema RMR de Bieniawisk, para se determinar à estabilidade dos mesmos e as condições de suas descontinuidades, que desempenham um importante papel no comportamento de maciços rochosos. Por fim, juntamente com os resultados, serão apresentadas uma série de sugestões para se racionalizar a lavra de materiais rochosos na área, minimizando as perdas na produção e o impacto ambiental em toda a região.

## ABSTRACT

Santo Antônio de Pádua County, in Rio de Janeiro State, holds an expressive number of industries of mining and exploration of ornamental rocks in its territory. However, these companies don't use exploration techniques according to their necessities, that is, they don't use technologies that assure a better avail and rationalization of the mines and the environment around them. So that the most adequate technique to be used on the rock mass is chosen, it is extremely important that the *in situ* stress conditions present in the rock mass is known. In this context, the main objective of this report is to determine the *in situ* stress conditions of 02 ornamental rock mines in region, being one mine of gneiss mylonite whose commercial name is pigeon's eye "granite", and the other of gneiss-feldspar-mylonite denominated "wooden stone". Therefore, measures were taken *in situ* in several directions from the displacement of several fixed points on the rock mass which moved whenever the mass was explored and cut by Flame-Jet and consequently denoted a stress relief of its adjacent and induced stress. All this connected to simple compressive essays, with specimens equipped by Strain-Gauges to the monitoring of axial and radial strains, will provide the condition to determine the magnitude and direction of the *in situ* stress condition held in each rock mass studied. A geomechanic classification was performed in the rock mass based on the RMR system of Bieniawisk, to determine its stability and its conditions of discontinuity, which play an import role in the behavior of the rock mass. Finally, along with the results, several suggestions will be presented to rationalize the mining of rocky material in the area, minimizing the losses in the production and the environmental impact in the entire region.

“Se sonhar um pouco é perigoso,  
a solução para isso não é sonhar  
menos – é sonhar mais.”

***Marcel Proust***  
*1871-1922*

## Sumário

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| Ficha Catalográfica..... | I   |
| Agradecimentos.....      | II  |
| Resumo.....              | III |
| Abstract.....            | IV  |
| Sumário.....             | VI  |
| Lista de Figuras.....    | IX  |
| Lista de Tabelas.....    | XII |

### CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES INICIAIS

|                                                   |   |
|---------------------------------------------------|---|
| 1.1- Introdução.....                              | 1 |
| 1.2- Relevância do Trabalho.....                  | 2 |
| 1.3- Objetivos.....                               | 4 |
| 1.4- Panorama do Setor de Rochas Ornamentais..... | 6 |
| 1.4.1- Cenário Mundial.....                       | 7 |
| 1.4.2- Situação Brasileira.....                   | 8 |
| 1.4.3- Exportações.....                           | 9 |

### CAPÍTULO 2: GEOMORFOLOGIA E DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 2.1- Introdução.....                                  | 11 |
| 2.2- Geologia Regional de Santo Antônio de Pádua..... | 13 |
| 2.2.1- Unidade de Litologias Diversas.....            | 13 |
| 2.2.1.1- Gnaisses.....                                | 14 |
| 2.2.2- Complexo Charnockítico.....                    | 16 |
| 2.2.3- Complexo Migmatítico.....                      | 16 |
| 2.3- Geomorfologia Regional.....                      | 16 |
| 2.4- Áreas Estudadas.....                             | 17 |
| 2.4.1- Pedreira Olho de Pombo.....                    | 18 |
| 2.4.2- Pedreira Pedra Madeira.....                    | 19 |

### CAPÍTULO 3: CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 3.1- Introdução.....          | 22 |
| 3.2- Litologia.....           | 23 |
| 3.3- Estado de Alteração..... | 23 |
| 3.4- Grau de Resistência..... | 24 |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5- Grau de Fraturamento.....                                          | 24 |
| 3.6- Classificação das descontinuidades.....                            | 26 |
| 3.6.1- Orientação Espacial.....                                         | 26 |
| 3.6.2- Espaçamento.....                                                 | 27 |
| 3.6.3- Persistência.....                                                | 29 |
| 3.6.4- Rugosidade.....                                                  | 29 |
| 3.6.5- Resistência das Paredes.....                                     | 30 |
| 3.6.6- Abertura.....                                                    | 31 |
| 3.6.7- Preenchimento.....                                               | 32 |
| 3.6.8- Percolação.....                                                  | 34 |
| 3.6.9- Número de Famílias.....                                          | 35 |
| 3.6.10- Tamanho dos Blocos.....                                         | 36 |
| 3.7- Sistemas de Classificação Geomecânica.....                         | 37 |
| 3.7.1- Índice de qualidade da rocha (RQD).....                          | 39 |
| 3.7.2- Sistema de classificação geomecânica RMR.....                    | 40 |
| 3.8- Classificação dos Maciços em Estudo.....                           | 42 |
| 3.8.1- Classificação do Maciço da Pedreira Olhode Pombo.....            | 42 |
| 3.8.2- Classificação do Maciço da Pedreira Pedra Madeira.....           | 48 |
| 3.9- Critérios de Ruptura para Materiais Rochosos.....                  | 53 |
| 3.9.1- Critérios de Ruptura Não Linear de Hoek e Brown.....             | 53 |
| 3.9.2- Aplicação do Critério de Ruptura Não Linear de Hoek e Brown..... | 57 |

#### CAPÍTULO 4: TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 4.1- Origem das tensões nos maciços rochosos.....   | 59 |
| 4.2 – Determinação das tensões.....                 | 61 |
| 4.2.1- Medições <i>In Situ</i> .....                | 73 |
| 4.2.2- Trabalho de Campo.....                       | 75 |
| 4.2.3- Determinação das Deformações Principais..... | 78 |

#### CAPÍTULO 5: ENSAIOS DE LABORATÓRIO E DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES *IN SITU*

|                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1- Introdução.....                                                               | 91  |
| 5.2- Retirada e Preparação dos Corpos de Prova.....                                | 92  |
| 5.3- Ensaios de Compressão Uniaxial.....                                           | 95  |
| 5.4- Determinação das Tensões Principais <i>in situ</i> dos Maciços Estudados..... | 100 |

|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.5- Ensaio de <i>Point Load</i> (tensão por carga pontual).....                                                                               | 103 |
| CAPÍTULO 06: CONCLUSÕES.....                                                                                                                   | 108 |
| REFERÊNCIAS                                                                                                                                    |     |
| BIBLIOGRÁFICAS.....                                                                                                                            | 112 |
| A- Anexos                                                                                                                                      |     |
| A1: Projeções Estereográficas de igual área dos maciços rochosos das pedreiras Olho de Pombo e Pedra Madeira em Santo Antônio de Pádua/RJ..... | i   |
| A2: Gráficos <i>Tensão x Deformação</i> obtidos nos ensaios de compressão uniaxial com monitoramento das deformações.....                      | xi  |

## LISTA DE FIGURAS:

|                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 01- Localização do município de Santo Antônio de Pádua/RJ.....                                                                                                                                                                                                                    | 3  |
| Figura 02- Participação dos Estados na produção nacional de rochas ornamentais e de revestimento (ABIROCHAS/2001).....                                                                                                                                                                   | 9  |
| Figura 03- Região de estudo mostrando a Serra do Bonfim, Serra do Catete e parte da Serra da Pedra Bonita, divisa do estado do Rio de Janeiro com Minas Gerais. Retirado das Folhas SF-23-X-D-VI-2 de Santo Antônio de Pádua e SF-23-X-D-VI-1 de Recreio - esc.1:50.000 (IBGE:1974)..... | 12 |
| Figura 04- Mostra a geologia da região de Santo Antônio de Pádua (CPRM/DRM, 1980) escala 1:50000.....                                                                                                                                                                                    | 13 |
| Figura 05- Da esquerda para a direita, placas de “granito” olho-de-pombo, pinta rosa e “granito” fino (dimensões- 23x11x1,5 cm).....                                                                                                                                                     | 14 |
| Figura 06- Placas de gnaiss quartzo-feldspático-milonitizados, chamadas de “pedra-madeira”, nas cores amarela e rosa (23x11x1,5 cm).....                                                                                                                                                 | 15 |
| Figura 07- Vista geral da geomorfologia da região de Pádua, cortada pela rodovia BR-186, que liga Pádua ao Rio de Janeiro.....                                                                                                                                                           | 17 |
| Figura 08- Vista parcial de lavra de “granito” olho de pombo, mostrando espessura da capa de solo sobre a lavra, onde a mesma já se encontra em processo erosivo com a formação de ravinas.....                                                                                          | 19 |
| Figura 09- Vista parcial do lado direito da lavra de “pedra madeira rosa” (porção SW), mostrando corte realizado com flame-jet (a direita) e a xistosidade do material no sentido da inclinação de mergulho do talude. Observe a inexistência de camada de solo sobre o maciço.....      | 20 |
| Figura 10- Outra vista parcial do lado esquerdo da frente de exploração de “pedra madeira” (porção SW), onde observa-se mais a esquerda uma família de descontinuidades com mergulho praticamente perpendicular a frente do maciço.....                                                  | 21 |
| Figura 11: Esquema de orientação de uma descontinuidade.....                                                                                                                                                                                                                             | 27 |
| Figura 12: Perfis de rugosidade (Barton et al., 1974; in ABGE, 1998).....                                                                                                                                                                                                                | 30 |
| Figura 13: Esboços de maciços rochosos ilustrando: a) blocos prismáticos, b) blocos irregulares, c) Blocos tabulares e d) blocos colunares (ABGE/ISRM, 1983).....                                                                                                                        | 36 |
| Figura 14- Vista geral das duas bancadas da lavra de “granito” olho de pombo (pedreira estudada), mostrando faixas de contato solo/rocha alterada/rocha sã (de cima para baixo) e a região dos setores N e NW.....                                                                       | 44 |
| Figura 15- Vista parcial de lavra de “granito” olho de pombo, mostrando porção alterada do maciço e juntas de alívio. Região do setor W.....                                                                                                                                             | 44 |

|                                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 16- Croqui da Pedreira Olho de Pombo, mostrando a localização relativa dos setores utilizados na classificação do maciço.....                                                                                                                          | 45 |
| Figura 17- Vista geral das duas bancadas da lavra de “Pedra Madeira” mostrando a região de uma descontinuidade que entra no talude causando uma ruptura lateral.....                                                                                          | 49 |
| Figura 18- Vista parcial de lavra de “Pedra Madeira”, mostrando foliação do maciço e região do setor Norte (N).....                                                                                                                                           | 49 |
| Figura 19- Outra vista parcial de lavra de “Pedra Madeira”, mostrando a região do setor Sul (S) e faixa muito fraturada que corta a face do talude (a esquerda na foto).....                                                                                  | 50 |
| Figura 20- Croqui da Pedreira de Pedra Madeira, mostrando a localização relativa dos setores mapeados na classificação do maciço.....                                                                                                                         | 50 |
| Figura 21- Representação gráfica das equações 11.1 e 12.1 que mostra o comportamento dos maciços estudados em função de suas tensões principais ( $\sigma_1$ – tensão principal maior e $\sigma_3$ – tensão principal menor).....                             | 58 |
| Figura 22: Origem e orientação das tensões tectônicas (Zoback et al. 1989).....                                                                                                                                                                               | 60 |
| Figura 23: Tensões atuantes em um elemento infinitesimal de um maciço rochoso, considerando o eixo z vertical.....                                                                                                                                            | 63 |
| Figura 24: Dados de tensões verticais obtidos por diferentes técnicas de medidas <i>in situ</i> para vários locais da Terra (Brown & Hoek, 1978).....                                                                                                         | 71 |
| Figura 25: Variação da razão entre a tensão horizontal média e a tensão vertical para diferentes profundidades abaixo da superfície (Hoek & Brown, 1978).....                                                                                                 | 72 |
| Figura 26: Esquema do posicionamento dos pinos (P) em relação ao talude e ao corte efetuado no mesmo com <i>Flame Jet</i> (Pedreira Olho de Pombo). Observar que a geometria dos segmentos formam um quadrado (ângulo bissetriz = 45°).....                   | 76 |
| Figura 27- Corte executado com <i>Flame Jet</i> na Pedreira Olho de Pombo.....                                                                                                                                                                                | 78 |
| Figura 28- Posição dos eixos coordenados (x,y) em relação as deformações tomadas em campo.....                                                                                                                                                                | 80 |
| Figura 29- Eixos principais de deformação (a e b) e respectivas deformações principais ( $\epsilon_1$ e $\epsilon_3$ ).....                                                                                                                                   | 81 |
| Figura 30- Posição dos eixos coordenados (x,y) em relação aos vértices do quadrado (P1, P2, P3 e P4) e eixos principais de deformação (a e b) com respectivas deformações principais ( $\epsilon_1 = \epsilon_{\max}$ e $\epsilon_3 = \epsilon_{\min}$ )..... | 83 |
| Figura 31- Variação das deformações principais com a profundidade de corte na Pedreira Olho de Pombo.....                                                                                                                                                     | 84 |
| Figura 32- Variação das deformações principais com a profundidade de corte na Pedreira Pedra Madeira.....                                                                                                                                                     | 85 |

|                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 33- Variação das deformações principais com relação ao tempo na Pedreira Olho de Pombo.....                                                                                                             | 85  |
| Figura 34- Variação das deformações principais com o tempo na Pedreira Pedra Madeira, com suas respectivas aproximações lineares.....                                                                          | 86  |
| Figura 35- Desenho em planta do posicionamento dos pinos de referência em relação ao corte executado no maciço da Pedreira Olho de Pombo.....                                                                  | 87  |
| Figura 36- Desenho, visto em corte, da profundidade e posicionamento do corte realizado com maciço da Pedreira Olho de Pombo.....                                                                              | 87  |
| Figura 37- Variação dos deslocamentos relativos do corte com o tempo, dos 4 pontos de medição na Pedreira Olho de Pombo.....                                                                                   | 89  |
| Figura 38- Variação dos deslocamentos relativos do corte com o tempo, dos 4 pontos de medição na Pedreira Pedra Madeira.....                                                                                   | 89  |
| Figura 39- Blocos retirados das pedreiras e concretados no solo para a posterior remoção dos corpos de prova com a perfuratriz rotativa.....                                                                   | 93  |
| Figura 40- Blocos “furados” após a retirada dos corpos de prova com a perfuratriz rotativa.....                                                                                                                | 94  |
| Figura 41- Corpos de Prova logo após a retirada com a perfuratriz rotativa (sem acabamento).....                                                                                                               | 94  |
| Figura 42- Corpos de Prova com as geratrizes, topos e bases regularizados (após usinagem).....                                                                                                                 | 95  |
| Figura 43- Corpo de Prova posicionado na presa. Notar a disposição dos sensores elétricos na direção longitudinal e radial a peça.....                                                                         | 96  |
| Figura 44- Corpos de Prova do Olho de Pombo rompidos após a realização do ensaio.....                                                                                                                          | 96  |
| Figura 45- Gráfico Tensão x Deformação das 5 amostras de Granito Olho de Pombo.....                                                                                                                            | 98  |
| Figura 46- Gráfico Tensão x Deformação das 5 amostras de Pedra Madeira.....                                                                                                                                    | 99  |
| Figura 47- Representação por cruzetas da direção e magnitude das tensões principais na região estudada do maciço Olho de Pombo.....                                                                            | 102 |
| Figura 48- Representação por cruzetas da direção e magnitude das tensões principais na região estudada do maciço Pedra Madeira.....                                                                            | 103 |
| Figura 49- Formas adequadas de corpos de prova para a execução de ensaios de <i>point load</i> . Onde (a) teste diametral, (b) teste axial, (c) teste com bloco e (d) teste com CP irregular (ASTM, 1995)..... | 104 |
| Figura 50- Relação entre o diâmetro equivalente e a carga de ruptura do <i>point load</i> para o granito olho de pombo e a pedra madeira.....                                                                  | 106 |

## LISTA DE TABELAS:

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 01: Grau de alteração das rochas (IPT, 1984).....                                                                                                      | 24 |
| Tabela 02: Classificação das rochas quanto ao grau de fraturamento (IPT,1984).....                                                                            | 25 |
| Tabela 03: Classificação das descontinuidades quanto ao espaçamento (ABGE, 1983).....                                                                         | 28 |
| Tabela 04: Classificação das descontinuidades quanto à resistência das paredes (ABGE, 1983).....                                                              | 31 |
| Tabela 05: Classificação das descontinuidades quanto à abertura (ABGE,1983).....                                                                              | 32 |
| Tabela 06- Ensaio manuais para estimar a resistência ao cisalhamento não drenado para materiais de preenchimento coesivos (ABMS/CBMR – modificado, 1983)..... | 33 |
| Tabela 07- Ensaio manuais para estimar a resistência de materiais rochosos (ABMS/CBMR – modificado, 1983).....                                                | 34 |
| Tabela 08: Percolação em descontinuidades sem preenchimento específico (modificado-ABGE/CBRM, 1983).....                                                      | 35 |
| Tabela 09: Percolação em descontinuidades preenchidas específicas(modificado-ABGE/CBRM, 1983).....                                                            | 35 |
| Tabela 10: Classificação do tamanho dos blocos no maciço rochoso (ABGE,1983).....                                                                             | 37 |
| Tabela 11: Relação entre o valor do RQD e a qualidade das rochas (modificado - Franklin & Dusseault, 1989).....                                               | 39 |
| Tabela 12: Sistema de Classificação Geomecânica RMR (modificado – Bieniawski, 1989).....                                                                      | 41 |
| Tabela 13: Descrição da água contida, permeabilidade e preenchimento das descontinuidades (ABMS/CBMR - modificado, 1983).....                                 | 43 |
| Tabela 14- Descrição das descontinuidades encontradas no maciço da Pedreira Olho de Pombo (Santo Antônio de Pádua/RJ).....                                    | 45 |
| Tabela 15- Classificação Geomecânica do Maciço pelo Sistema RMR (Rock Mass Rating). Setor N do maciço da pedra Olho de Pombo.....                             | 46 |
| Tabela 16- Classificação Geomecânica do Maciço pelo Sistema RMR (Rock Mass Rating). Setor NW do maciço da pedra Olho de Pombo.....                            | 46 |
| Tabela 17- Classificação Geomecânica do Maciço pelo Sistema RMR (Rock Mass Rating). Setor W do maciço da pedra Olho de Pombo.....                             | 47 |
| Tabela 18- Descrição das descontinuidades encontradas no maciço da Pedreira de Pedra Madeira (Santo Antônio de Pádua/RJ).....                                 | 51 |

|                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 19- Classificação Geomecânica do Maciço pelo Sistema RMR (Rock Mass Rating).<br>Setor N do maciço da pedra de Pedra Madeira.....                                                        | 51  |
| Tabela 20- Classificação Geomecânica do Maciço pelo Sistema RMR (Rock Mass Rating).<br>Setor S do maciço da pedra de Pedra Madeira.....                                                        | 52  |
| Tabela 21: Valores de $m_i$ para a rocha intacta segundo classificação geológica das rochas.<br>Observar que os valores entre parênteses são estimados (Hoek et al. 1995).....                 | 55  |
| Tabela 22: Valores dos parâmetros do critério de ruptura de Hoek & Brown, segundo a<br>estrutura da rocha e a condição das paredes das descontinuidades (Hoek – modificado,<br>1994).....      | 56  |
| Tabela 23: Constantes $m$ , $s$ e $a$ dos Maciços das pedreiras Olho de Pombo e Pedra Madeira de<br>acordo com o critério de ruptura de Hoek & Brown (1994).....                               | 57  |
| Tabela 24: Valores aproximados do peso específico ( $\gamma$ ) de rochas comuns na Terra (Goodman,<br>1989).....                                                                               | 70  |
| Tabela 25: Leitura dos deslocamentos e resultados das deformações dos maciços rochosos<br>estudados.....                                                                                       | 77  |
| Tabela 26: Determinação das magnitudes e direções das deformações principais dos maciços<br>rochosos das Pedreiras Olho de Pombo e Pedra Madeira.....                                          | 82  |
| Tabela 27: Deformações principais médias (Maior = $\epsilon_1$ , Menor = $\epsilon_3$ ) e direções principais<br>referente ao norte magnético da Terra para os maciços rochosos em estudo..... | 84  |
| Tabela 28: Deslocamentos relativos transversais ao corte sofrido nos maciços estudados.....                                                                                                    | 88  |
| Tabela 29- Resultados dos ensaios de compressão uniaxial com monitoramento das<br>deformações e Módulo de Deformabilidade e Coeficiente de <i>Poisson</i> para o Granito Olho de<br>Pombo..... | 97  |
| Tabela 30- Resultados dos ensaios de compressão uniaxial com monitoramento das<br>deformações e Módulo de Deformabilidade e Coeficiente de <i>Poisson</i> para a Pedra Madeira<br>Rosa.....    | 97  |
| Tabela 31- Valores Médios para o Módulo de Deformabilidade e Coeficiente de <i>Poisson</i> .....                                                                                               | 99  |
| Tabela 32- Valores utilizados na montagem da equação <i>tensão x deformação</i> para os maciços<br>de Granito Olho de Pombo e Pedra Madeira.....                                               | 101 |
| Tabela 33- Resumo dos valores das magnitudes e direções das tensões principais dos maciços<br>de Granito Olho de Pombo e Pedra Madeira.....                                                    | 101 |
| Tabela 34- Resultados dos ensaios de <i>point load</i> com o Granito Olho de Pombo.....                                                                                                        | 105 |
| Tabela 35- Resultados dos ensaios de <i>point load</i> com a Pedra Madeira.....                                                                                                                | 106 |

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 36- Valor geral de C em função do De (ASTM, 1995).....                                                             | 107 |
| Tabela 37- Valor de C corrigido em função de $\sigma_c$ determinado em laboratório para os mesmos materiais rochosos..... | 107 |

## **CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

### **1.1- Introdução:**

A humanidade utiliza-se do ambiente geológico desde os primórdios dos tempos. Inicialmente utilizavam-se cavernas para o abrigo e proteção, o que pode ser comprovado pelas inúmeras ilustrações rupestres existentes em seu interior, que retratam o modo de vida naquela época. Posteriormente pontas de lanças, martelos e outros artefatos foram fabricados por nossos antepassados e tiveram papel fundamental na supremacia do ser humano sobre outras espécies. Com o avanço da civilização, os seres humanos passaram a modificar as rochas, cortando-as e transportando-as, e utilizando-as como material de construção de suas casas. Mais tarde utilizaram as rochas para construção de monumentos e aquedutos, pavimentação de ruas, e inúmeras outras aplicações.

A necessidade de um melhor conhecimento do comportamento dos maciços rochosos cresceu a partir do século XIX, com o advento da dinamite e a melhoria dos processos de perfuração, que permitiram a realização de trabalhos de maior envergadura em. Tais obras consistiam principalmente de túneis ferroviários como o de São Gotardo (Suíça), com 15km de extensão, construído entre 1872 e 1880, e que durante a obra ocorreram cerca de 800 mortes, provocadas na sua maioria por problemas de higiene e falta de ventilação no túnel.

Os métodos de exploração que surgiram a seguir foram em sua maioria baseados em ações práticas e na experiência de antigos exploradores que, em sua época utilizaram e aperfeiçoaram técnicas anteriores. Contudo, os progressos na compreensão do comportamento dos maciços rochosos marcaram o início do fim da era da “experiência” (onde indivíduos solucionavam problemas com critérios subjetivos e pessoais), passando a uma abordagem mais objetiva e racional.

Em toda atividade de mineração, e a exploração de rocha ornamental inclui-se nesse conjunto, tem como objetivo extrair o maior volume de minério possível, removendo o

mínimo de material estéril para se chegar a ele. Entretanto, a segurança opõe-se a esse objetivo, pois, por exemplo, não se pode utilizar taludes com ângulos de inclinação muito íngremes (que aumentam a produtividade), pelo fato de que estes se instabilizam, provocando deslizamentos de solo ou de rocha na direção do fundo da cava. Tais eventos interrompem o fluxo normal de lavra da mina, criando vários tipos de prejuízos como despesas com a remoção do material escorregado, com a construção de novas estradas de serviço, com paralisações e atrasos na produção de minério, com custos no retaludamento da cava de exploração e ainda pode danificar equipamentos mecânicos. Além de todo esse prejuízo financeiro há o risco de vidas humanas, que é irreparável.

### **1.2- Relevância do Trabalho:**

O Projeto apresentado a seguir é parte integrante da linha de pesquisa de Mecânica das Rochas do Programa de Pós-Graduação do Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF).

Esse projeto foi executado no Município de Santo Antônio de Pádua pelo fato de que nesta região a extração, o desdobramento e o beneficiamento de rochas ornamentais é intenso, sendo atualmente uma de suas principais atividades, ocupando um grande papel sócio-econômico em toda a região.

Santo Antônio de Pádua está localizada na região noroeste do estado do Rio de Janeiro, a 256 Km da capital do estado. Sua área territorial é de 669 Km<sup>2</sup> e sua população é de aproximadamente 34.000 habitantes (IBGE-1996).



Figura 01- Localização do município de Santo Antônio de Pádua/RJ (<http://www.cide.rj.gov.br>).

A seguir um resumo das principais características geopolíticas do município ([www.coseac.uff.br/cidades/paduainfo](http://www.coseac.uff.br/cidades/paduainfo)):

- **Localização:** Região Noroeste Fluminense do Estado do Rio de Janeiro.
- **População:** Aproximadamente 34.000 habitantes.
- **Rodovias de acesso:** RJ-186 (Pirapetinga-Pádua); RJ-116 (Niterói-Miracema) e RJ-196 (Pádua-Monte Alegre).
- **Distritos:** Pádua, Baltazar, Santa Cruz, Marangatú, São Pedro, Monte Alegre, Paraoquena e Itibiguaçu.
- **Clima:** Temperado.
- **Altitude:** 86 m.
- **Limites territoriais:** Ao Norte - Miracema; ao Sul – Cantagalo; a Leste - Cambuci, Aperibé e Itaocara e a Oeste – o estado de Minas Gerais.
- **Área:** 669 Km<sup>2</sup>.
- **Principais Atividades Econômicas:** Extração Mineral (rochas ornamentais), Pecuária leiteira, indústria de papel e comércio em geral.

- **Bacia Hidrográfica:** Rios Paraíba do Sul, Pomba e Pirapetinga.
- **Distância:** Rio de Janeiro - 256km; Niterói - 240km; Nova Friburgo - 145km; Campos - 132km; Itaperuna - 72km e Miracema - 17km.

A região de Santo Antônio de Pádua se caracterizou na década de 70 e princípio da década de 80, por atividades agro-pastoris em geral, com destaque maior para a produção de arroz. A atividade de extração de rochas para uso ornamental também se desenvolve há aproximadamente duas décadas, contudo só obteve significativo crescimento e expressão econômica a partir do final da década de 80. Na atualidade, o município de Santo Antônio de Pádua depende basicamente das atividades das mineradoras, tanto na fase de extração como no beneficiamento da rocha, constituindo-se um dos maiores pólos de mineração do Estado do Rio de Janeiro, tanto pelo montante comercializado como pelo número de empregos gerados em toda a região.

O presente trabalho trata de uma breve avaliação da influência das atividades mineradoras na área, visto que a mesma é um fator de instabilidade e agressão ao meio ambiente adjacente aos locais de exploração. Isto ocorre devido à falta de utilização de métodos de extração racionais e também à não existência de estudos técnicos prévios, visando à obtenção de dados da estrutura geológica para a determinação da metodologia de lavra, que é condicionada à morfologia da jazida, a sua cobertura não aproveitável (material estéril) e à necessidade de se remover os blocos selecionados após serem individualizados. Além disso, a configuração topográfica na região da lavra é um agravante dos problemas citados anteriormente.

### **1.3- Objetivos:**

Apesar da extração de rochas ornamentais na região ter aumentado muito com o passar dos anos, a tecnologia de lavra do material pouco evoluiu nesse mesmo período. As técnicas de exploração praticamente se mantêm as mesmas desde o início da atividade de mineração, sem critérios técnicos racionais, inclusive para a determinação de possíveis novas jazidas. Isso

muitas vezes causa o abandono precoce de uma frente de lavra, que outrora se pensava produtiva, mas que com o avanço da exploração mostrou-se inviável devido a vários fatores que poderiam ser pré-diagnosticados por um estudo ou avaliação inicial mais criteriosos. Conseqüentemente, o meio ambiente local sofre uma degradação que poderia ser minimizada, caso esse estudo técnico fosse realizado antecipadamente nas possíveis áreas de mineração.

A fim de se realizar um estudo do comportamento mecânico dos meios rochosos é necessário que se conheça as propriedades mecânicas do maciço, sendo as mesmas de determinação complexa devido à heterogeneidade e anisotropia dos meios estudados.

A Mecânica das Rochas tem desenvolvido uma metodologia indireta que avalia e quantifica as condições geológicas naturais mais relevantes no desempenho dos maciços rochosos. Os denominados sistemas de classificação geomecânicas, são baseados em uma metodologia empírica, seguindo critérios específicos; setorizando o meio rochoso em estudo segundo comportamentos similares relacionados às feições geológicas caracterizadas.

Frente ao exposto anteriormente, o presente trabalho tem como principal objetivo à determinação das tensões *in situ*, a avaliação e análise da estabilidade e estudo do comportamento de dois (02) maciços rochosos comprometidos com a falta de organização da exploração local, sendo uma jazida de extração de um gnaisse-milonitizado cujo nome comercial é “granito olho de pombo” e outra, extração de um gnaisse-feldspático-milonitizado denominado “pedra madeira”.

Para tal, realizou-se uma investigação geológico-geotécnica nas pedreiras em estudo, obtendo-se parâmetros para a caracterização e classificação dos maciços rochosos segundo o sistema de classificação RMR de Bieniawski (rock mass rating). Executou-se também medições de deslocamentos em vários pontos do maciço, denotando o relaxamento do mesmo à medida que a exploração avança. Esses deslocamentos, relacionados com ensaios de compressão simples e aferição das deformações de corpos de prova da rocha estudada feitos

em laboratório, forneceu ao trabalho condições de se determinar o valor e a direção das tensões *in situ* nos mesmos.

Todos os detalhes dos processos utilizados nesse trabalho serão detalhados nos próximos capítulos da dissertação.

#### **1.4- Panorama do Setor de Rochas Ornamentais:**

Considera-se rocha ornamental aquela produzida através de sua extração na forma de blocos de faces retangulares de granito, sienito, migmatito, quartzito, arenito, ardósia, serpentinito, mármore, calcário, entre outros, e que serão, na maioria dos casos, serrados em placas.

Comercialmente, a nomenclatura das rochas ornamentais não segue as classificações petrográficas. Dessa forma, “granitos” podem significar qualquer rocha silicática, assim como o quartzito dumortierita da Serra de Macaúbas, na Bahia, é denominado “granito azul macaúbas”. Outras nomenclaturas são peculiares ao setor, como “granitos movimentados” que designam gnaisses ou migmatitos, “mármore” englobam as rochas carbonáticas, sejam elas metamórficas ou não, tais como mármore propriamente ditos, calcários, dolomitos e travertinos, mas também serpentinitos, pela menor dureza em relação a outras rochas silicáticas.

Os granitos ornamentais no Brasil são frequentes e se dão em jazidas superficiais, que são lavradas de forma semi-artesanal, onde é recortado *in-situ* em blocos retangulares de aproximadamente 15 a 30 toneladas, sendo esses blocos resultantes levados diretamente para o porto de exportação ou para os teares, que irão então subdividi-los em chapas ou placas. As placas são utilizadas na construção civil como pisos e revestimentos, mas também como blocos esculpidos, ou não, para monumentos e obras públicas.

O uso de rochas ornamentais tem oscilado a partir da metade do Século XX levando-se em conta, por um lado, a generalização de suas aplicações em construções de luxo e, por outro

lado, a utilização alternativa e o desenvolvimento do concreto armado e de revestimentos e pisos cerâmicos, como também o uso de vidro temperado nas fachadas das construções.

Uma modalidade, atualmente muito difundida, no ramo das rochas ornamentais são as denominadas pedras ornamentais, que nada mais são que rochas cortadas grosseiramente (granitos comerciais) ou, quando a xistosidade permite, talhadas em espessuras centimétricas e serradas nas bordas em formas retangulares, caso comum para ardósias, quartizitos, xistos e gnaisses (caso de Santo Antônio de Pádua) para uso em revestimentos e pisos.

#### **1.4.1- Cenário Mundial:**

A produção mundial noticiada de rochas ornamentais e de revestimento de acordo com o DNPM, na década de 1990, foi de aproximadamente 40 milhões de toneladas/ano, tendo evoluído de um patamar de apenas 1,5 milhões de toneladas/ano na década de 1920. Estima-se atualmente, que os negócios do setor movimentem pelo menos US\$ 40 bilhões/ano.

Cerca de 70% da produção mundial é transformada em chapas e ladrilhos para revestimentos, 15% é desdobrada em peças para arte funerária, 10% para obras estruturais e 5% para outros campos de aplicações. O consumo de rochas é estimado em 600 milhões de m<sup>2</sup>/ano, sendo os produtos cerâmicos, com um consumo de 3,8 bilhões de m<sup>2</sup>/ano, seus principais concorrentes na construção civil. As projeções de consumo/produção e exportações mundiais indicam a manutenção da tendência de crescimento do mercado internacional. Por exemplo, para 2025, projeta-se a quintuplicação do consumo mundial e transações internacionais de 2,1 bilhões de m<sup>2</sup> equivalentes/ano ([www.cide.rj.gov.br](http://www.cide.rj.gov.br)).

Destaca-se, no panorama mundial, o papel de liderança exercido pela Itália. O país coloca-se entre os maiores produtores, como maior importadora de material bruto, maior consumidora per capita e maior exportadora de rochas e tecnologias.

#### **1.4.2- Situação Brasileira:**

No Brasil o mercado de rochas ornamentais e de revestimento começa a se expandir por ocasião da segunda guerra mundial quando as importações, especialmente de mármore, foram suspensas.

Com a suspensão das importações, o avanço do processo de urbanização e com a introdução de novas concepções construtivas, a produção de mármore, antes restrita aos estados do Rio de Janeiro, Santa Catarina e Minas Gerais espalha-se por outros estados do país, sobretudo nos estados da Bahia, Piauí e Rio Grande do Norte. Pelo mesmo motivo inicia-se, também, a produção de granito para fins ornamentais e de revestimento, no estado do Rio de Janeiro seguido por São Paulo, Espírito Santo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Bahia, Pernambuco, Paraíba e Ceará.

Atualmente, o país produz cerca de 500 variedades comerciais de rochas entre granitos, mármore, ardósias, quartzitos, travertinos, pedra sabão, basaltos, serpentinitos, conglomerados, pedra talco e materiais do tipo pedra Miracema, pedra Cariri e pedra Morisca, entre outras rochas, oriundas de 1.300 jazidas em atividade. Encontram-se registradas 300 empresas mineradoras e 250 empresas de beneficiamento de blocos de mármore e granitos, com quase 1.600 teares e, ainda, 6.500 marmorarias responsáveis por trabalhos de acabamento final e aplicação e cerca de 508 empresas que processam exportações. Com relação ao item mão-de-obra, estima-se que o setor absorva cerca de 105.000 empregos diretos(CETEM/ABIROCHAS, 2001).

Segundo Peiter et al (CETEM/ABIROCHAS, 2001) a produção total brasileira de rochas ornamentais e de revestimento supera 5,2 milhões de toneladas/ano, sendo 3 milhões de toneladas/ano de granitos, 1 milhão de toneladas/ano de mármore e o restante referente a produção de ardósias, quartzitos foliados e pedra Miracema, dentre outros. Os estados do Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia respondem por 80% da produção nacional. O estado do

Espírito Santo é o principal produtor, com 47% do total brasileiro. O estado de Minas Gerais é o segundo maior produtor e responde pela maior diversidade de rochas extraídas. Os granitos perfazem cerca de 60% da produção brasileira, enquanto 20% são mármore e travertinos e quase 8% ardósias.

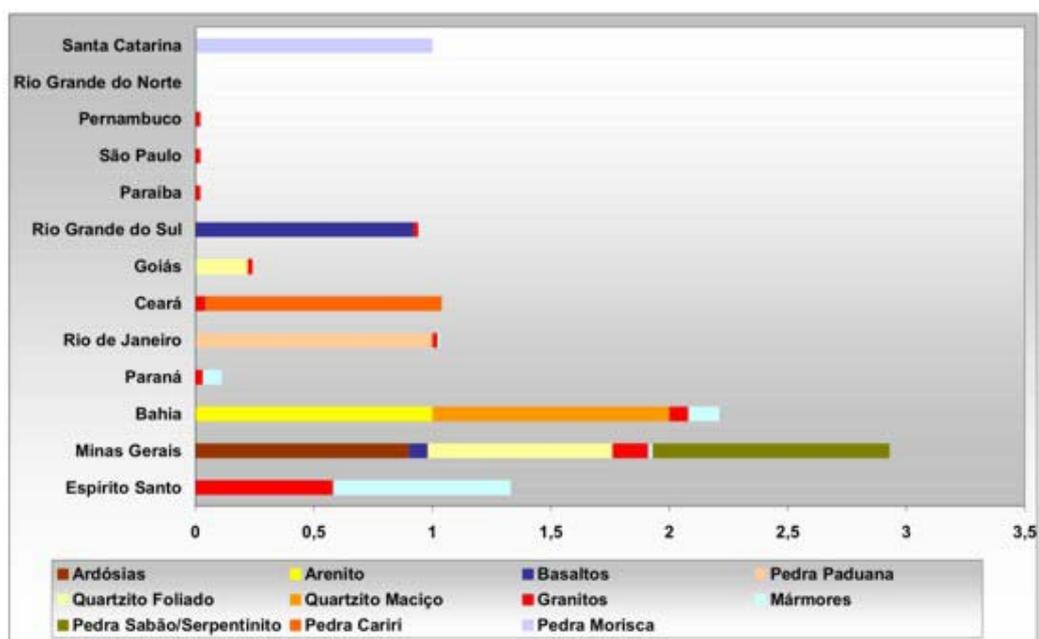


Figura 02- Participação dos Estados na produção nacional de rochas ornamentais e de revestimento (ABIROCHAS/2001).

### 1.4.3- Exportações:

As exportações de mármore e granitos, no ano de 2002, totalizaram US\$ 169 milhões, registrando um crescimento de 32% em comparação ao desempenho do ano anterior. O setor está passando por transformações no perfil dos produtos exportados (ABIROCHAS, 2003).

O estado do Espírito Santo é o maior pólo processador de rochas ornamentais do país e também o maior exportador. No ano de 2002, o Estado respondeu por 51% das exportações do país e por 47% da produção do setor, segundo a Superintendência do Sindicato das Indústrias de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo (Sindirochas, 2003).

Os Estados Unidos são o maior comprador do produto beneficiado no Espírito Santo. Quase 80% do total das exportações dos semi-acabados e de piso vão para o mercado norte-

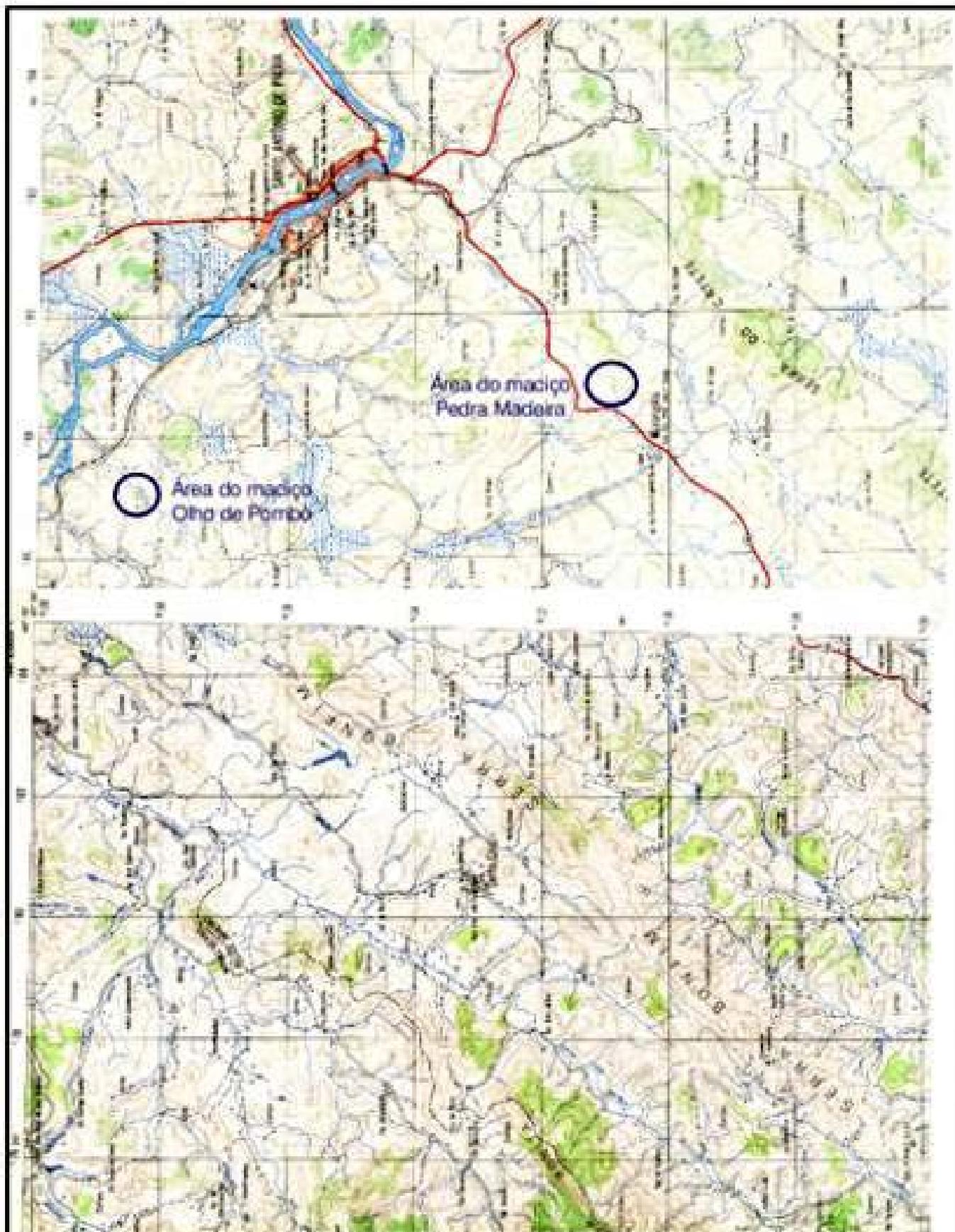
americano. A Itália continua sendo o maior comprador dos blocos. Também são compradores de produtos semi-acabados a Espanha, Alemanha, países da América do Sul e do Oriente.

## **CAPÍTULO 2: GEOMORFOLOGIA E DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.**

### **2.1- Introdução:**

A área de pesquisa está inserida na região que pertence ao contexto geológico, representado pelas litologias da porção noroeste da Associação Paraíba do Sul, que é constituída por gnaisses, rochas carbonáticas (calcários e mármore), quartzitos, xistos e anfibolitos.

A área está incluída no mapeamento geológico sistemático (escala 1:50.000), realizado pelo DRM para o Estado do Rio de Janeiro, constituindo as unidades litológicas presentes no mapeamento da folha de Santo Antônio de Pádua (SF-23-X-D-VI-2/IBGE) e na folha de Recreio (SF-23-X-D-VI-1/IBGE). As áreas mapeadas constituem o conjunto formado pela Serra do Bonfim, Serra da Pedra Bonita na divisa com o Estado de Minas Gerais e Serra do Catete, como mostra a Figura 03.



**Figura 03-** Região de estudo mostrando a Serra do Bonfim, Serra do Catete e parte da Serra da Pedra Bonita, divisa do estado do Rio de Janeiro com Minas Gerais. Retirado das Folhas SF-23-X-D-VI-2 de Santo Antônio de Pádua e SF-23-X-D-VI-1 de Macreio - esc.1:50.000 (IBGE - 1974)

## 2.2- Geologia Regional de Santo Antônio de Pádua:

Como dito anteriormente, a região estudada encontra-se no complexo rochoso denominado Associação Paraíba do Sul, composta por uma unidade de litologias diversas e dois complexos: o complexo charnokítico e o complexo migmatítico, de acordo com a figura 04 acompanhada de sua respectiva legenda.

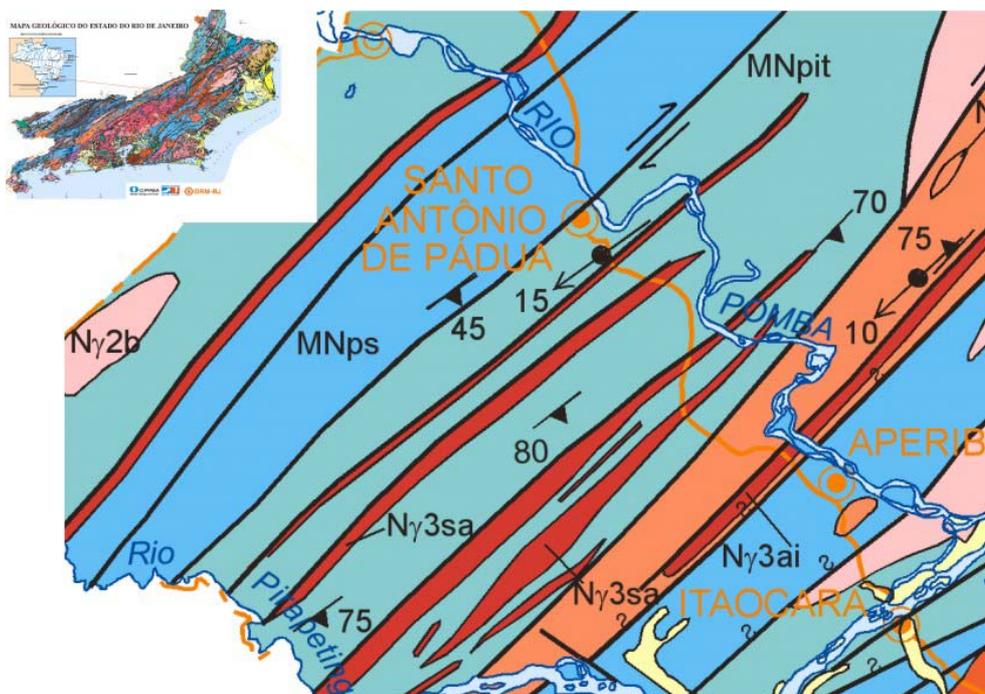


Figura 04- Mostra a geologia da região de Santo Antônio de Pádua (CPRM/DRM, 1980) escala 1:50000.

### LEGENDA

**MNps: Complexo Paraíba do Sul: Unidade São Fidélis** - Granada-biotita-sillimanita gnaiss quartzo-feldspático (metagrauvaca), com bolsões e veios anatéticos in situ ou injetados de composição granítica. Intercalações de gnaiss calcissilicático e quartzito frequentes. Variedades com cordierita e sillimanita (kinzigito) com contatos transicionais com o granada biotita gnaiss. Horizontes de xistos grafitosos são comuns. Também ocorrem rocha calcissilicática, metacarbonática (ca) e quartzito (qz). Em raros domínios com baixas taxa de strain estruturas turbidíticas são preservadas.

**Mnpit: Unidade Itaperuna: Paragranulitos** - Gnaiss quartzo-feldspático aluminoso a granada-biotita-sillimanita com e sem ortopiroxênio eventualmente com intercalações de gnaiss calcissilicático. Frequente fusão parcial in situ com neossoma a granada e ortopiroxênio (charnockitóide anatético).

**Ny3sa: Suíte Santo Antônio de Pádua** – Sienogranito, extremamente deformado em zona de cisalhamento, com textura ultramilonítica (tectonito S-C); o anfibólio é o principal acessório. Localmente são observadas 'manchas' de charnockitização in situ.

### 2.2.1- Unidade de Litologias Diversas:

A unidade formada por diversas litologias é composta por gnaisses, rochas carbonáticas, quartzitos, xistos e anfibolitos.

### 2.2.1.1- Gnaisses:

Os Gnaisses representam a litologia mais marcante dessa unidade, caracterizando-se por um bandamento expressivo, mostrando uma alternância de níveis claros e escuros, com variação da espessura. Em grande parte dos afloramentos, os gnaisses estão intemperizados, sendo possível ainda à visualização do bandamento concordante com o desenvolvimento das placas de biotita. A espessura intemperizada é variável, atingindo até 40 m, dando origem a solos compatíveis com a composição original da rocha.

O **gnaisse milonitizado** ocorre ao longo da Serra do Bonfim, mostrando variações que dão origem a 3 (três) tipos comerciais de rochas ornamentais, a saber:

- “*granito*” *olho-de-pombo*: rocha de granulação média com porfiroclastos de ortoclásio branco.
- “*granito*” *pinta rosa*: rocha de granulação média com porfiroclastos de ortoclásio de cor rosa.
- “*granito*” *fino*: rocha de granulação fina com porfiroclastos de ortoclásio branco.

Os três tipos se mostram em faixas descontínuas, podendo apresentar às vezes, espessuras bem reduzidas ou com algumas dezenas de metros.



Figura 05- Da esquerda para a direita, placas de “granito” olho-de-pombo, pinta rosa e “granito” fino (dimensões- 23x11x1,5 cm).

Já os **gnaisse quartzo-feldspático-milonitizados**, são denominados na região como “pedra-madeira”, sendo encontrados entre as Serras do Bonfim e do Catete. São formados, como o próprio nome já diz, por quartzo e feldspato, com menor presença de biotita e anfibólio e encontram-se milonitizadas como os gnaisse da Serra do Bonfim.

A pedra-madeira apresenta-se em cores claras, como branca, rosa e amarela, sendo essa variação consequência da alteração do maciço rochoso.



Figura 06- Placas de gnaisse quartzo-feldspático-milonitizados, chamadas de “pedra-madeira”, nas cores amarela e rosa (23x11x1,5 cm).

O **gnaisse-granitóide** apresenta-se em corpos individualizados na extremidade sudoeste da Serra da Pedra Bonita, além da divisa com o estado de Minas Gerais. É formado por quartzo, feldspato, com pequenas manchas escuras formadas por biotita e anfibólio. Possui ainda granulação variando de média a grossa. Sua cor quando são, é rosa claro, sendo que alguns afloramentos alterados apresentam cor esbranquiçada.

Já os **quartzitos** possuem dimensões de megalentes, acompanhadas por porções xistosas ou micáceas. As rochas são de granulometria geralmente grosseira, ocorrendo também os tipos finos, de cor bege à branca. Algumas vezes essas rochas encontram-se dobradas, fraturadas e clivadas (CPRM, 1976).

Ainda na Unidade de Litologias Diversas, as **rochas carbonáticas** estão em forma de lentes, associadas a rochas anfíbolíticas, passando gradualmente a um gnaiss com anfíbólio ou então em contato direto com gnaiss.

#### **2.2.2- Complexo Charnockítico:**

Essa unidade litológica é formada principalmente de charnockito, granulitos e em menor escala por hornblenda-biotita gnaisses, metagabros, metadioritos e anfíbólito ocorrendo em proporções reduzidas a noroeste do estado.

Associado a esse tipo, não é raro ocorrer partes ou mesmo fraturas intensas em todo o maciço, onde a rocha apresenta-se milonitizada. Nesse caso, a rocha possui uma granulometria fina e uma tonalidade esverdeada escura, que se intemperizada muda para a cor bege (Oliveira, 1998).

Os contatos desse complexo com as demais rochas são difíceis de serem estabelecidos em virtude dos intensos processos tectônicos que atuaram na região.

#### **2.2.3- Complexo Migmatítico:**

As rochas que pertencem a esse complexo possuem uma característica comum, a feição quartzo-feldspática que é acrescida às feições da rocha originalmente metamórfica. Outra característica é a presença de veios de quartzo, porções graníticas e diques de rochas básicas atravessando todo o complexo migmatítico.

#### **2.3- Geomorfologia Regional:**

Os alinhamentos montanhosos que destacam-se na região mostram-se alongados segundo paralelas na direção N45°E, como as serras do Bonfim, Catete e Pedra Bonita (ver Figura 03). O paralelismo observado, provavelmente é resultado da estrutura geológica presente na região, como mostrada na Figura 04, que foi retirada do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro, produzido pelo CPRM/DRM - 2000.

A topografia local apresenta morros com topos arredondados e praticamente nivelados, com alturas não superiores a 50 metros e imersos em vales aluvionares (Figura 07).



Figura 07- Vista geral da geomorfologia da região de Pádua, cortada pela rodovia BR-186, que liga Pádua ao Rio de Janeiro.

#### **2.4- Áreas Estudadas:**

Nesse sub-capítulo procura-se tecer comentários a respeito dos dois maciços escolhidos para estudo, bem como fornecer informações mais detalhadas sobre suas características específicas. Os mesmos foram selecionados por serem porções de rocha bem características da região e também por serem as mais comercializadas pelas empresas da área. O estudo de duas áreas ou jazidas diferentes, objetiva confrontar possíveis diferenças entre os maciços e o comportamento de cada um frente ao mesmo processo de lavra aplicado pela empresa.

Nas primeiras saídas ao campo, definiram-se as pedreiras a serem estudadas com maior detalhe, mediante, como dito anteriormente, serem as duas formadas por maciços que exemplificam bem a característica de exploração em toda a região e também por pertencerem a maior empresa de extração e beneficiamento da região, o que denota, a princípio, o maior uso de técnicas racionais e o emprego de melhores equipamentos utilizados na extração e no beneficiamento.

#### **2.4.1- Pedreira Olho de Pombo:**

Localizada na Serra do Bonfim, com coordenadas geográficas 7.618.222,317 N e 787.957,766 E e cota aproximada de 100 metros, a pedreira Olho de Pombo de propriedade da empresa Comércio de Pedras Paraíso Ltda, é local de extração de um gnaisse milonitizado de granulação média, rico em quartzo na forma de fitas devido ao processo de deformação que a Serra do Bonfim sofreu, em consequência dos falhamentos regionais.

Denominado comercialmente como granito olho de pombo, como dito anteriormente, o maciço em questão possuía na fase inicial dos trabalhos, apenas uma bancada de frente onde já haviam sido realizadas a limpeza e remoção da capa de solo que cobre a área. Essa primeira bancada estava sendo explorada ao mesmo tempo em que uma segunda bancada, localizada em uma menor cota da jazida, estava sendo preparada com serviços de terraplanagem e remoção de material estéril. Esse material removido é depositado em uma região próxima a frente de lavra que é cortada por um córrego que possivelmente é o caminho principal de escoamento das águas da área, fazendo com que o regime do mesmo fique comprometido tanto a jusante como a montante.

A capa de solo que restou cobrindo parte da jazida já se encontra em processo erosivo devido a ação antrópica, que provoca alteração do escoamento superficial de águas, resultando em incisões na superfície do terreno em forma de sulcos, que evoluem, por aprofundamento, para ravinas. Possui aproximadamente entre 0,5m e 6,0m de espessura, sendo formada por três camadas distintas. A primeira e mais superficial é constituída de um solo aluvionar formado por material erodido, retrabalhado, transportado por cursos d'água e depositado em seus leitos. A espessura do pacote aluvionar em questão varia aproximadamente de 0,5m a 1,0m. A segunda camada constitui um solo residual de gnaisse maduro, gerado a partir da decomposição da rocha original (gnaisse milonitizado de granulação média), por ações físico-químicas e que permanecem no local onde foi formado, sem sofrer qualquer tipo de transporte. A espessura dessa camada de solo residual, juntamente

com a próxima faixa, é de difícil determinação, pois as mesmas se confundem ao longo de toda sua extensão. A terceira e última camada é formada por um solo residual de gnaiss jovem, que da mesma forma que a camada anterior, foi gerado a partir da decomposição da rocha original, por ações físico-químicas de menor intensidade, devido a uma maior proteção relativa a profundidade e proximidade com a rocha sã. Essa camada atinge uma profundidade máxima de aproximadamente 6,0m.



Figura 08- Vista parcial de lavra de “granito” olho de pombo, mostrando espessura da capa de solo sobre a lavra, onde a mesma já se encontra em processo erosivo com a formação de ravinas.

As características do maciço rochoso em questão serão detalhadas no próximo capítulo, onde será realizada a Classificação Geomecânica do mesmo através de Sistema de Classificação Geomecânica RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski.

#### **2.4.2- Pedreira Pedra Madeira:**

Localizada nos arredores da Serra do Catete, entre a mesma e a Serra do Bonfim, com coordenadas geográficas de 7.611.105,215 N e 789.104,840 E e cota aproximada de 200 metros, a Pedreira Pedra Madeira também de propriedade da empresa Comércio de Pedras

Paraíso Ltda, é uma jazida de gnaiss quartzo-feldspático-milonitizado, denominado na região como pedra madeira.

Composto de quartzo, feldspato, biotita e anfibólio em menor escala, apresenta-se na cor rosa claro (pedra madeira rosa) e está localizada no cume de uma elevação, sendo sua porção Sudoeste explorada pela empresa Paraíso, citada anteriormente e outras empresas exploram a porção Nordeste. De antemão, observamos que descontinuidades e foliações que sejam favoráveis em uma frente de lavra pode ser desfavorável à outra frente de exploração, sendo esse assunto discutido no próximo capítulo.

Não se retirou, para esse caso, amostras do solo que cobriam o maciço, pois no momento que se iniciaram os trabalhos de campo toda a frente de trabalho já se encontrava limpa e o material havia sido depositado em uma encosta próxima a praça de lavra. Contudo, para o escopo dessa dissertação, essas informações são apenas de caráter informativo, não comprometendo o resultado final desejado.



Figura 09- Vista parcial do lado direito da lavra de “pedra madeira rosa” (porção SW), mostrando corte realizado com flame-jet (a direita) e a xistosidade do material no sentido da inclinação de mergulho do talude. Observe a inexistência de camada de solo sobre o maciço.

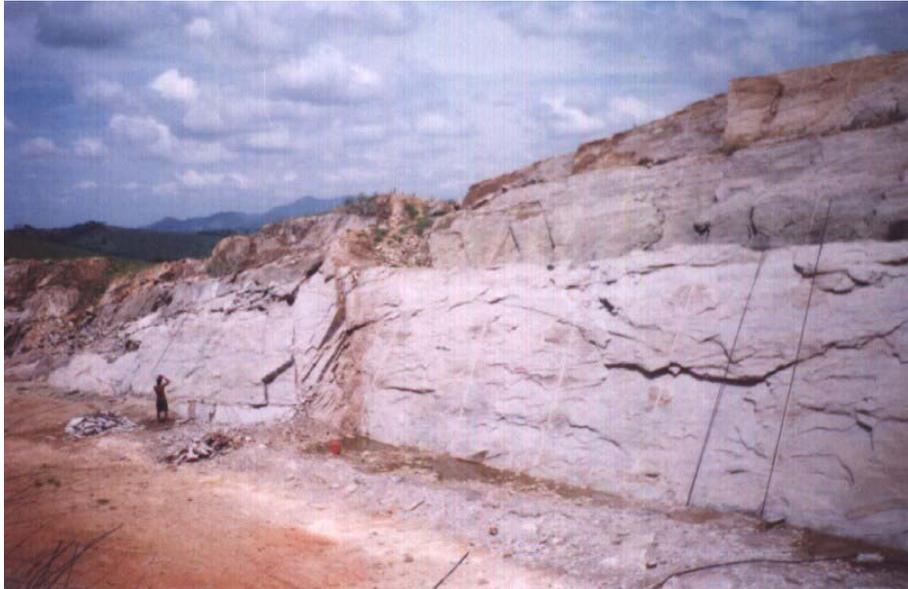


Figura 10- Outra vista parcial do lado esquerdo da frente de exploração de “pedra madeira” (porção SW), onde observa-se mais a esquerda uma família de descontinuidades com mergulho praticamente perpendicular a frente do maciço.

Observa-se nas figuras 9 e 10 que não existe uma capa de solo cobrindo o topo da pedreira, como dito anteriormente, o que impossibilitou a retirada de amostras do solo de cobertura do maciço.

As características do maciço rochoso em questão, assim como do maciço do item anterior, serão detalhadas no próximo capítulo, onde será realizada a Classificação Geomecânica do mesmo através de Sistema de Classificação Geomecânica RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski.

## **CAPÍTULO 3: CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS**

### **3.1- Introdução:**

As estruturas presentes em um maciço que mais interessam à investigação aplicada são as descontinuidades, cujas propriedades mais importantes são; a orientação espacial, a continuidade da estrutura, a quantidade volumétrica das juntas, a morfologia da superfície da fratura, a forma e natureza do preenchimento, a abertura entre as superfícies opostas e a conectividade entre elas. Em sua maioria, essas propriedades são de natureza geométrica, expressando-se com significativa variabilidade espacial, mesmo em um único tipo de maciço rochoso (ABGE, 1998).

Neste Capítulo é realizada uma abordagem teórica de investigações geológico-geotécnicas dos parâmetros considerados na caracterização de maciços rochosos e na classificação pelo sistema RMR de Bieniawski, obtendo-se indiretamente parâmetros da resistência in-situ do material e basear a análise de estabilidade do mesmo.

Existem dois níveis básicos nos quais se pode fazer o mapeamento de um maciço rochoso, dependendo do grau de detalhamento desejado. No mapeamento subjetivo, somente são descritas as descontinuidades que parecem ser importantes. No mapeamento objetivo, são descritas todas as descontinuidades que interceptam uma linha fixa ou área de rocha exposta (ABGE, 1998).

O intemperismo, a vegetação e as camadas de solo que recobrem um afloramento rochoso, dificultam a identificação das descontinuidades. Dependendo do tipo de afloramento e das condições em que se encontram, estas dificuldades poderão ser superadas com uma limpeza por meio de jatos de água ou ar comprimido.

Podem ocorrer casos em que as informações tiradas dos afloramentos superficiais sejam limitadas em quantidade e qualidade insuficientes para descrever o maciço em estudo. Nesses casos é admissível a escavação de trincheiras de exploração localizadas e dimensionadas

estrategicamente, considerando a distribuição da geologia local e o custo que representam estes trabalhos em relação ao bem gerado.

A caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso inicia-se pela classificação sumária dos diversos tipos litológicos, que representam o primeiro critério proposto do método de classificação. Passa-se, em seguida, à análise simultânea dos seguintes critérios: estado de alteração, resistência, coerência e grau de fraturamento. Da conjugação destes parâmetros resulta o conceito de classe de rocha (ABGE, 1998).

### **3.2- Litologia:**

A litologia diz respeito aos tipos de rochas que recebem denominações específicas e são identificadas a partir de um sistema de classificação apoiados em conceitos petrográficos.

Uma classificação litológica, ou petrográfica, para aplicação em engenharia deve apoiar-se em conceitos de uso corrente na geologia, porém de forma simplificada e objetiva, evitando-se nomenclaturas complexas, cujo emprego não produza resultados práticos. A classificação litológica tem grande utilidade na avaliação da representatividade das propriedades físico-mecânicas do meio rochoso e na extrapolação de resultados de ensaios pontuais para o maciço como um todo.

### **3.3- Estado de Alteração:**

A caracterização do estado de alteração da rocha é realizada em função de uma avaliação macroscópica de suas propriedades petrográficas (cor, brilho dos minerais, presença de materiais em alteração, porosidade e friabilidade). A tabela 01 mostra as denominações mais utilizadas na avaliação do estado de alteração das rochas.

Tabela 01: Grau de alteração das rochas (IPT, 1984).

| Denominação                 | Características das rochas                                                                                                                                   |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rocha sã ou praticamente sã | apresentam minerais primários sem vestígios de alterações, ou com alterações físicas e químicas incipientes. Neste caso, a rocha é ligeiramente descolorida. |
| Rocha medianamente alterada | apresentam minerais medianamente alterados, material bastante descolorido                                                                                    |
| Rocha muito alterada        | apresentam minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis                                                                                      |
| Rocha extremamente alterada | apresentam minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo                                                   |

Observa-se que o critério é relativo, válido para comparações entre variedades de um mesmo tipo litológico. Destaca-se, também, que o conceito de alteração aplica-se, positivamente, em rochas de origem metamórfica e magmática. Em rochas sedimentares, a evolução dos processos de alteração pode não resultar em diminuição de suas características mecânicas (ABGE, 1998).

### 3.4- Grau de Resistência:

Entende-se por grau de resistência aquele relacionado à compressão simples.

Em rochas que apresentam anisotropia planar, o grau de resistência deve ser referenciado à qual direção os esforços foram aplicados (paralelo ou perpendicular à foliação). Para trabalhos expeditos e no sentido de escapar à dependência de ensaios laboratoriais (caracterização geotécnica preliminar), pode ser empregado o método de "compressão puntiforme" em fragmentos rochosos irregulares. Os limites de aplicação desse método encontram-se na faixa de materiais rochosos de pouca resistência, devido às restrições na sensibilidade do equipamento.

### 3.5- Grau de Fraturamento:

O grau de fraturamento é, normalmente, apresentado em número de fraturas por metro linear (seja em afloramentos, em sondagens ou ainda em paredes de escavações, ao longo de uma direção perpendicular à direção do fraturamento). Para a aplicação desse critério procede-se inicialmente um zoneamento do meio rochoso em áreas de fraturamento homogêneo.

Apesar de ser apresentado em número de fraturas por metro linear, o critério pode ser aplicado a trechos de qualquer extensão, mesmo de alguns centímetros (bastando neste caso extrapolar os valores encontrados para a extensão de 1 m).

Uma família de descontinuidades é formada por descontinuidades individuais de características mecânicas e físicas similares, dispostas em um arranjo praticamente paralelas, espaçadas homoganeamente. O passado geológico e tectônico fornecem características peculiares de cada família de descontinuidades. O número de famílias afeta o comportamento mecânico, determinando quanto o maciço pode deformar-se sem provocar o fraturamento da rocha intacta. Igualmente afeta o grau de sobre-escavação em escavações a fogo.

A orientação destas famílias são representadas graficamente como nuvens de pólos ou pontos representativos dos planos das descontinuidades em estereogramas. Os estereogramas são um tratamento estatístico da distribuição da densidade dos pólos, podendo identificar as descontinuidades sistemáticas e as não sistemáticas, pela concentração ou dispersão dos pólos.

O número de famílias de descontinuidades pode ser um fator importante na estabilidade de talude em rocha, dependendo de sua orientação em relação à face deste podem ser favoráveis ou não a determinadas direções de corte das bancadas. A maior densidade destas famílias associada a pouco espaçamento podem mudar o mecanismo potencial de escorregamento do talude.

Tabela 02: Classificação das rochas quanto ao grau de fraturamento (IPT,1984).

| <b>Denominação do Maciço</b> | <b>Fraturas por metro linear</b> |
|------------------------------|----------------------------------|
| Ocasionalmente Fraturado     | <1                               |
| Pouco Fraturado              | 1 a 5                            |
| Medianamente Fraturado       | 6 a 10                           |
| Muito Fraturado              | 11 a 20                          |
| Extremamente Fraturado       | >20                              |

### **3.6- Classificação das descontinuidades:**

Os dez parâmetros selecionados para descrever as descontinuidades e os maciços rochosos são, segundo ABGE (1983):

- Orientação,
- Espaçamento,
- Persistência,
- Rugosidade,
- Resistência das Paredes,
- Abertura,
- Preenchimento,
- Condições de Percolação,
- Número de Famílias e
- Tamanho dos Blocos.

Sendo os mesmos definidos a seguir.

### **3.6.1- Orientação Espacial:**

A orientação de uma descontinuidade no espaço é descrita pela direção do mergulho, medida no sentido horário a partir do norte, variando de 0 a 360° e pelo mergulho da linha de maior inclinação, medida a partir da horizontal sobre o plano da descontinuidade (ângulo de mergulho) que varia de 0° a 90°. O vetor mergulho de uma descontinuidade é expresso por um par de valores (direção de mergulho/ ângulo de mergulho), como por exemplo (075°/30°) respectivamente (Figura 11).

A orientação das descontinuidades determina a forma dos blocos individuais, acamamentos ou mosaicos que formam o maciço rochoso. As medidas são realizadas com bússola de geólogo, que fornece a máxima declinação do plano médio da descontinuidade e o azimute do mergulho.

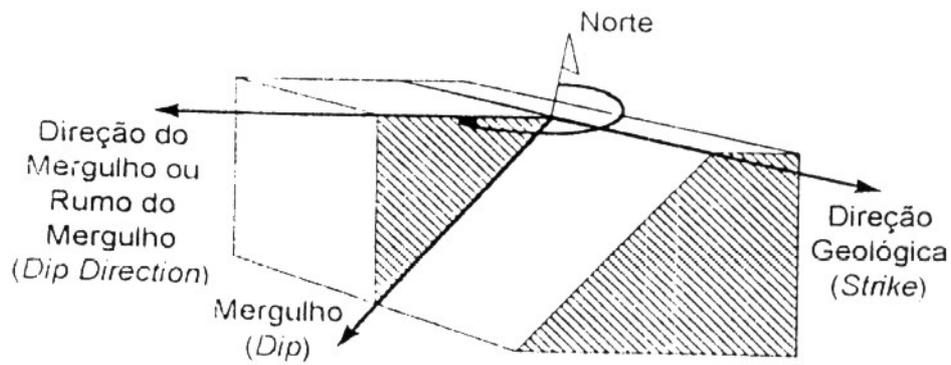


Figura 11: Esquema de orientação de uma descontinuidade.

O procedimento é geralmente lento, podendo converter-se a perigoso ou até impossível em taludes muito íngremes, cortes verticais ou em escavações subterrâneas de grandes dimensões. A precisão das medidas de orientação com bússola e clinômetro depende de vários fatores, sendo os mais importantes a acessibilidade ao plano de interesse, grau de regularidade do plano de rugosidade (planaridade), anomalias magnéticas ocasionais e erros humanos. A orientação das descontinuidades inacessíveis além de outras características importantes do maciço podem ser determinadas diretamente com a aplicação da fotogrametria a partir de pares fotográficos controlados.

Com esses dados em mãos utiliza-se, mais comumente, o método da projeção esférica (estereogramas) para plotagem dos planos de descontinuidades que representam de melhor forma as informações geológicas levantadas em campo. Dos diversos tipos de projeção esférica o mais amplamente utilizado é a projeção de igual área, conhecido como de Schmidt/-Lambert. Nesta projeção as diversas estruturas geológicas do maciço (juntas, falhas etc.) são representadas através de seus dois elementos básicos: direção de mergulho e mergulho, também podem ser representados por seus pólos.

### 3.6.2- Espaçamento:

O espaçamento das descontinuidades é definido como a distância perpendicular entre duas descontinuidades adjacentes. Normalmente refere-se ao espaço ou distância média de uma família de descontinuidades (ABGE/CBMR, 1983).

O espaçamento das descontinuidades adjacentes condiciona o tamanho dos blocos individuais de rocha intacta. Um intenso fraturamento, caracterizado por um pequeno espaçamento, confere ao maciço um comportamento mais próximo do comportamento dos materiais granulares, enquanto que para grandes espaçamentos têm-se, fundamentalmente, o efeito condicionante do tamanho dos blocos. Esses efeitos estão relacionados com a persistência das descontinuidades (ABGE, 1983).

Como no caso de orientação espacial, a importância do espaçamento aumenta quando outras condições para deformação estão presentes, isto é, baixas resistências ao cisalhamento e um número suficiente de descontinuidades ou sistemas de juntas por onde possam ocorrer deslizamentos no maciço rochoso. O espaçamento das descontinuidades tem grande influência na permeabilidade do maciço e nas características de percolação.

Todas as distâncias entre as descontinuidades adjacentes são medidas e registradas sobre um comprimento de amostragem não menor que 3 m. Nos casos em que a região de interesse for menor que 3 m, o comprimento de amostragem deve, preferencialmente, ser maior que 10 vezes o espaçamento estimado. A distância deve ser sempre medida com uma precisão de 5% em relação ao seu valor absoluto.

Tabela 03: Classificação das descontinuidades quanto ao espaçamento (ABGE, 1983).

| <b>Denominação</b>     | <b>Espaçamento (cm)</b> |
|------------------------|-------------------------|
| Muito Afastadas        | > 200                   |
| Afastadas              | 60 a 200                |
| Medianamente Afastadas | 20 a 60                 |
| Próximas               | 6 a 20                  |
| Muito Próximas         | < 6                     |

O equipamento utilizado para a medição do espaçamento consiste em uma trena graduada, com resolução em milímetros (no mínimo de 3 m), bússola e clinômetro. Para a medição do espaçamento das descontinuidades tanto em superfícies expostas, escavadas ou em testemunhos de sondagens, deve-se procurar com que a trena seja posicionada sempre na

perpendicular às descontinuidades, caso contrário, deve-se medir o ângulo entre a trena e a descontinuidade estudada e calcular posteriormente o espaçamento perpendicular.

### **3.6.3- Persistência:**

A persistência pode ser definida como a extensão ou tamanho exposto do plano de descontinuidades de um afloramento. Pode ser uma medida aproximada de sua extensão em área ou comprimento de penetração. Se a descontinuidade acaba em rocha sã ou em outra descontinuidade, a persistência diminui (ABGE/CBMR, 1983). É um dos parâmetros de maior importância para o conhecimento dos maciços rochosos, e um dos mais difíceis de quantificar, mesmo de maneira grosseira, pois nem sempre as descontinuidades são contínuas ou claras (ABGE, 1998).

Falhas e juntas de acamamento e foliação geralmente se apresentam contínuas ou persistentes, sendo facilmente percebidas a olho nu, no campo. A determinação da persistência de uma descontinuidade sempre que possível deverá medir-se em duas direções: no sentido do mergulho e no sentido da direção da descontinuidade. Isto ajuda a definir os prováveis planos de escorregamento. Afloramentos de rocha ou domínios reconhecíveis foram, inicialmente, descritos de acordo com a persistência relativa dos diferentes sistemas de descontinuidades existentes, os quais foram individualizados através dos termos persistente, sub-persistente e não-persistente, respectivamente (ABGE, 1983).

### **3.6.4- Rugosidade:**

A rugosidade das paredes de uma descontinuidade é característica potencialmente importante na sua resistência ao cisalhamento, especialmente nos casos de juntas não preenchidas. A importância da rugosidade diminui à medida que a abertura ou o material de preenchimento aumenta (ABGE, 1983).

A utilização da rugosidade ficou limitada ao uso de termos descritivos, baseados em escala de observação, sendo estes áspero (ou irregular), liso ou polido. O meio mais prático

para quantificar a rugosidade é identificar o seu perfil geométrico, enquadrando-o nas opções apresentadas na Figura 12.

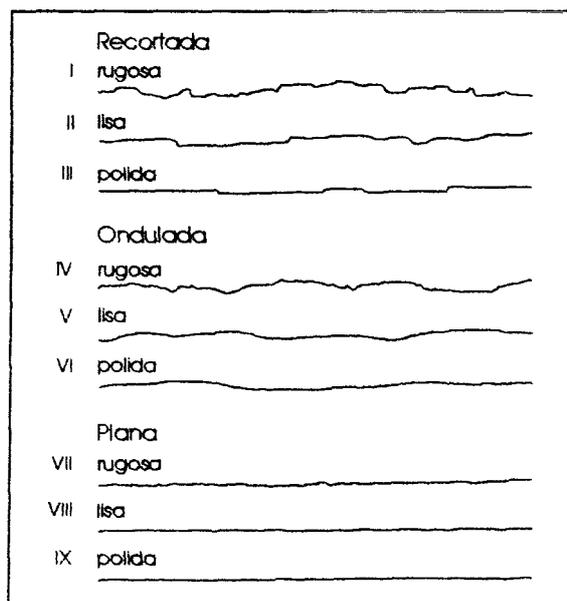


Figura 12: Perfis de rugosidade (Barton et al., 1974; in ABGE, 1998).

### 3.6.5- Resistência das Paredes:

A resistência à compressão da rocha que constitui as paredes de uma descontinuidade é um importante componente da resistência ao cisalhamento e da deformabilidade, especialmente se as paredes estão em contato direto (rocha/rocha), como é o caso de juntas sem preenchimento. Se as paredes se apresentam inalteradas, livres de processos de intemperismo (mecânico ou químico), com contato direto rocha/rocha e sem preenchimentos, como dito anteriormente, a resistência destas paredes em certos casos atinge valores muito próximos aos da rocha intacta, melhorando a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade da descontinuidade.

Por outro lado às paredes de uma descontinuidade são facilmente alteradas por processos de intempérie (desintegração mecânica e decomposição química) em maior escala, quanto mais próximo ela estiver da superfície, acarretando uma diminuição da resistência a compressão das paredes nessas condições. O produto da alteração preenche sucessivamente as descontinuidades (ABGE/CBMR, 1983).

Tabela 04: Classificação das descontinuidades quanto à resistência das paredes (ABGE, 1983).

| Termo Utilizado        | Descrição                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fresca                 | nenhum sinal visível de material rochoso alterado, talvez leve descoloração nas principais superfícies da descontinuidade                                                                                         |
| Levemente Alterada     | descoloração indica alteração do material rochoso e das superfícies de descontinuidades. Todo material rochoso pode estar descolorido pelo intemperismo e mais fraco externamente do que em sua condição original |
| Moderadamente Alterada | menos da metade do material rochoso está decomposto e/ou desintegrado em solo. Rocha fresca ou descolorida está presente em uma estrutura contínua ou em pedaços                                                  |
| Altamente Alterada     | mais da metade do material rochoso está decomposto e/ou desintegrado em solo. Rocha fresca ou descolorida está presente como uma estrutura descontínua ou em pedaços                                              |
| Completamente Alterada | todo material está decomposto e/ou desintegrado em solo. A estrutura original do maciço está ainda intacta.                                                                                                       |
| Solo Residual          | todo material rochoso foi convertido em solo e a estrutura original destruída. Houve uma grande mudança no volume, mas o solo não foi transportado                                                                |

A resistência e deformabilidade de uma descontinuidade quando preenchida são dominadas completamente pelas propriedades dos materiais de preenchimento. Para a descrição completa da resistência das paredes de uma descontinuidade ou de um sistema de descontinuidades deve-se examinar o estado de intemperismo (regimes climáticos) e a alteração do material rochoso, assim como de todo maciço envolvido com a descontinuidade.

Basicamente são utilizados quatro métodos para a medição e descrição das paredes das descontinuidades, a descrição quantitativa do grau de alteração das descontinuidades do maciço rochoso, a medição da resistência das paredes mediante índices manuais, ensaios com esclerômetro e ensaios laboratoriais ou ensaios de campo (ensaio puntiforme) convencionais.

### 3.6.6- Abertura:

Abertura é a distância que separa as paredes de rocha de uma descontinuidade, onde o espaço entre elas é preenchido por ar ou água. Grandes aberturas podem ser resultados de deslocamentos cisalhantes de descontinuidades com apreciável rugosidade e ondulação; de aberturas por tração; de carregamento de materiais pela água e por dissolução (ABGE, 1983).

A largura das aberturas varia desde um traço sutil de alguns micrômetros até metros. As aberturas em afloramentos superficiais são medidas com trenas bem graduadas ou com

lâminas de diversas espessuras, ao longo da descontinuidade e no interior do maciço. Contudo, devido às medições diretas (com lâminas ou trenas graduadas) não possuem a capacidade de registrar a variação das aberturas, provocadas pelas ondulações que se encontram distribuídas ao longo do maciço, a medição da abertura de uma determinada descontinuidade pode ser estimada avaliando-se a permeabilidade, para a qual se assume um regime laminar de fluxo para a água que percola através das descontinuidades.

Aberturas podem ser descritas por meio dos termos mostrados na tabela 05.

Tabela 05: Classificação das descontinuidades quanto à abertura (ABGE,1983).

| <b>Denominação</b>  | <b>Abertura</b> |
|---------------------|-----------------|
| Bem Fechada         | < 0,1 mm        |
| Fechada             | 0,1 a 0,25 mm   |
| Parcialmente Aberta | 0,25 a 0,5 mm   |
| Aberta              | 0,5 a 2,5 mm    |
| Moderadamente Larga | 2,5 a 10 mm     |
| Larga               | > 10 mm         |
| Muito Larga         | 1 a 10 cm       |
| Extremamente Larga  | 10 a 100 cm     |
| Cavernosa           | >1 m            |

### **3.6.7- Preenchimento:**

O material que separa as paredes adjacentes de uma descontinuidade e que usualmente é menos resistente que a rocha que lhe deu origem é denominado Preenchimento. As observações e a descrição do tipo de material, da espessura, do grau de alteração, do tamanho das partículas, da resistência do material e da presença de água que caracterizam o preenchimento devem conter, além da espessura, a descrição da natureza de seus constituintes, granulação, mineralogia, textura, cor e outras informações que se mostrem relevantes (ABGE, 1998). Os materiais típicos de preenchimento são quartzo, veios de calcita, silte, argila e milonito.

As características mecânicas dos materiais de preenchimento afetam diretamente o comportamento físico das descontinuidades, particularmente quanto à resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade. O comportamento físico depende principalmente dos seguintes fatores: mineralogia do material de preenchimento, classificação

ou tamanho das partículas, relação de sobre adensamento (OCR), conteúdo de água e permeabilidade, deslocamentos tangenciais anteriores, rugosidade das paredes, largura do preenchimento e fraturamento ou esmagamento das paredes da rocha. Cada um destes fatores deverá ser caracterizado quantitativamente e, em casos de preenchimentos em descontinuidades com potenciais de escorregamento (instáveis), deve-se recorrer a investigações mais detalhadas inclusive com ensaios *in-situ*.

Uma vez identificado o tipo de preenchimento, a classificação é baseada em diversos padrões fornecidos pela literatura, como nas tabelas 06 e 07.

Tabela 06- Ensaios manuais para estimar a resistência ao cisalhamento não drenado para materiais de preenchimento coesivos (ABMS/CBMR – modificado, 1983).

| <b>Nomenclatura</b> | <b>Descrição</b>    | <b>Identificação de Campo</b>                                           | <b>Valor Aproximado da Resistência a compressão uniaxial (Mpa)</b> |
|---------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| S1                  | Argila muito mole   | facilmente penetrável algumas polegadas com o pulso                     | < 0,025                                                            |
| S2                  | Argila mole         | facilmente penetrável algumas polegadas com o polegar                   | 0,025 - 0,05                                                       |
| S3                  | Argila firme        | penetrável algumas polegadas com o polegar com esforço moderado         | 0,05 - 0,10                                                        |
| S4                  | Argila rígida       | prontamente amolgada com o polegar, porém penetrável com grande esforço | 0,10 - 0,25                                                        |
| S5                  | Argila muito rígida | prontamente arranhada com a unha                                        | 0,25 - 0,50                                                        |
| S6                  | Argila dura         | arranhada com dificuldade pela unha                                     | > 0,50                                                             |

Tabela 07- Ensaio manuais para estimar a resistência de materiais rochosos (ABMS/CBMR – modificado, 1983).

| Nomenclatura | Descrição                     | Identificação de Campo                                                                 | Valor Aproximado da Resistência a compressão uniaxial (Mpa) |
|--------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| R0           | Rocha extremamente fraca      | marcada com a unha                                                                     | 0,25 - 1,00                                                 |
| R1           | Rocha muito fraca             | esmigalha-se com golpes da ponta do martelo e pode ser raspada com canivete            | 1,00 - 5,00                                                 |
| R2           | Rocha fraca                   | Raspada com dificuldade com canivete e faz-se marcas com a ponta do martelo de geólogo | 5,00 - 25,00                                                |
| R3           | Rocha medianamente resistente | Faturada com simples golpes com o martelo de geólogo                                   | 25,00 - 50,00                                               |
| R4           | Rocha resistente              | Mais de um golpe de martelo para fraturar-se                                           | 50,00 - 100,00                                              |
| R5           | Rocha muito resistente        | Fraturam-se com muitos golpes com martelo de geólogo                                   | 100,00 - 200,00                                             |
| R6           | Rocha extremamente resistente | somente lascadas com martelo de geólogo                                                | > 250,00                                                    |

### 3.6.8- Percolação:

É o fluxo da água livre visível em descontinuidades individuais ou no maciço rochoso como um todo (ABGE/CBMR, 1983). A percolação principal no maciço rochoso se dá pelo fluxo através das descontinuidades e em casos de rochas sedimentares porosas o maior fluxo é através dos poros. A presença de feições permeáveis e impermeáveis no interior do maciço controlam a variação do nível do lençol freático.

A pressão da água e o caminho preferencial de percolação comprometem diretamente a estabilidade do maciço rochoso. A observação dos registros de pluviometria, observações da variação da temperatura, descrição da hidrologia local e observações das percolações nas descontinuidades individuais ou família de descontinuidades, ajudam a definir o comportamento do nível do lençol freático ao longo do tempo.

A hidrogeologia local pode ser representada em fotos aéreas, mapas geológicos ou em plantas convencionais marcando com simples setas, a direção do fluxo da água subterrânea.

Também se deverá representar claramente em mapas específicos, as barreiras impermeáveis, assim como os níveis de água subterrânea previstos.

A percolação nas descontinuidades individuais não-preenchidas ou em famílias específicas, podem ser descritas de acordo com as tabelas 08 e 09.

Tabela 08: Percolação em descontinuidades sem preenchimento específico (modificado-ABGE/CBRM, 1983).

| <b>Nomenclatura</b> | <b>Descrição</b>                                                                                                 |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I                   | A descontinuidade é muito fechada e seca, não parecendo ser possível o aparecimento de fluxo de água             |
| II                  | A descontinuidade é seca com nenhuma evidência do fluxo de água                                                  |
| III                 | A descontinuidade é seca mas mostra evidência de fluxo de água e manchas de ferrugem                             |
| IV                  | A descontinuidade é úmida mas não existe água livre                                                              |
| V                   | A descontinuidade apresenta percolação, ocasionalmente apresenta gotas de água, mas não apresenta fluxo contínuo |
| VI                  | A descontinuidade mostra um fluxo contínuo de água (vazão estimada em l/min e pressão baixa, média ou alta)      |

Tabela 09: Percolação em descontinuidades preenchidas específicas(modificado-ABGE/CBRM, 1983).

| <b>Nomenclatura</b> | <b>Descrição</b>                                                                                                                                                                                     |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I                   | Os materiais de preenchimento são fortemente consolidados e secos. Improvável presença de fluxo de água significativo devido a baixa permeabilidade.                                                 |
| II                  | Os materiais de preenchimento estão úmidos, mas não apresentam água livre.                                                                                                                           |
| III                 | Os materiais de preenchimento estão molhados, com gotas de água ocasionais.                                                                                                                          |
| IV                  | Os materiais de preenchimento mostram sinais de lavagem e fluxo de água contínuo (estimar vazão - litros/min)                                                                                        |
| V                   | Os materiais de preenchimento estão lavados localmente, apresentando fluxo considerável de água ao longo dos canais de carreamento (estimar vazão l/min e pressão baixa, média ou alta.              |
| VI                  | Os materiais de preenchimento apresentam-se completamente lavados e existe consideráveis pressões de água, principalmente na primeira exposição (estimar vazão l/min e pressão baixa, média ou alta. |

### 3.6.9- Número de Famílias:

O comportamento mecânico dos maciços rochosos é controlado pelo número de famílias de descontinuidades que se interceptam. O número de famílias é a quantidade de conjuntos de descontinuidades que compõe um sistema de fraturas com características e direções semelhantes. O maciço rochoso pode também conter descontinuidades individuais.

O reconhecimento das famílias individualmente é realizado, simultaneamente, com a medida de sua orientação. Famílias de juntas sistemáticas, identificadas através de reconhecimento visual, devem ser distinguidas no campo de famílias de juntas não-sistemáticas. O reconhecimento visual do número de famílias deverá ser acompanhado por algum sistema de numeração para fins de identificação. O número de famílias de juntas presentes pode ser representado visualmente como parte da apresentação dos dados de "orientação" (bloco diagrama, diagrama de rosetas, diagrama de pólos de Schmidt).

### 3.6.10- Tamanho dos Blocos:

Indicador extremamente importante do comportamento do maciço rochoso é o tamanho dos blocos nele contidos, cujas dimensões são determinadas pelo espaçamento das discontinuidades, pelo número de famílias e pela persistência das discontinuidades delineando os mesmos. A combinação do tamanho dos blocos e a resistência ao cisalhamento entre blocos determina o comportamento mecânico do maciço rochoso sob dadas condições de tensão.

A lavra de rocha em pedreira e a eficiência de fogo parecem ser, em grande, função do tamanho natural do bloco in situ (ABGE, 1998).

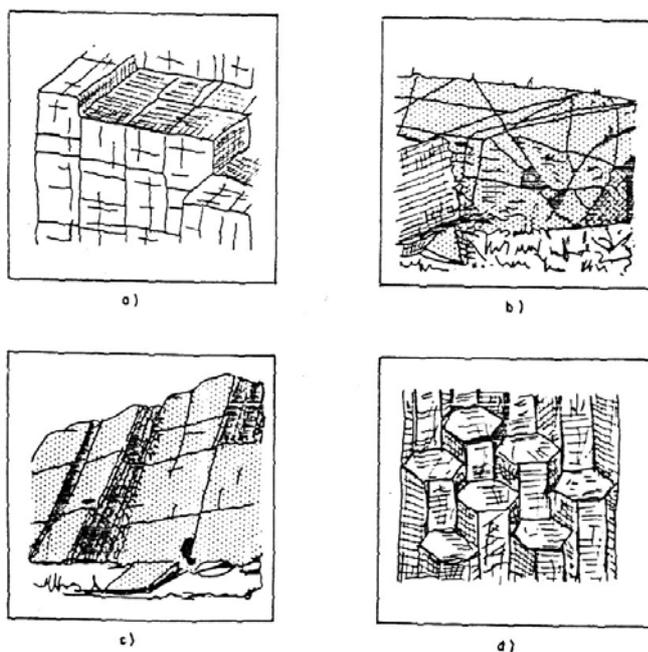


Figura 13: Esboços de maciços rochosos ilustrando: a) blocos prismáticos, b) blocos irregulares, c) Blocos tabulares e d) blocos colunares (ABGE/ISRM, 1983).

Os maciços rochosos podem ser descritos conforme os termos da tabela 10 para o tamanho e forma dos blocos.

Tabela 10: Classificação do tamanho dos blocos no maciço rochoso (ABGE,1983).

| <b>Maciço Rochoso</b> | <b>Descrição</b>                                    |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|
| Compacto              | poucas juntas ou com espaçamentos muito grandes     |
| Em Bloco              | aproximadamente equidimensionais                    |
| Tabular               | uma das dimensões sensivelmente maior que as demais |
| Irregular             | grande variação no tamanho e forma dos blocos       |
| Fragmentado           | densamente diaclasado                               |

### **3.7- Sistemas de Classificação Geomecânica:**

O estudo de estabilidade de taludes em rochas iniciou-se com a organização da Mecânica das Rochas como ciência na década de 1950, produto do desenvolvimento da Mecânica dos Solos e da Geologia Estrutural. Esses estudos em taludes rochosos tem evoluído ao longo do tempo partindo da experiência adquirida em obras civis e de mineração.

A investigação da geologia local inicia-se depois da interpretação e do entendimento de mapas e dados fornecidos pela investigação da geologia regional. O reconhecimento de campo detalhado verifica a ocorrência de formações e/ou afloramentos rochosos, o tipo e o padrão de vegetação, assim como a drenagem local. Uma boa investigação da geologia local é produto de uma cuidadosa identificação das áreas representativas para um detalhado estudo e a seleção dos locais a serem amostrados ou sondados. A inspeção visual no campo é um método simples, rápido e bastante utilizado no mapeamento dos afloramentos e estruturas rochosas, aferindo e acrescentando informação na área delimitada pelo estudo da geologia regional.

A caracterização quantitativa das discontinuidades é baseada em dez parâmetros (ABGE/CBMR, 1983) e no índice RQD (rock quality designation), os mesmos que são subdivididos em dois grupos: um grupo relacionado com a intensidade de fraturamento (tamanho dos blocos, RQD, forma dos blocos e número das famílias de discontinuidade), e outro relacionado com as características individuais de cada discontinuidade ou família de

descontinuidades (orientação, espaçamento, persistência, rugosidade das paredes, abertura, preenchimento, resistência das paredes e fluxo de água nas descontinuidades). O parâmetro espaçamento na realidade pertence aos dois grupos.

Os sistemas de classificação geomecânica foram propostos com objetivos definidos da seguinte forma:

- Setorizar o maciço em grupos comportamento e qualidades similares.
- Fornecer características básicas para o entendimento de cada setor ou classe de maciço.
- Relacionar as condições de um local com a experiência encontrada em outras áreas.
- Extrapolar dados quantitativos e diretrizes, para projetos de engenharia.
- Fornecer bases comuns para a comunicação entre engenheiros e geólogos.

Os sistemas estão baseados em parâmetros estritamente quantitativos, selecionados na caracterização dos maciços, eliminando assim vícios subjetivos. Estes sistemas seguem critérios específicos, relacionados com objetivos propostos. As características avaliadas que representam os elementos condicionantes na interação escavação/maciço são simples e claras.

Segundo Bieniawski (1989), foram desenvolvidos e aplicados vários sistemas de classificação no mundo inteiro. Nos Estados Unidos, por exemplo, os sistemas propostos por Terzaghi em 1946, Deere et al. em 1967, Wickham et al. em 1972 e Bieniawski em 1979; no Canadá os sistemas propostos por Coates em 1964 e Franklin em 1976; na Europa Ocidental os sistemas propostos por Lauffer em 1958, Pacher et al. em 1974 e Barton et al. em 1974; na África do Sul os sistemas propostos por Bieniawski em 1973, Laubscher em 1977 e Olivier em 1979; na Austrália o sistema proposto por Baczynski em 1980; na Nova Zelândia o sistema proposto por Rutledge em 1978; no Japão o sistema proposto por Nakao em 1983; na Índia o sistema proposto por Ghose & Raju em 1981; na União Soviética o sistema proposto por Protodyakonov em 1974 e na Polónia o sistema proposto por Kidybinski em 1979.

### 3.7.1- Índice de qualidade da rocha (Rock Quality Designation - RQD):

O índice RQD foi sugerido por Deere em 1964 para a descrição de testemunhos de sondagens de rocha, sendo definido como a soma dos comprimentos dos fragmentos maiores que 0,1 m expressos em porcentagem do comprimento total sondado (Eq. 01).

É recomendado que o RQD deva ser determinado em testemunhos de sondagem com diâmetro superior a 50 mm, recuperados com amostradores de parede dupla e perfurados com brocas incrustadas de diamante.

Quanto ao comprimento de cada intervalo para o cálculo do RQD, este deve ser de aproximadamente 2,0 m.

$$RQD = 100 \cdot (\sum L_i) / L \quad (01)$$

Onde:

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

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

Este índice quantitativo é amplamente aceito e muito utilizado na classificação de maciços rochosos. O índice de qualidade da rocha é apresentado por faixas de variação do valor de RQD, conforme mostrado na tabela 11.

Tabela 11: Relação entre o valor do RQD e a qualidade das rochas (modificado - Franklin & Dusseault, 1989).

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

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

abrangem desde milímetros até vários metros de comprimento, além de serem facilmente visualizados no campo, fornecendo um significado físico direto. Ainda assim, na classificação de maciços rochosos, o RQD é um dos parâmetros mais importantes a ser considerado.

A seguir é descrito o sistema de classificação geomecânica desenvolvido por Bieniawski (1989), que avalia um grande número de parâmetros mensuráveis importantes dos meios rochosos, fornecendo assim excelentes dados quantitativos.

### **3.7.2- Sistema de classificação geomecânica RMR (Rock Mass Rating):**

O sistema empírico RMR proposto originalmente por Bieniawski em 1974 foi derivado principalmente para a aplicação a projetos de túneis, mas sendo também aplicado posteriormente a obras de superfície, tais como fundações e taludes. Uma última versão deste sistema, foi apresentado por Bieniawski em 1989. O sistema está baseado em seis parâmetros importantes:

- Resistência à compressão simples da rocha intacta,
- RQD (Rock Quality Designation),
- Espaçamento das descontinuidades,
- Padrão ou condição das descontinuidades,
- Ação da água subterrânea e
- Orientação relativa das descontinuidades/escavação.

Cada um destes parâmetros tem a característica de ser simples, claro e obtido no campo rapidamente com um custo bastante reduzido. A orientação das descontinuidades é considerada qualitativamente como um parâmetro de ajuste em relação à escavação ou segundo a natureza da obra. A classificação do maciço rochoso, denominado RMR, é obtido através do somatório dos pesos de cada um dos parâmetros quantitativos selecionados para o tipo de maciço. O RMR é um valor de referência, servindo para deduzir parâmetros preliminares de deformabilidade, resistência e o tempo de auto-sustentação do maciço. A tabela 12 mostra a pontuação ou peso referente a cada parâmetro no sistema de classificação

RMR. Este sistema calibrado em escavações rasas e maciços de boa qualidade, não considera o estado de tensões do meio rochoso, sendo sua aplicação em maciços de baixa resistência e com comportamentos mecânicos dominados pelo estado de tensões é limitado.

Tabela 12: Sistema de Classificação Geomecânica RMR (modificado – Bieniawski, 1989).

| A- PARÂMETROS DA CLASSIFICAÇÃO E SEUS PESOS                            |                                       |                                                                      |                                                               |                                                           |                                                                      |                                                 |                      |        |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------|--------|
| Parâmetro                                                              |                                       |                                                                      |                                                               |                                                           |                                                                      |                                                 |                      |        |
| 1                                                                      | Resistência da rocha intacta          | Índice de comp. Puntiforme                                           | >10MPa                                                        | 4-10MPa                                                   | 2-4MPa                                                               | 1-2MPa                                          | Uso não recomendável |        |
|                                                                        |                                       | Resist.a comp. Uniaxial                                              | >250MPa                                                       | 100-250MPa                                                | 50-100MPa                                                            | 25-50MPa                                        | 5-25MPa              | 1-5MPa |
|                                                                        | Peso                                  | 15                                                                   | 12                                                            | 7                                                         | 4                                                                    | 2                                               | 1                    | 0      |
| 2                                                                      | RQD                                   | 90%-100%                                                             | 75%-90%                                                       | 50%-75%                                                   | 25%-50%                                                              | <25%                                            |                      |        |
|                                                                        | Peso                                  | 20                                                                   | 17                                                            | 13                                                        | 8                                                                    | 3                                               |                      |        |
| 3                                                                      | Espaçamento das descontinuidades      | >2m                                                                  | 0,6-2m                                                        | 200-600mm                                                 | 60-200mm                                                             | <60mm                                           |                      |        |
|                                                                        | Peso                                  | 20                                                                   | 15                                                            | 10                                                        | 8                                                                    | 5                                               |                      |        |
| 4                                                                      | Condição das descontinuidades (ver E) | Sup.muito rugosa, Não persistente, F echada e Paredes sem alteração. | Sup.pouco rugosa, abertura <1mm e paredes levemente alteradas | Sup.pouco rugosa, abertura <1mm e paredes muito alteradas | Sup.estriada ou preenchimento <5mm ou abertura de 1-5mm, persistente | Preenchimento >5mm ou abertura >5mm persistente |                      |        |
|                                                                        |                                       | Peso                                                                 | 30                                                            | 25                                                        | 20                                                                   | 10                                              | 0                    |        |
| 5                                                                      | Ação da água subterrânea              | Infiltração 10m de túnel                                             | nula                                                          | <10 l/min                                                 | 10-25 l/min                                                          | 25-125 l/min                                    | >125 l/min           |        |
|                                                                        |                                       | Relação $u/\sigma_1^*$                                               | 0                                                             | <0,1                                                      | 0,1-0,2                                                              | 0,2-0,5                                         | >0,5                 |        |
|                                                                        |                                       | Condições Gerais                                                     | Seco                                                          | Úmido                                                     | Molhado                                                              | Gotejando                                       | Fluxo abundante      |        |
|                                                                        | Peso                                  | 15                                                                   | 10                                                            | 7                                                         | 4                                                                    | 0                                               |                      |        |
| B- AJUSTE DOS PESOS PARA A ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES (Ver F)     |                                       |                                                                      |                                                               |                                                           |                                                                      |                                                 |                      |        |
| Direção geológica e mergulho                                           |                                       | Muito favorável                                                      | Favorável                                                     | Moderado                                                  | Desfavorável                                                         | Muito desfavorável                              |                      |        |
| Peso                                                                   | Túneis e minas                        | 0                                                                    | -2                                                            | -5                                                        | -10                                                                  | -12                                             |                      |        |
|                                                                        | Fundações                             | 0                                                                    | -2                                                            | -7                                                        | -15                                                                  | -25                                             |                      |        |
|                                                                        | Taludes                               | 0                                                                    | -5                                                            | -25                                                       | -50                                                                  | -                                               |                      |        |
| C- CLASSE DO MACIÇO ROCHOSO DETERMINADA PELA SOMATÓRIA DOS PESOS       |                                       |                                                                      |                                                               |                                                           |                                                                      |                                                 |                      |        |
| Somatório de pesos (RMR)                                               |                                       | 100-81                                                               | 80-61                                                         | 60-41                                                     | 40-21                                                                | <21                                             |                      |        |
| Classe do maciço                                                       |                                       | I                                                                    | II                                                            | III                                                       | IV                                                                   | V                                               |                      |        |
| Descrição                                                              |                                       | Muito bom                                                            | Bom                                                           | Regular                                                   | Ruim                                                                 | Muito Ruim                                      |                      |        |
| D- DESCRIÇÃO DAS CLASSES                                               |                                       |                                                                      |                                                               |                                                           |                                                                      |                                                 |                      |        |
| Número da classe                                                       |                                       | I                                                                    | II                                                            | III                                                       | IV                                                                   | V                                               |                      |        |
| Tempo médio de autosustentação do vão livre                            |                                       | 10 anos p/ 15m                                                       | 6 meses p/ 8m                                                 | 1 semana p/ 5m                                            | 10 horas p/ 2,5m                                                     | 30 minutos p/ 1m de vão livre                   |                      |        |
| Coesão do maciço (Kpa)                                                 |                                       | >400                                                                 | 300-400                                                       | 200-300                                                   | 100-200                                                              | <100                                            |                      |        |
| Ângulo de atrito do maciço                                             |                                       | >45°                                                                 | 35°-45°                                                       | 25°-35°                                                   | 15°-25°                                                              | <15°                                            |                      |        |
| E- RECOMENDAÇÕES PARA A CLASSIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DAS DESCONTINUIDADES |                                       |                                                                      |                                                               |                                                           |                                                                      |                                                 |                      |        |
| Persistência da descontinuidade                                        |                                       | <1m                                                                  | 1-3m                                                          | 3-10m                                                     | 10-20m                                                               | >20m                                            |                      |        |
| Peso                                                                   |                                       | 6                                                                    | 4                                                             | 2                                                         | 1                                                                    | 0                                               |                      |        |
| Abertura                                                               |                                       | Nenhuma                                                              | <0,1mm                                                        | 0,1-1mm                                                   | 1-5mm                                                                | >5mm                                            |                      |        |
| Peso                                                                   |                                       | 6                                                                    | 5                                                             | 4                                                         | 1                                                                    | 0                                               |                      |        |
| Rugosidade                                                             |                                       | Muito rugosa                                                         | Rugosa                                                        | Pouco rugosa                                              | Suave                                                                | Estriadas                                       |                      |        |
| Peso                                                                   |                                       | 6                                                                    | 5                                                             | 3                                                         | 1                                                                    | 0                                               |                      |        |
| Preenchimento                                                          |                                       | Nenhum                                                               | Duro,<5mm                                                     | Duro,>5mm                                                 | Mole,<5mm                                                            | Mole, >5mm                                      |                      |        |
| Peso                                                                   |                                       | 6                                                                    | 4                                                             | 2                                                         | 2                                                                    | 0                                               |                      |        |
| Alteração                                                              |                                       | Não alterada                                                         | Pouco                                                         | Moderada                                                  | Altamente                                                            | Decomposta                                      |                      |        |
| Peso                                                                   |                                       | 6                                                                    | 5                                                             | 3                                                         | 1                                                                    | 0                                               |                      |        |
| F- EFEITO DA RELAÇÃO DA DIREÇÃO GEOLÓGICA E DO MERGULHO                |                                       |                                                                      |                                                               |                                                           |                                                                      |                                                 |                      |        |
| Direção geológica perpendicular ao eixo do túnel                       |                                       |                                                                      |                                                               | Direção geológica paralela ao eixo do túnel               |                                                                      |                                                 |                      |        |
| Escavação no sentido do mergulho. Mergulho 45°-90°                     |                                       | Escavação no sentido do mergulho. Mergulho 20°-45°                   |                                                               | Mergulho 45°-90°                                          |                                                                      | Mergulho 20°-45°                                |                      |        |
| Muito favorável                                                        |                                       | Favorável                                                            |                                                               | Muito desfavorável                                        |                                                                      | Moderado                                        |                      |        |
| Escavação contra mergulho. Mergulho 45°-90°                            |                                       | Escavação contra mergulho. Mergulho 20°-45°                          |                                                               | Mergulho 0°-20° direção geológica qualquer                |                                                                      |                                                 |                      |        |
| Moderado                                                               |                                       | Desfavorável                                                         |                                                               | Moderado                                                  |                                                                      |                                                 |                      |        |

Onde: \* u = pressão neutra nas paredes das descontinuidades e  $\sigma_1$  = tensão principal maior.

Diversas adaptações dos sistemas de classificação foram desenvolvidas visando regionalizar as classificações ou aplicações que não escavações subterrâneas. A maior parte delas, são derivadas do sistema RMR que foi desenvolvido inicialmente com estudos de casos de Engenharia Civil. Vale citar a existência da adaptação realizada por Laubscher (1977) para aplicação em mineração e a adaptação de Romana (1985) para estudos de estabilidade de taludes.

### **3.8- Classificação dos Maciços em Estudo:**

Nessa etapa, referente às jazidas de rocha ornamentais estudadas, é desenvolvido segundo a metodologia descrita anteriormente, a classificação geomecânica dos mesmos, tendo como suporte para a classificação a caracterização in-situ dos meios rochosos da área em questão. Como visto no Capítulo 02, a revisão de estudos anteriores em áreas próximas à citada, também foram utilizadas na definição da geologia regional e local. Os trabalhos de campo, para essa fase, duraram em torno de 05 semanas, sendo que neste período foram realizados serviços de levantamento topográfico e os maciços foram setorizados e caracterizados mediante um mapeamento superficial.

#### **3.8.1- Classificação do Maciço da Pedreira Olho de Pombo:**

O maciço da pedreira Olho de Pombo, é constituído por duas bancadas com uma orientação global de aproximadamente  $053^{\circ}/66^{\circ}$  e altura total variando de 20m a 30m. A estrutura do maciço é dominada principalmente pela foliação com mergulho em direção ao corte próximo de  $60^{\circ}$ . A alteração mais significativa encontrada no talude é provocada pela exploração a fogo e falta de sistemas de drenagem superficial. O número de famílias de descontinuidades, assim como o grau de alteração, aparentemente diminuem com o aumento da profundidade. No mapeamento superficial do talude, o mesmo foi dividido, por inspeção visual, em 3 setores com padrões geológicos estruturais predominantes ou similares (setor N ou Norte, setor NW ou Noroeste e setor W ou Oeste). Cada setor foi mapeado objetivamente com a descrição das descontinuidades de uma área representativa do maciço com

aproximadamente 5m x 5m. A descrição seguiu parâmetros sugeridos pela ISRM (orientação, espaçamento, persistência, rugosidade, resistência das paredes, abertura, preenchimento, condições de percolação, número de famílias e tamanho dos blocos) todos definidos anteriormente nesse capítulo.

No caso da classificação geomecânica pelo sistema RMR, a resistência das paredes das descontinuidades não são tratadas, pois o sistema de classificação em questão não avalia diretamente esse parâmetro.

Para a obtenção da orientação (direção e ângulo de mergulho) das descontinuidades no campo, foi utilizada a bússola de Brunton (bússola de geólogo), realizando-se 5 leituras para cada família de descontinuidades encontrada, sendo os mesmos representados por seus valores médios.

O comprimento da persistência das fraturas, presentes em cada setor do maciço são representados por seus valores máximos e de acordo com a nomenclatura da tabela 13. As características de preenchimento e percolação também estão de acordo com o código apresentado na tabela 13.

Tabela 13: Descrição da água contida, permeabilidade e preenchimento das descontinuidades (ABMS/CBMR - modificado, 1983).

| <b>ÁGUA CONTIDA E PERMEABILIDADE DO PREENCHIMENTO</b> |                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nomenclatura</b>                                   | <b>Descrição</b>                                                                                                                                                                                     |
| W1                                                    | Materiais de preenchimento são fortemente consolidados, secos e de permeabilidade muito baixa.                                                                                                       |
| W2                                                    | Materiais de preenchimento estão úmidos, mas não existe água livre presente.                                                                                                                         |
| W3                                                    | Materiais de preenchimento estão molhados e existem gotas de água ocasionais.                                                                                                                        |
| W4                                                    | Materiais de preenchimento mostram sinais de carregamento, existindo fluxo contínuo de água (estimar litros/min.).                                                                                   |
| W5                                                    | Materiais de preenchimento são carregados localmente, existindo consideráveis fluxos de água ao longo dos canais de carregamento (estimar litros/min e quantificar pressão em baixa, média ou alta). |
| W6                                                    | Materiais de preenchimento estão completamente carregados. Observam-se altas pressões de água (estimar a vazão e registrar a pressão).                                                               |
| <b>DETERMINAÇÃO DA PERSISTÊNCIA - EXTREMOS</b>        |                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Nomenclatura</b>                                   | <b>Descrição</b>                                                                                                                                                                                     |
| x                                                     | Descontinuidade que se estende além do afloramento                                                                                                                                                   |
| r                                                     | Descontinuidade que visivelmente acaba em rocha no afloramento                                                                                                                                       |
| d                                                     | Descontinuidade que termina em outra descontinuidade                                                                                                                                                 |



Figura 14- Vista geral das duas bancadas da lavra de “granito” olho de pombo (pedreira estudada), mostrando faixas de contato solo/rocha alterada/rocha sã (de cima para baixo) e a região dos setores N e NW.



Figura 15- Vista parcial de lavra de “granito” olho de pombo,mostrando porção alterada do maciço e juntas de alívio. Região do setor W.

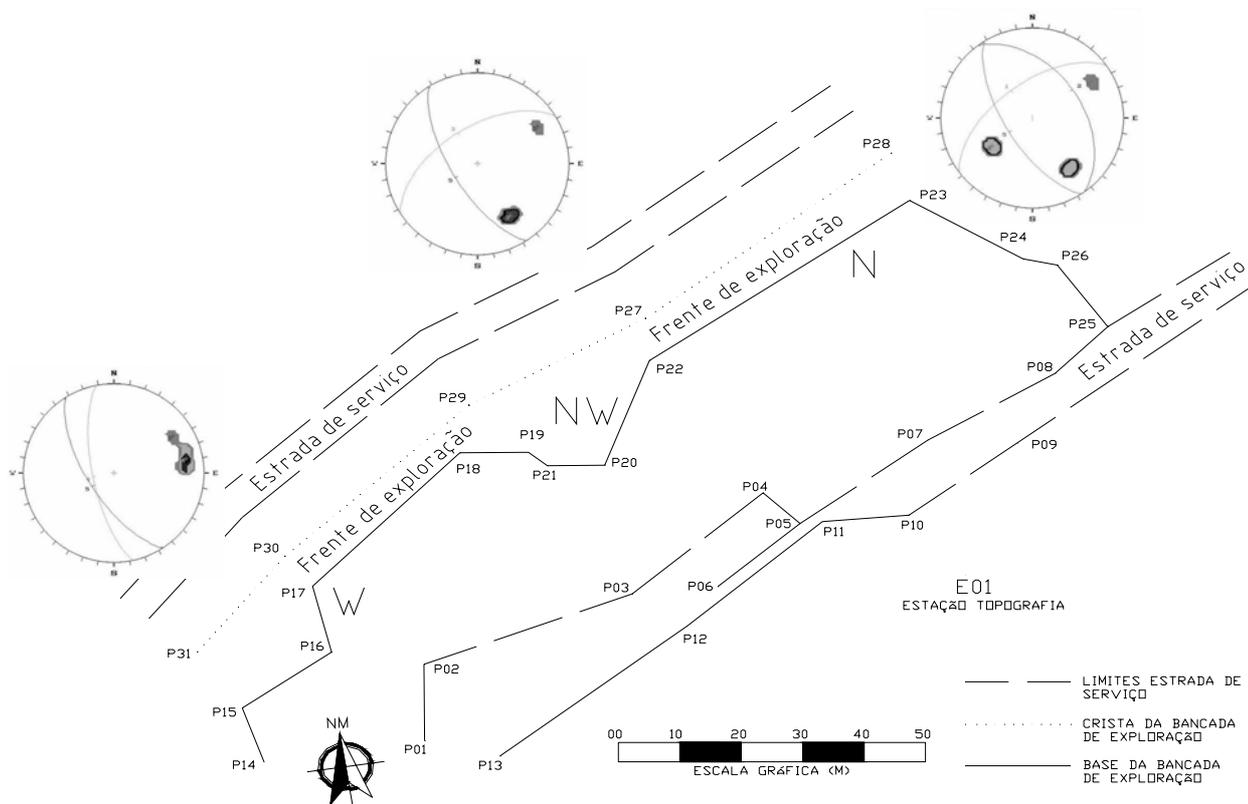


Figura 16- Croqui da Pedreira Olho de Pombo, mostrando a localização relativa dos setores utilizados na classificação do maciço.

A Figura 16 foi realizada com base em dados adquiridos por levantamento topográfico (planimétrico).

Tabela 14- Descrição das descontinuidades encontradas no maciço da Pedreira Olho de Pombo (Santo Antônio de Pádua/RJ).

| Maciço | Orientação das Descontinuidades | Espaçamento (m) | Persistência (m) | Abertura (mm) | Preenchimento  |                  | Percolação | Observações                                             |
|--------|---------------------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------|------------------|------------|---------------------------------------------------------|
|        |                                 |                 |                  |               | Espessura (mm) | Tipo de Material |            |                                                         |
| N/01   | 139/60                          |                 | x                |               |                |                  | W1         | Foliação fechada                                        |
| N/02   | 060/45                          | 3               | x                | 10            | 10             | R5               | W1         | Moderadamente aberta com preenchimento de material duro |
| NW/01  | 143/57                          | >5              | x                |               |                |                  | W1         | Junta fechada, grande espaçamento e seco                |
| W/01   | 076/70                          | >5              | x                | <6            |                |                  | W1         | Junta muito fechada e pouco rugosa                      |

De acordo com a tabela 12 (Sistema de Classificação Geomecânica RMR, modificado – Bieniawski, 1989) e também em acordo com o levantamento geológico-geotécnico de superfície realizado na área de estudo, pode-se classificar o maciço rochoso da pedreira Olho de Pombo com as tabelas a seguir:

Tabela 15- Classificação Geomecânica do Maciço pelo Sistema RMR (Rock Mass Rating). Setor N do maciço da pedreira Olho de Pombo.

**Maciço:** Pedreira Olho de Pombo  
**Local:** Serra do Bomfin - Santo Antônio de Pádua/RJ  
**Setor:** N

| <b>A</b> | <b>Parâmetro</b>        | <b>Classificação</b>         | <b>Peso</b>    |
|----------|-------------------------|------------------------------|----------------|
| 1        | Res. Compressão (Mpa)   | 100 - 250                    | 12             |
| 2        | RQD (%)                 | 75 - 90                      | 17             |
| 3        | Espaç. Descontinuidades | > 2,00m                      | 20             |
| 4        | Cond. Descontinuidades  | Pouco rugosa, alteração leve | 25             |
| 5        | Ação água subterrânea   | Completamente seco           | 15             |
| <b>B</b> |                         |                              |                |
|          | <b>Ajuste</b>           | <b>Mergulho</b>              | <b>Peso</b>    |
|          | Talude                  | Favorável                    | -5             |
| <b>C</b> |                         |                              |                |
|          | <b>Classe do Maciço</b> | <b>Descrição</b>             | <b>Σ pesos</b> |
|          | I                       | Muito Bom                    | 84             |

| <b>Maciço</b> | <b>Coesão (Kpa)</b> | <b>Ang. Atrito</b> |
|---------------|---------------------|--------------------|
| Classe I      | > 400               | > 45               |

Tabela 16- Classificação Geomecânica do Maciço pelo Sistema RMR (Rock Mass Rating). Setor NW do maciço da pedreira Olho de Pombo.

**Maciço:** Pedreira Olho de Pombo  
**Local:** Serra do Bomfin - Santo Antônio de Pádua/RJ  
**Setor:** NW

| <b>A</b> | <b>Parâmetro</b>        | <b>Classificação</b>         | <b>Peso</b>    |
|----------|-------------------------|------------------------------|----------------|
| 1        | Res. Compressão (Mpa)   | 100 - 250                    | 12             |
| 2        | RQD (%)                 | 75 - 90                      | 17             |
| 3        | Espaç. Descontinuidades | > 2,00m                      | 20             |
| 4        | Cond. Descontinuidades  | Pouco rugosa, alteração leve | 25             |
| 5        | Ação água subterrânea   | Completamente seco           | 15             |
| <b>B</b> |                         |                              |                |
|          | <b>Ajuste</b>           | <b>Mergulho</b>              | <b>Peso</b>    |
|          | Talude                  | Favorável                    | -5             |
| <b>C</b> |                         |                              |                |
|          | <b>Classe do Maciço</b> | <b>Descrição</b>             | <b>Σ pesos</b> |
|          | I                       | Muito Bom                    | 84             |

| <b>Maciço</b> | <b>Coesão (Kpa)</b> | <b>Ang. Atrito</b> |
|---------------|---------------------|--------------------|
| Classe I      | > 400               | > 45               |

Tabela 17- Classificação Geomecânica do Maciço pelo Sistema RMR (Rock Mass Rating). Setor W do maciço da pedra Olho de Pombo.

**Maciço:** Pedreira Olho de Pombo

**Local:** Serra do Bomfin - Santo Antônio de Pádua/RJ

**Setor:** W

| <b>A</b> | <b>Parâmetro</b>        | <b>Classificação</b>         | <b>Peso</b>    |
|----------|-------------------------|------------------------------|----------------|
| 1        | Res. Compressão (Mpa)   | 100 - 250                    | 12             |
| 2        | RQD (%)                 | 50 - 75                      | 13             |
| 3        | Espaç. Descontinuidades | 0,60 - 2,00m                 | 15             |
| 4        | Cond. Descontinuidades  | Pouco rugosa, alteração leve | 25             |
| 5        | Ação água subterrânea   | Completamente seco           | 15             |
| <b>B</b> |                         |                              |                |
|          | <b>Ajuste</b>           | <b>Mergulho</b>              | <b>Peso</b>    |
|          | Talude                  | Favorável                    | -5             |
| <b>C</b> |                         |                              |                |
|          | <b>Classe do Maciço</b> | <b>Descrição</b>             | <b>Σ pesos</b> |
|          | II                      | Bom                          | <b>75</b>      |

| <b>Maciço</b> | <b>Coesão (Kpa)</b> | <b>Ang. Atrito</b> |
|---------------|---------------------|--------------------|
| Classe II     | 300 - 400           | 35 - 45            |

A análise da estabilidade do maciço foi avaliada a partir das projeções estereográficas das famílias de descontinuidades descritas anteriormente. Os estereogramas foram traçados com o auxílio do Software DIPS versão 2.2. Na figura 16 pode-se observar os estereogramas finais de cada setor do maciço respectivamente, sendo os mesmos melhor visualizados nas figuras em anexo ao presente trabalho.

Através da análise dos estereogramas, foram verificados os prováveis mecanismos de ruptura, não considerando o ângulo de atrito do maciço, apenas a análise cinemática:

Setor N – Ruptura por tombamento devido ao fato da concentração de pólos da família N/02 estar localizada a frente da face do talude, sendo a mesma potencializada por juntas de alívio sub-horizontais localizadas ao longo do maciço. A família N/01 não causa instabilidade ao maciço pois encontra-se direcionada lateralmente a face do mesmo.

Setor NW – Região do talude relativamente estável para essa direção de corte do maciço pelo mesmo motivo da família N/01 descrito anteriormente.

Setor W – Ruptura planar possivelmente na porção direita do talude, pois as descontinuidades da família W/01 surgem na face do talude e se estendem praticamente até a crista do mesmo. Sendo ainda sua porção esquerda estável para essa direção de corte.

### **3.8.2- Classificação do Maciço da Pedreira Pedra Madeira:**

O maciço da pedreira em questão é constituído por duas bancadas com uma orientação global de aproximadamente  $070^{\circ}/60^{\circ}$  e altura total variando de 10m a 15m. A estrutura do maciço é dominada principalmente pela foliação com direção de mergulho próxima a  $072^{\circ}$  e mergulho saindo da face do corte próximo de  $58^{\circ}$  ( $072^{\circ}/58^{\circ}$ ). A alteração mais significativa encontrada no talude é provocada pela exploração a fogo e falta de sistemas de drenagem superficial do mesmo. O número de famílias de descontinuidades assim como o grau de alteração aparentemente, diminuem com o aumento da profundidade. No mapeamento superficial do talude, o mesmo foi dividido, por inspeção visual, em 2 setores com padrões geológicos estruturais predominantes ou similares (setor N ou Norte e setor S ou Sul). Cada setor foi mapeado objetivamente, como o do maciço anterior, com a descrição das descontinuidades de uma área representativa do maciço com aproximadamente 5m x 5m. A descrição seguiu parâmetros sugeridos pela ISRM (orientação, espaçamento, persistência, rugosidade, resistência das paredes, abertura, preenchimento, condições de percolação, número de famílias e tamanho dos blocos) todos descritos anteriormente nesse capítulo.



Figura 17- Vista geral das duas bancadas da lavra de “Pedra Madeira” mostrando a região de uma descontinuidade que entra no talude causando uma ruptura lateral.



Figura 18- Vista parcial de lavra de “Pedra Madeira”, mostrando foliação do maciço e região do setor Norte (N).

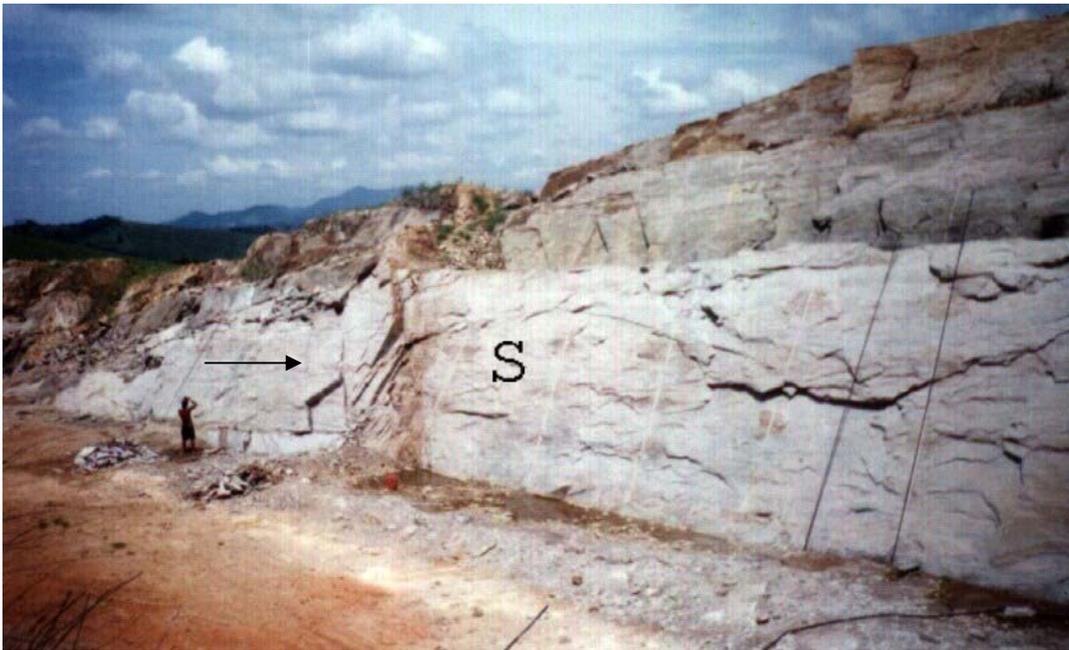


Figura 19- Outra vista parcial de lavra de “Pedra Madeira”, mostrando a região do setor Sul (S) e faixa muito fraturada que corta a face do talude (a esquerda na foto).

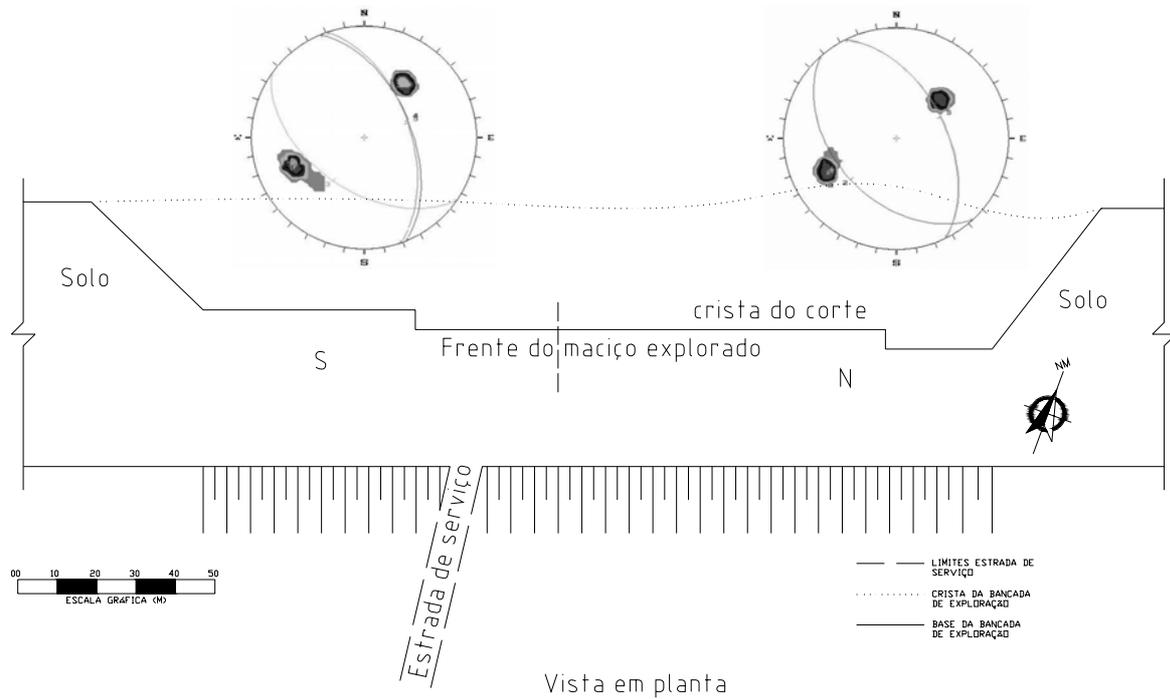


Figura 20- Croqui da Pedreira de Pedra Madeira, mostrando a localização relativa dos setores mapeados na classificação do maciço.

O croqui anterior (figura 20) foi realizado com base em dados adquiridos por um simples levantamento topográfico a trena (planimétrico) com a finalidade apenas de ajudar na localização global dos setores selecionados para levantamento geotécnico superficial.

Tabela 18- Descrição das descontinuidades encontradas no maciço da Pedreira de Pedra Madeira (Santo Antônio de Pádua/RJ).

| Maciço | Orientação das Descontinuidades | Espaçamento (m) | Persistência (m) | Abertura (mm) | Preenchimento  |                  | Percolação | Observações                                                |
|--------|---------------------------------|-----------------|------------------|---------------|----------------|------------------|------------|------------------------------------------------------------|
|        |                                 |                 |                  |               | Espessura (mm) | Tipo de Material |            |                                                            |
| N/01   | 072/58                          |                 |                  |               |                |                  | W1         | Foliação fechada                                           |
| N/02   | 234/44                          | 6 a 30          | x                |               |                |                  | W1         | Junta fechada sem preenchimento, grande espaçamento e seco |
| S/01   | 222/51                          | 1 a 6           | x                |               |                |                  | W1         | Junta fechada, persistente e seco                          |
| S/02   | 070/55                          |                 |                  |               |                |                  | W1         | Foliação fechada                                           |

De acordo com a tabela 12 (Sistema de Classificação Geomecânica RMR, modificado – Bieniawski, 1989) e também em acordo com o levantamento geológico-geotécnico de superfície realizado na área de estudo pode-se classificar o maciço rochoso da pedreira de Pedra Madeira como nas tabelas 19 e 20.

Tabela 19- Classificação Geomecânica do Maciço pelo Sistema RMR (Rock Mass Rating). Setor N do maciço da pedreira de Pedra Madeira.

**Maciço:** Pedreira Pedra Madeira

**Local:** Serra do Catete - Santo Antônio de Pádua/RJ

**Setor:** S

| A        | Parâmetro               | Classificação                | Peso           |
|----------|-------------------------|------------------------------|----------------|
| 1        | Res. Compressão (Mpa)   | 100 - 250                    | 12             |
| 2        | RQD (%)                 | 50 - 75                      | 13             |
| 3        | Espaç. Descontinuidades | > 2,00m                      | 20             |
| 4        | Cond. Descontinuidades  | Pouco rugosa, alteração leve | 25             |
| 5        | Ação água subterrânea   | Completamente seco           | 15             |
| <b>B</b> | <b>Ajuste</b>           | <b>Mergulho</b>              | <b>Peso</b>    |
|          | Talude                  | Moderado                     | -25            |
| <b>C</b> | <b>Classe do Maciço</b> | <b>Descrição</b>             | <b>Σ pesos</b> |
|          | III                     | Regular                      | <b>60</b>      |

| Maciço     | Coesão (Kpa) | Ang. Atrito |
|------------|--------------|-------------|
| Classe III | 200 - 300    | 25 - 35     |

Tabela 20- Classificação Geomecânica do Maciço pelo Sistema RMR (Rock Mass Rating). Setor S do maciço da pedreira de Pedra Madeira.

**Maciço:** Pedreira Pedra Madeira

**Local:** Serra do Catete - Santo Antônio de Pádua/RJ

**Setor:** N

| <b>A</b> | <b>Parâmetro</b>        | <b>Classificação</b>         | <b>Peso</b>    |
|----------|-------------------------|------------------------------|----------------|
| 1        | Res. Compressão (Mpa)   | 100 - 250                    | 12             |
| 2        | RQD (%)                 | 75 - 90                      | 17             |
| 3        | Espaç. Descontinuidades | > 2,00m                      | 20             |
| 4        | Cond. Descontinuidades  | Pouco rugosa, alteração leve | 25             |
| 5        | Ação água subterrânea   | Completamente seco           | 15             |
| <b>B</b> |                         |                              |                |
|          | <b>Ajuste</b>           | <b>Mergulho</b>              | <b>Peso</b>    |
|          | Talude                  | Moderado                     | -25            |
| <b>C</b> |                         |                              |                |
|          | <b>Classe do Maciço</b> | <b>Descrição</b>             | <b>Σ pesos</b> |
|          | II                      | Bom                          | <b>64</b>      |

| <b>Maciço</b> | <b>Coesão (Kpa)</b> | <b>Ang. Atrito</b> |
|---------------|---------------------|--------------------|
| Classe II     | 300 - 400           | 35 - 45            |

A análise da estabilidade do maciço foi avaliada a partir das projeções estereográficas das famílias de descontinuidades descritas anteriormente.

Como no item anterior, através da análise dos estereogramas foram verificados os prováveis mecanismos de ruptura, não considerando o ângulo de atrito do maciço, apenas a análise cinemática:

Setor N – Ruptura por tombamento pode ocorrer devido ao fato da concentração de pólos da família N/01 (foliação) estar localizada a praticamente na face do talude, sendo a mesma potencializada por juntas de alívio sub-horizontais localizadas ao longo do maciço. A família N/02 e sua interseção com a N/01 não causa instabilidade ao maciço, pois encontra-se direcionada perpendicular a face do mesmo.

Setor S – Ruptura por tombamento pode ocorrer devido ao fato da concentração de pólos da família S/02 (foliação) estar localizada a praticamente na face do talude, sendo a mesma potencializada por juntas de alívio sub-horizontais localizadas ao longo do maciço. A família

S/01 e sua interseção com a S/02 não causa instabilidade ao maciço, pois encontra-se direcionada perpendicular a face do mesmo.

Observa-se que os dois setores do maciço comportam-se de forma bem similar, denotando que as discontinuidades levantadas pertencem duas a duas a mesma família, ou seja N/01~S/04 (foliação do maciço) e N/02~S/03.

### **3.9- Critérios de Ruptura para Materiais Rochosos:**

Existem vários critérios de ruptura elaborados para as rochas, como por exemplo, Critério de Ruptura Linear de Mohr-Coulomb, Critério de Ruptura Não Linear de Ladanyi e Archambault (1972), Critério de Ruptura Não Linear de Bieniawski (1974), Critério de ruptura Não Linear de Barton e Choubey (1978) e Critério de Ruptura Não Linear de Hoek e Brown (1980). Esse último modificado por Hoek em 1994, principalmente na aplicação do critério para maciços fraturados, mantendo-se inalterado para aplicações em material rochoso intacto.

Usualmente os critérios são descritos através de relações entre as tensões principais ( $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ ) ou ainda entre a tensão normal e a cisalhante ( $\sigma$  e  $\tau$ ) na ruptura. Os critérios de ruptura para materiais rochosos são comumente aplicáveis a rocha intacta, podendo ser estendidos para o maciço rochoso com a anisotropia sendo considerada implicitamente em seu parâmetros.

#### **3.9.1- Critérios de Ruptura Não Linear de Hoek e Brown:**

Hoek & Brown (1980) revisando dados disponíveis sobre resistência de rochas intactas propuseram um critério empírico para rochas.

Nesse desenvolvimento buscou-se:

- Um critério que reproduzisse bem os resultados de ensaios de laboratório;

- Um equacionamento simples, que trabalhe com parâmetros adimensionais;
- Um critério que pudesse ser estendido para descrever a ruptura de maciços fraturados.

A forma mais geral do critério de ruptura de Hoek & Brown, que pode ser utilizada para maciços fraturados é representada pela equação (02).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c[(m_b \cdot \sigma_3 / \sigma_c) + s]^a \quad (02)$$

Onde:  $\sigma_1$  = tensão principal maior na ruptura;

$\sigma_3$  = tensão principal menor na ruptura;

$\sigma_c$  = resistência a compressão da rocha intacta;

$m_b$ ,  $s$  e  $a$  = parâmetros adimensionais que dependem do maciço.

Nesse critério, Hoek (1994) apresenta um novo parâmetro denominado Índice de Tensão Geológica – GSI (Geological Strength Index), para estimar os parâmetros de resistência e deformação dos maciços através da correlação com o sistema de classificação geomecânica RMR (Bieniawski, 1989). O parâmetro em questão é utilizado para estimar os valores das constantes  $m_b$ ,  $s$  e  $a$  do critério citado anteriormente e sua relação está definida nas seguintes equações:

$$\text{Para } RMR_{1976} > 18: \mathbf{GSI} = \mathbf{RMR}_{1976} \quad (03)$$

$$\text{Para } RMR_{1989} > 23: \mathbf{GSI} = \mathbf{RMR}_{1989} - 5 \quad (04)$$

Sendo o valor de RMR dado pela soma dos 4 primeiros parâmetros da classificação geomecânica de Bieniawski.

Caso os valores de  $RMR_{1976}$  e  $RMR_{1989}$  forem, respectivamente menores que 18 e 23, deve-se utilizar o sistema Q (Barton, 1974) na estimativa do GSI através da correlação mostrada na equação 05.

$$\mathbf{GSI} = 9 \cdot \log(Q) + 44 \quad (05)$$

As relações entre  $m_b/m_i$ ,  $s$  e  $a$  são dadas por:

$$m_b/m_i = \exp[(GSI - 100)/28] \quad (06)$$

$$\text{Para } \underline{GSI > 25}: s = \exp[(GSI - 100)/9] \quad (07)$$

$$a = 0,5 \quad (08)$$

$$\text{Para } \underline{GSI < 25}: s = 0 \quad (09)$$

$$a = 0,65 - GSI/200 \quad (10)$$

Tabela 21: Valores de  $m_i$  para a rocha intacta segundo classificação geológica das rochas. Observar que os valores entre parênteses são estimados (Hoek et al. 1995).

| Tipo de Rocha          | Classe            | Grupo                    | Textura              |                                |                            |                   |
|------------------------|-------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------|
|                        |                   |                          | Grossa               | Média                          | Fina                       | Muito Fina        |
| SEDIMENTAR             | Clástica          |                          | Conglomerado<br>(22) | Arenito<br>19                  | Siltito<br>9               | Argilito<br>4     |
|                        |                   |                          |                      | Grauvaca<br>(18)               |                            |                   |
|                        | Não-Clástica      | Orgânica                 |                      | Giz<br>7<br>Carvão<br>(8-21)   |                            |                   |
|                        |                   | Carbonata                | Brecha<br>(20)       | Calcáreo<br>Espáritico<br>(10) | Calcáreo<br>Micrítico<br>8 |                   |
|                        | Química           |                          | Gipsito<br>16        | Andrito<br>13                  |                            |                   |
| METAMÓRFICA            | Não-foliada       |                          | Mármore<br>9         | Hornfels<br>(19)               | Quartzito<br>24            |                   |
|                        | Levemente foliada |                          | Migmatito<br>(30)    | Anfibolito<br>31               | Milonito<br>(6)            |                   |
|                        | Foliada *         |                          | Gnaise<br>33         | Xisto<br>(10)                  | Filito<br>(10)             | Ardósia<br>9      |
| ÍGNEA                  | Ácida             |                          | Granito<br>33        |                                | Riolito<br>(16)            | Obsidiana<br>(19) |
|                        |                   |                          | Granodiorito<br>(30) |                                | Dacito<br>(17)             |                   |
|                        | Básica            |                          | Diorito<br>(28)      |                                | Andesito<br>19             |                   |
|                        |                   |                          | Gabro<br>27          | Dolerito<br>(19)               | Basalto<br>(17)            |                   |
|                        |                   |                          | Norito<br>(22)       |                                |                            |                   |
| Piroclástica extrusiva |                   | Brecha vulcânica<br>(20) | Brecha<br>(18)       | Turfa<br>(15)                  |                            |                   |

Os valores da tabela 21 referem-se a ensaios realizados na direção normal a foliação.

Os valores de  $m_i$  podem sofrer grandes variações caso a ruptura ocorra no plano de foliação.

Tabela 22: Valores dos parâmetros do critério de ruptura de Hoek & Brown, segundo a estrutura da rocha e a condição das paredes das descontinuidades (Hoek – modificado, 1994).

| CRITÉRIO DE RUPTURA DE HOEK & BROWN - MODIFICADO                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                           |                                      | C O N D I Ç Ã O D A S P A R E D E S                                                 |                                                                                           |                                                                                                          |                                                                                       |                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                           |                                      | MUITO BOM                                                                           | BOM                                                                                       | REGULAR                                                                                                  | RUIM                                                                                  | MUITO RUIM                                                                                  |
| $\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c (m_b \sigma_3 / \sigma_c + s)^a$<br>$\sigma_1$ = Tensão principal maior na ruptura<br>$\sigma_3$ = Tensão principal menor na ruptura<br>$\sigma_c$ = Resistência a compressão uniaxial da rocha intacta<br>$m_b, s$ e $a$ são constantes que dependem da composição, estrutura e a condição das superfícies do maciço rochoso |                                                                                                                                                           |                                      | Não intemperizadas, descontinuas, seladas, superfícies bem rugosas, não preenchidas | Ligeiramente intemperizada, contínua, selada, superfície rugosa, oxidadas não preenchidas | Moderadamente intemperizadas, contínuas, extremamente estreito, superfícies lisas, fracamente preenchida | Altamente intemperizada, muito estreitas, superfícies polidas, fortemente preenchidas | Altamente intemperizadas, contínuas, estreitas, superfícies polidas, fracamente preenchidas |
| ESTRUTURADA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | FRATURADO: maciço com bom imbricamento, não perturbado, com blocos cúbicos, formado por três descontinuidades ortogonais, blocos grandes a muito grandes. | $m_b/m_s$<br>$a$<br>Em<br>$v$<br>GSI | 0,60<br>0,190<br>0,5<br>75.000<br>0,2<br>85                                         | 0,4<br>0,062<br>0,5<br>40.000<br>0,2<br>75                                                | 0,26<br>0,015<br>0,5<br>20.000<br>0,25<br>62                                                             | 0,16<br>0,003<br>0,5<br>9.000<br>0,25<br>48                                           | 0,08<br>0,0004<br>0,5<br>3.000<br>0,25<br>34                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | MUITO FRATURADO: maciço imbricado, parcialmente perturbado com múltiplos blocos angulares formado por quatro ou mais famílias: tamanho de bloco médio.    | $m_b/m_s$<br>$a$<br>Em<br>$v$<br>GSI | 0,4<br>0,062<br>0,5<br>40.000<br>0,2<br>75                                          | 0,29<br>0,021<br>0,5<br>24.000<br>0,25<br>65                                              | 0,16<br>0,003<br>0,5<br>9.000<br>0,25<br>48                                                              | 0,11<br>0,001<br>0,5<br>5.000<br>0,25<br>38                                           | 0,07<br>0<br>0,53<br>2.500<br>0,3<br>25                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | FRATURADO COM VEIOS: com dobras e falhas, muitas intersecções de descontinuidades; blocos angulares pequenos.                                             | $m_b/m_s$<br>$a$<br>Em<br>$v$<br>GSI | 0,24<br>0,012<br>0,5<br>18.000<br>0,25<br>60                                        | 0,17<br>0,004<br>0,5<br>10.000<br>0,25<br>50                                              | 0,12<br>0,001<br>0,5<br>6.000<br>0,25<br>40                                                              | 0,08<br>0<br>0,5<br>3.000<br>0,3<br>30                                                | 0,06<br>0<br>0,55<br>2.000<br>0,3<br>20                                                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | TRITURADO: maciço baixamente imbricado e muito quebrado; tamanho dos blocos muito pequenos, angulares e não angulares.                                    | $m_b/m_s$<br>$a$<br>Em<br>$v$<br>GSI | 0,17<br>0,004<br>0,5<br>10.000<br>0,25<br>50                                        | 0,12<br>0,001<br>0,5<br>6.000<br>0,25<br>40                                               | 0,08<br>0<br>0,5<br>3.000<br>0,3<br>30                                                                   | 0,06<br>0<br>0,55<br>2.000<br>0,3<br>20                                               | 0,04<br>0<br>0,6<br>1.000<br>0,3<br>10                                                      |

O módulo de deformação in situ (Em) da tabela 23 está estimado em Mpa.

### 3.9.2- Aplicação do Critério de Ruptura Não Linear de Hoek e Brown para os Maciços em Estudo:

Os maciços rochosos estudados na região de Santo Antônio de Pádua são formados por gnaisses milonitizados, compartimentados por uma ou mais famílias de descontinuidades e uma foliação marcante, plana e sem preenchimentos, como visto anteriormente.

A Classificação Geomecânica para os maciços da pedreira Olho de Pombo e da pedreira Pedra Madeira deram os seguintes resultados, como mostrado anteriormente:

$$RMR_{\text{olho de pombo}} = 81 \text{ (média dos 3 setores do maciço)}$$

$$RMR_{\text{pedra madeira}} = 62 \text{ (média dos 2 setores do maciço)}$$

Contudo, considerando apenas a soma dos quatro primeiros parâmetros da classificação de Bieniawski (1989), temos que:

$$RMR_{\text{olho de pombo}} = 71 \text{ (média dos 3 setores do maciço)}$$

$$RMR_{\text{pedra madeira}} = 72 \text{ (média dos 2 setores do maciço)}$$

Na tabela 23 são apresentados os valores dos parâmetros do critério de ruptura de Hoek & Brown, e logo a seguir as equações 11 e 12 que representam o comportamento do maciço em função das tensões principais ( $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ ). Vale ressaltar que essas equações foram obtidas com os respectivos valores médios do  $RMR_{1989}$ .

Tabela 23: Constantes  $m$ ,  $s$  e  $a$  dos Maciços das pedreiras Olho de Pombo e Pedra Madeira de acordo com o critério de ruptura de Hoek & Brown (1994).

| <b>Maciço</b>        | <b>RMR<sub>1989</sub></b> | <b>GSI</b> | <b>mi</b> | <b>mb</b> | <b>s</b> | <b>a</b> |
|----------------------|---------------------------|------------|-----------|-----------|----------|----------|
| <b>Olho de Pombo</b> | 71                        | 66         | 33        | 9,8       | 0,023    | 0,5      |
| <b>Pedra Madeira</b> | 72                        | 67         | 33        | 10,15     | 0,026    | 0,5      |

Maciço Olho de Pombo:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c[(9,8\sigma_3/\sigma_c) + 0,023]^{0,5} \quad (11)$$

Maciço Pedra Madeira:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c[(10,15\sigma_3/\sigma_c) + 0,026]^{0,5} \quad (12)$$

O valor de  $\sigma_c$  (resistência a compressão da rocha intacta) determinado no final do capítulo 04, na seção referente aos ensaios de laboratório, fornece os seguintes valores médios de  $\sigma_c=134,35$  Mpa (Granito Olho de Pombo) e  $\sigma_c=160,32$  Mpa (Pedra Madeira Rosa). Nesse caso pode-se reescrever as equações 11 e 12 da seguinte forma:

Maciço Olho de Pombo:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 134,35[(0,0729\sigma_3) + 0,023]^{0,5} \quad (11.1)$$

Maciço Pedra Madeira:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 160,32[(0,0633\sigma_3) + 0,026]^{0,5} \quad (12.1)$$

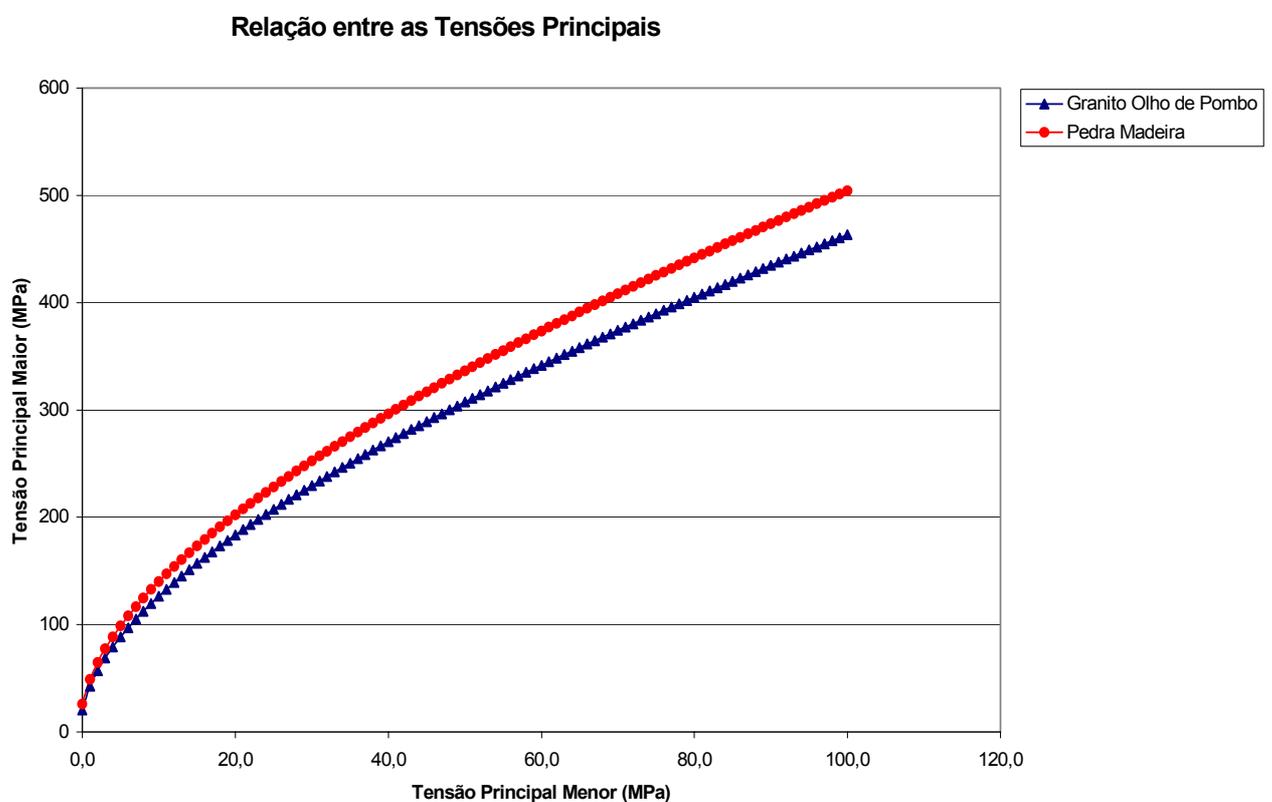


Figura 21- Representação gráfica das equações 11.1 e 12.1 que mostra o comportamento dos maciços estudados em função de suas tensões principais ( $\sigma_1$  – tensão principal maior e  $\sigma_3$  – tensão principal menor).

## **CAPÍTULO 4: TENSÕES EM MACIÇOS ROCHOSOS**

### **4.1- Origem das tensões nos maciços rochosos:**

Os maciços rochosos existentes na crosta terrestre estão submetidos a tensões cuja origem podem ser atribuídas como natural ou induzida. As tensões naturais possuem duas fontes principais, são elas: o peso, que gera as tensões gravitacionais e o tectonismo, que gera as tensões tectônicas. As tensões induzidas resultam de escavações ou construções nas quais a retirada ou acúmulo de material são capazes de induzir tensões.

O peso de uma coluna de rocha sobre um determinado ponto gera tensões que aumentam sua magnitude com a profundidade, em decorrência do aumento da espessura e peso do material sobreposto. Essas tensões têm direção vertical, com sentido para o centro da terra e podem ser consideradas como uma das tensões principais, desde que não hajam efeitos causados por processos tectônicos ativos, topografia ou estruturas geológicas.

As tensões tectônicas são originadas por um conjunto de processos geológicos que atuam na litosfera e refletem-se em sua camada mais superficial, apresentando espessura entre 6 e 35 km, denominada como crosta rígida (Park, 2002).

A orientação dessas tensões, obtida principalmente através de mecanismos focais de terremotos, análises de estruturas geológicas, análises de rupturas externas, medidas in situ e alinhamentos de vulcões ativos, tem sido relacionada aos diferentes ambientes geotectônicos existentes na crosta terrestre. Através da figura 22, Zoback et al. (1989) apresentam, de forma simplificada, a origem e orientação das tensões tectônicas existentes na crosta rígida da Terra.

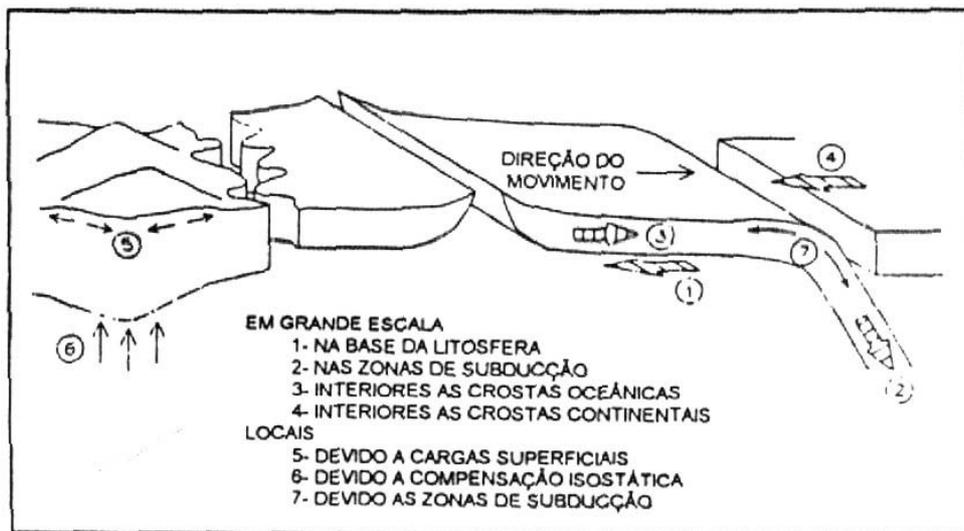


Figura 22: Origem e orientação das tensões tectônicas (Zoback et al. 1989).

Um outro tipo de tensões naturais são as tensões originadas por fontes térmicas como o sol, a radioatividade ou processos geológicos. O aquecimento e o resfriamento da superfície dos maciços rochosos expostos a variações diurnas ou sazonais da temperatura ambiente, bem como o aquecimento devido a fontes de calor como a radioatividade ou ainda processos geológicos como intrusões magmáticas, por exemplo, geram tensões devido à expansão e à contração dos grãos minerais com diferentes propriedades termoelásticas. Um exemplo de tensões consideradas, também como de origem térmica, são as tensões geradas devido à expansão volumétrica da água, quando congelada no interior de microfissuras existentes nas rochas encontradas em regiões que apresentam um inverno rigoroso.

Tanto o peso, como o tectonismo podem gerar um outro tipo de tensões denominadas como tensões residuais. Isto se deve ao fato de que a profundidade, bem como o nível de tensão e temperatura em que são formadas as rochas sedimentares, ígneas e metamórficas, muitas vezes diferem bastante das condições apresentadas pelo ambiente em que as rochas encontram-se atualmente. Os maciços constituídos por rochas metamórficas, por exemplo, podem apresentar estruturas geológicas e conteúdo mineralógico indicativos de que essas rochas formaram-se em grandes profundidades, submetidas a altas tensões e temperaturas. Quando, por algum motivo, as rochas encontram-se em profundidades mais rasas, submetidas

a temperaturas mais baixas, as tensões, em muitos casos, não são totalmente aliviadas, restando ainda tensões "acumuladas" nos maciços, denominadas como tensões residuais.

Em maciços submetidos a períodos de glaciação ou ciclos erosivos relativamente rápidos, a espessura do material preexistente origina tensões na superfície rochosa que não são totalmente aliviadas durante os períodos de degelo ou erosão, permanecendo assim, tensões de alta magnitude. Este é um exemplo típico da ocorrência de tensões residuais, e ocorre, analogamente, em solos pré-adensados, que já tenham sido submetidos a um ciclo de carregamento e descarregamento. Como a origem dessas tensões pode estar relacionada a diferentes fontes, o conceito de tensões residuais tem sido utilizado de forma bem ampla, como tensões em equilíbrio, confinadas no interior de corpos finitos na ausência de tensões superficiais externas sendo aplicadas, estas últimas podendo ser super-impostas às tensões residuais (Brown, 1994).

Tensões denominadas como induzidas são originadas, por exemplo, quando uma escavação subterrânea é feita em um maciço rochoso. Neste caso, as tensões preexistentes são perturbadas de tal forma que novas tensões são induzidas nas proximidades da escavação. O novo campo de tensões, induzido pela abertura, pode ser representado através de trajetórias de tensões principais, como por exemplo, para um material existente em torno de uma abertura circular numa placa elástica, submetida a um campo de tensões uniaxial (Hoek & Brown, 1982).

As tensões principais são perturbadas nas proximidades da abertura, não sendo mais afetadas após uma determinada distância desta abertura, isto é, fora da zona de influência da escavação onde as tensões existentes são denominadas como tensões induzidas.

#### **4.2 – Determinação das tensões:**

Um ponto interior a um maciço rochoso está submetido a um estado tridimensional de tensões formado por várias componentes de diferentes origens. Desta forma, o termo tensões

in situ é utilizado para denominar tensões de qualquer natureza presentes no interior de um maciço rochoso.

O estado de tensões em um ponto é completamente definido pela magnitude e direção das três componentes principais de tensão. Para isto, o problema pode ser formulado de duas maneiras: na primeira, precisa-se conhecer as (06) seis componentes de um tensor 3D (Eq. 13), o que define completamente o tensor de tensões principais ou da segunda maneira, é necessário conhecer as três magnitudes das tensões principais e conhecer suas direções (Eq. 14), totalizando também seis incógnitas.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} ; \text{ onde } \tau_{xy} = \tau_{yx} ; \tau_{xz} = \tau_{zx} \text{ e } \tau_{zy} = \tau_{yz} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad \text{direções principais} \quad (14)$$

Na solução do problema exposto, para se determinar às tensões apresentadas anteriormente, usualmente são utilizados modelos matemáticos ou métodos de medidas in situ. Os modelos matemáticos representam um conjunto de métodos para avaliação das tensões, a partir de algumas hipóteses simplificadoras, estabelecidas, principalmente, quanto ao comportamento mecânico do maciço. Uma das vantagens dos modelos matemáticos é o de poder analisar, por exemplo, quais os efeitos que podem ser causados pela anisotropia, heterogeneidade e topografia do maciço rochoso.

As tensões gravitacionais constituem um bom exemplo de componentes de tensão que podem ser obtidas por cálculo direto, utilizando um modelo matemático simplificado, aplicado a um meio contínuo, linear e elástico. Este modelo utiliza as equações de equilíbrio da elasticidade, aplicadas a um maciço submetido apenas à ação da gravidade. Considerando um elemento infinitesimal, para o qual se assume um sistema de eixos (x;y;z) com o eixo z na direção vertical (figura 24), Jaeger & Cook (1969) apresentam o cálculo da tensão na direção do eixo vertical, adotando a única hipótese de deformação uniaxial na direção vertical ( $\epsilon_z \neq 0$ ), não existindo nenhum deslocamento ou deformação horizontal ( $\epsilon_x = \epsilon_y = \gamma_{xy} = \gamma_{yz} = \gamma_{xz} = 0$ ). Assim, tomando-se as componentes das forças de massa como  $X=Y=0$  e  $Z=-g$ , as equações de equilíbrio elástico são então satisfeitas por:

$$\tau_{xy} = \tau_{zx} = \tau_{yz} = 0 \quad \text{e} \quad \sigma_z = \tilde{\rho}g.z \quad (15)$$

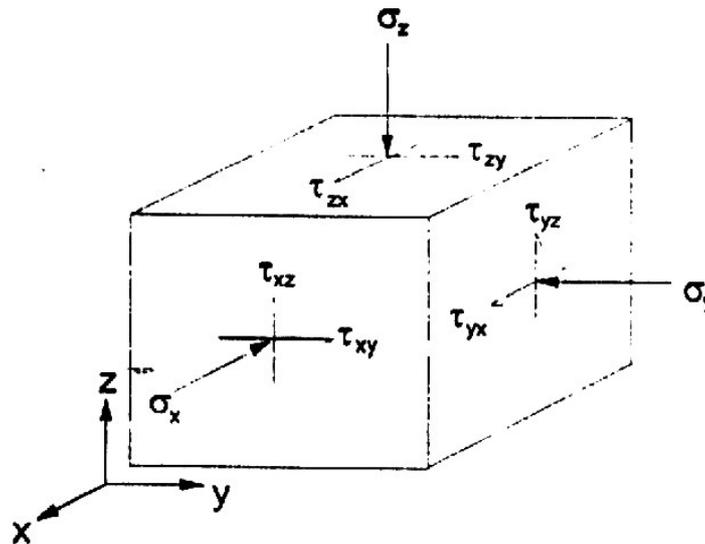


Figura 23: Tensões atuantes em um elemento infinitesimal de um maciço rochoso, considerando o eixo z vertical.

Sendo assim, a magnitude da tensão gravitacional, na direção do eixo z, pode ser calculada diretamente através do produto do peso específico da rocha ( $\gamma$ ) pela profundidade (z) abaixo da superfície até o ponto onde se deseja conhecer as tensões. Aplicando este mesmo raciocínio para um maciço rochoso considerado como um espaço semi-infinito, com uma topografia plana horizontal, constituído por camadas horizontais de espessura h, a tensão

vertical (na direção do eixo z) pode ser calculada como o somatório do produto do peso específico de cada camada por sua respectiva espessura (Eq. 16).

$$\sigma_y = \sum \gamma_i \cdot h_i ; \quad \text{com } i = 1 \dots n \quad (16)$$

Adotando-se a formulação do problema como na Eq. 14, percebe-se que a tensão vertical encontrada é uma tensão principal, uma vez que, no plano horizontal não atuam tensões cisalhantes. Para definir completamente o tensor 3D resta o cálculo de  $\sigma_h$ . Neste caso, se o ponto "P" encontra-se submetido apenas à tensão vertical e não se encontra confinado, podendo deformar-se horizontalmente, então o valor  $\sigma_v$  corresponde a uma tensão principal originada por um campo de tensões gravitacionais unidimensional. No entanto, os pontos interiores ao maciço rochoso estão confinados horizontalmente e, neste caso, as tensões verticais geram componentes horizontais, constituindo o campo de tensões gravitacionais bidimensionais.

$$\sigma_h = (v/1-v) \cdot \sigma_v \quad ; \quad \text{onde } v \text{ é o coeficiente de Poisson} \quad (17)$$

Sendo assim, se a hipótese de deformação lateral nula é feita e considerando que o material é elástico, linear e isotrópico  $\sigma_x = \sigma_y = (v/1-v) \cdot \sigma_z$ . Como  $v$  varia entre 0 e 0,5 (material elástico), tem-se que  $\sigma_x = \sigma_y < \sigma_z$  e, conseqüentemente:  $\sigma_v = \sigma_z = \sigma_1$  e  $\sigma_h = \sigma_x = \sigma_y = \sigma_2 = \sigma_3$ .

A relação entre as componentes horizontal e vertical das tensões gravitacionais é dada, desta forma, por uma constante  $k$ , onde  $k = \sigma_h/\sigma_v$ . O valor desta constante, segundo Terzaghi, depende da história geológica do maciço rochoso, podendo variar com a profundidade e mesmo variar na direção horizontal numa mesma profundidade. Estes mesmos autores sugerem que o valor de  $k$  dado anteriormente, em que  $k = v/1-v$ , deve ser adotado apenas para

regiões com topografia horizontal, com maciços apresentando um comportamento elástico e isotrópico, tectonicamente não perturbados, onde as tensões geradas no plano horizontal são iguais e não existem deformações nessas direções. Ressaltam ainda, que a temperatura deve permanecer constante desde a deposição e que as camadas não sejam submetidas a cargas temporárias (gelo ou camadas removidas por erosão). Desta forma, se  $\nu$  tem valor aproximado de  $1/4$ , as tensões horizontais seriam da ordem de  $1/3$  das tensões verticais.

Se um maciço rochoso com as mesmas características dadas anteriormente for submetido a um descarregamento, ou seja, tiver suas camadas removidas por erosão, as tensões horizontais podem aumentar em relação à vertical. Considerando um elemento de rocha na profundidade  $Z_0$  e com valor inicial de  $k = k_0$ , tem-se o valor de  $\sigma_v$  inicial dado por  $\tilde{\gamma}z_0$  e o valor de  $\sigma_h$  dado por  $k_0 \cdot \gamma z_0$ . Após a remoção do material sobreposto de espessura  $\Delta_z$  (variação da profundidade), o elemento de rocha encontra-se em uma nova profundidade dada por um valor  $z$ . Devido ao descarregamento da tensão vertical de  $\gamma \cdot \Delta_z$ , a tensão horizontal tem seu valor reduzido de  $\gamma \cdot \Delta_z (\nu/1-\nu)$ . Sendo assim, após a erosão, os valores das tensões vertical e horizontal são expressos segundo as equações 18 e 19 e o novo valor de  $k$  é dado pela equação 20 a seguir:

$$\sigma_v = \tilde{\gamma}z_0 - \gamma \cdot \Delta_z = \tilde{\gamma}z \quad (18)$$

$$\sigma_h = k_0 \cdot \gamma \cdot z_0 - (\nu/1-\nu) \cdot \gamma \cdot \Delta_z \quad (19)$$

$$k(z) = k_0 + \{[k_0 - (\nu/1-\nu)]\Delta_z\} 1/z \quad (20)$$

A erosão tende a aumentar o valor de  $k$  e a tensão horizontal torna-se maior do que a vertical, indicando, desde que não hajam esforços tectônicos envolvidos, a presença de tensões consideradas como residuais. Goodman (1989) demonstra que, embora o valor da

tensão vertical seja sempre calculado como  $\gamma_z$ , o valor da tensão horizontal situa-se num intervalo dado por dois extremos, onde o valor extremo baixo é dado por  $k_a\sigma_v$  e o valor extremo alto é dado por  $k_p\sigma_v$ , o que correspondem respectivamente, aos limites no qual ocorre uma falha normal ou uma falha de empurrão. É importante notar que a presença de tensões horizontais maiores do que as tensões verticais podem representar exclusivamente um descarregamento de tensões gravitacionais, sem qualquer influência de mecanismos tectônicos.

As tensões de origem tectônica podem estar presentes mesmo em regiões consideradas tectonicamente inativas ou estáveis, termos como "tectonicamente não perturbadas", "passivas" ou "estáveis" não indicam ausência de tensões tectônicas, mas referem-se apenas a regiões que não apresentem atividade sismotectônica atual. A magnitude dessas tensões pode ser obtida através de modelos matemáticos, desde que, sejam adotadas uma série de aproximações. É importante salientar também que nos cálculos desses casos, são feitas várias hipóteses, como por exemplo, a de que as únicas tensões horizontais existentes são devido ao peso do maciço. Gardner (1989) mostra que nas margens continentais consideradas passivas, é possível a existência de soerguimentos crustais devido a vários processos geológicos, entre os quais, o autor cita a existência de tensões horizontais provenientes da tectônica de placas.

Nesses modelos, utilizados para calcular as tensões gravitacionais, residuais e tectônicas, vale lembrar que a temperatura deva permanecer constante desde a deposição das camadas geológicas ou, em outras palavras, desde a formação das rochas consideradas. Isto se deve ao fato de que, um meio sólido quando submetido a variações de temperatura pode transferir calor de um ponto a outro expandindo ou contraindo seu volume, dando origem a tensões térmicas. Considerando um maciço rochoso como um meio unicamente sólido, a condução de calor num ponto interior a esse meio, estabelecida pela Lei de Fourier, indica o fluxo de calor na direção da diminuição da temperatura, indo da superfície de maior temperatura para a de menor temperatura.

Conforme visto anteriormente, o cálculo das tensões naturais, sejam elas de origem gravitacional, tectônica, residual ou térmica, pode ser feito através de modelos matemáticos, que possibilitem também o cálculo das tensões induzidas por escavações subterrâneas realizadas em maciços rochosos. Para uma escavação circular em um meio isotrópico e homogêneo, considerando uma situação de deformação plana, onde o campo de tensões é dado por  $\sigma_v$  e  $\sigma_h$  (vertical e horizontal), pode se estabelecer às tensões em qualquer ponto ao redor dessa escavação adotando-se a solução de Kirsch. A influência da escavação no campo de tensões naturais, existentes pré-escavação, diminui rapidamente a partir de um valor  $r = 3a$  (onde  $a$  é o raio da escavação e  $r$  é a distância a partir da parede lateral da escavação) e a relação entre a tensão tangencial à escavação e a tensão vertical passa a ser muito próxima da unidade, ou seja, a essa distância da escavação, as tensões naturais não seriam mais perturbadas pela mesma (Hoek & Brown, 1982).

Uma outra situação comum é a existência de escavações com uma forma aproximadamente elíptica. Conforme apresentam Hoek & Brown (1982), o cálculo das tensões tangenciais nas proximidades de uma escavação em um meio elástico, homogêneo e isotrópico, submetido a um campo de tensões biaxial, pode ser feito através de equações, utilizando-se os raios de curvatura da seção elíptica da escavação.

A determinação das tensões de origem natural ou induzida através da utilização de modelos matemáticos, tem possibilitado também uma avaliação dos aspectos que podem influenciar na magnitude e orientação das tensões *in situ*. Normalmente as rochas apresentam planos bem definidos, que podem contribuir para uma anisotropia dos parâmetros de deformabilidade. No caso de rochas sedimentares, essa anisotropia pode aparecer como função da presença de microestruturas formadas durante a sedimentação das camadas geológicas. Em rochas ígneas o comportamento anisotrópico deve-se à presença de foliações formadas pela orientação de minerais ou agregados de minerais ou no caso de rochas graníticas, a anisotropia relaciona-se diretamente à presença de microfissuras. Rochas

metamórficas são normalmente as que apresentam maior anisotropia, pois possuem estruturas geradas por deformações que a rocha sofreu no passado geológico.

A não consideração da anisotropia de deformabilidade no cálculo das tensões gravitacionais pode, teoricamente, introduzir erros significativos. Através de ensaios de laboratório ou campo, é possível verificar se a rocha apresenta diferentes propriedades de deformabilidade em diferentes direções, possibilitando assim, a utilização de um modelo que melhor represente esta anisotropia. Dentro deste contexto, Amadei et al. (1987, 1988), Amadei & Pari (1992) e Amadei (1993) introduziram a anisotropia no cálculo das tensões gravitacionais, analisando maciços transversalmente isotrópicos. Nessas análises esses autores não consideram o efeito de uma superfície topográfica irregular, consideram o maciço rochoso com um comportamento linear elástico e homogêneo, com uma superfície topográfica horizontal.

Esses autores demonstram através de uma análise paramétrica que, dependendo das propriedades elásticas dos maciços anisotrópicos, bem como da orientação dos planos de anisotropia, as componentes horizontais de tensão podem ser maiores, iguais ou menores do que a componente vertical, resultado bastante diferente do obtido para maciços isotrópicos.

Amadei et al. (1988) apresentam soluções analíticas para o cálculo das tensões de origem gravitacional em maciços heterogêneos constituídos por camadas horizontais homogêneas, isotrópicas ou transversalmente isotrópicas, demonstrando que o coeficiente  $k$  pode variar apenas entre 0 e 1, se a camada for considerada isotrópica. No entanto, este coeficiente pode ser maior, igual ou menor do que a unidade, quando a camada for considerada transversalmente isotrópica. Este resultado, obtido adotando-se a hipótese de deformação uniaxial na direção vertical, significa que uma componente horizontal pode ser uma tensão principal maior em uma camada e ser uma tensão principal menor na camada inferior.

É notório que a idealização de uma superfície topográfica horizontal, para o cálculo de tensões gravitacionais, pode introduzir erros significativos. Segundo Amadei (1993), nas regiões próximas à superfície, na ausência de cargas superficiais sendo aplicadas, as tensões principais são paralelas e perpendiculares à superfície exposta do maciço rochoso, tendendo às direções vertical e horizontal em regiões profundas. Este efeito deve-se a influência da topografia sobre as tensões gravitacionais. Quando são aplicadas cargas superficiais, a trajetória de tensões principais sofre influência desse carregamento.

A influência da topografia do maciço rochoso no cálculo das tensões gravitacionais tem sido estudada por vários autores como Mctigue & Mei (1981); Savage et al. (1985); Liao et al. (1992); Pan & Amadei (1994) e Pari et al. (1994), e mostram que as expressões para obtenção das tensões gravitacionais em maciços isotrópicos e homogêneos, considerando a topografia representada por extensas e simétricas elevações e vales (condição de deformação plana), dependem tanto da geometria do maciço quanto do coeficiente de Poisson. Para maciços isotrópicos, esses autores mostram que tensões horizontais compressivas, com magnitude maior do que as tensões verticais podem desenvolver-se nas proximidades das linhas de crista das elevações, diminuindo em função do aumento do coeficiente de Poisson, e que tensões horizontais de tração, as quais tornam-se compressivas devido ao aumento do Coeficiente de Poisson, podem desenvolver-se sob os vales topográficos.

Conforme visto, a determinação do campo de tensões gravitacionais, deve levar em consideração os possíveis efeitos causados pela heterogeneidade e topografia. Além disso, em muitas regiões da Terra, o tectonismo não pode ser desprezado e deve ser adicionado na determinação das tensões existentes no interior dos maciços rochosos. Da mesma forma, para as tensões gravitacionais, a anisotropia, a heterogeneidade e a topografia são aspectos que podem modificar o estado de tensões induzido pelo tectonismo.

O cálculo das tensões existentes no interior dos maciços rochosos através de modelos matemáticos tem possibilitado, sobretudo, uma avaliação dos efeitos causados pela

anisotropia e pela topografia na magnitude e direção das tensões *in situ*. Entretanto, para o caso de maciços rochosos constituídos por rochas anisotrópicas e heterogêneas, apresentando uma topografia irregular, submetidos a tensões de diferentes origens, o cálculo das tensões torna-se bastante complexo. Nestes casos, técnicas de medidas *in situ* têm sido muito utilizadas, uma vez que elas determinam o estado absoluto de tensões existente no maciço, ou seja, as tensões totais que existem no interior do maciço rochoso.

Hoek & Brown (1978) apresentam uma compilação de várias medidas de tensões *in situ*, realizadas em várias regiões da Terra e utilizando diferentes técnicas de medição. Na figura 24, esses autores mostram a variação da tensão vertical ( $\sigma_z$ ) com a profundidade ( $z$ ), onde pode-se verificar que as tensões verticais medidas seguem uma tendência dada por uma relação linear, na qual:

$$\sigma_z = 0,027.z \quad ; \quad \text{onde } \sigma_z \text{ (Mpa) e } z \text{ (m)} \quad (21)$$

Isso confirma, de certo modo, o cálculo através de  $\gamma_z$ , visto que os valores de  $\gamma$  das rochas encontradas na crosta terrestre, de acordo com Goodman (1989), permanecem aproximadamente entre 0,020 MPa/m e 0,030 MPa/m (tabela 24). Ou seja, a magnitude das tensões verticais pode ser estabelecida, a grosso modo, como função do produto de uma constante ( $\gamma$ ) pela profundidade.

Tabela 24: Valores aproximados do peso específico ( $\gamma$ ) de rochas comuns na Terra (Goodman, 1989).

| <b>Rocha</b> | <b><math>\gamma</math> (MPa/m)</b> |
|--------------|------------------------------------|
| Sienito      | 0,025                              |
| Granito      | 0,026                              |
| Gabro        | 0,029                              |
| Sal          | 0,020                              |
| Calcáreo     | 0,020                              |
| Mármore      | 0,027                              |
| Anfibolito   | 0,029                              |
| Basalto      | 0,027                              |

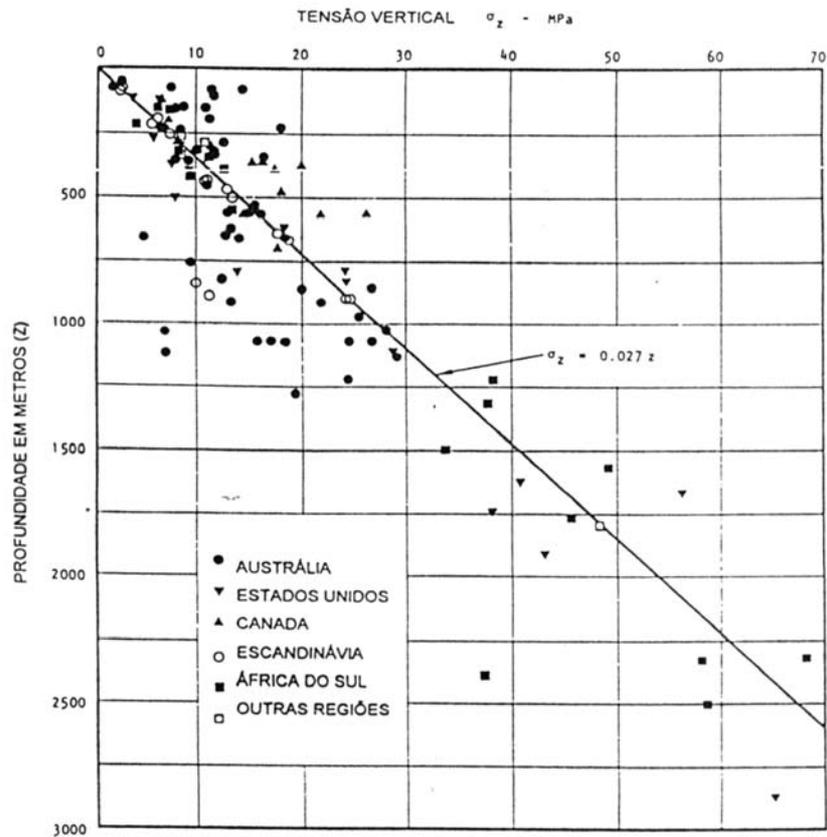


Figura 24: Dados de tensões verticais obtidos por diferentes técnicas de medidas *in situ* para vários locais da Terra (Brown & Hoek, 1978).

Na próxima figura (Fig. 25) percebe-se uma grande dispersão dos valores para profundidades menores que 1000m, em que  $k$  pode variar de 0,5 até 3,5. Para as profundidades menores que 500m, as tensões horizontais apresentam valores significativamente maiores do que as tensões verticais.

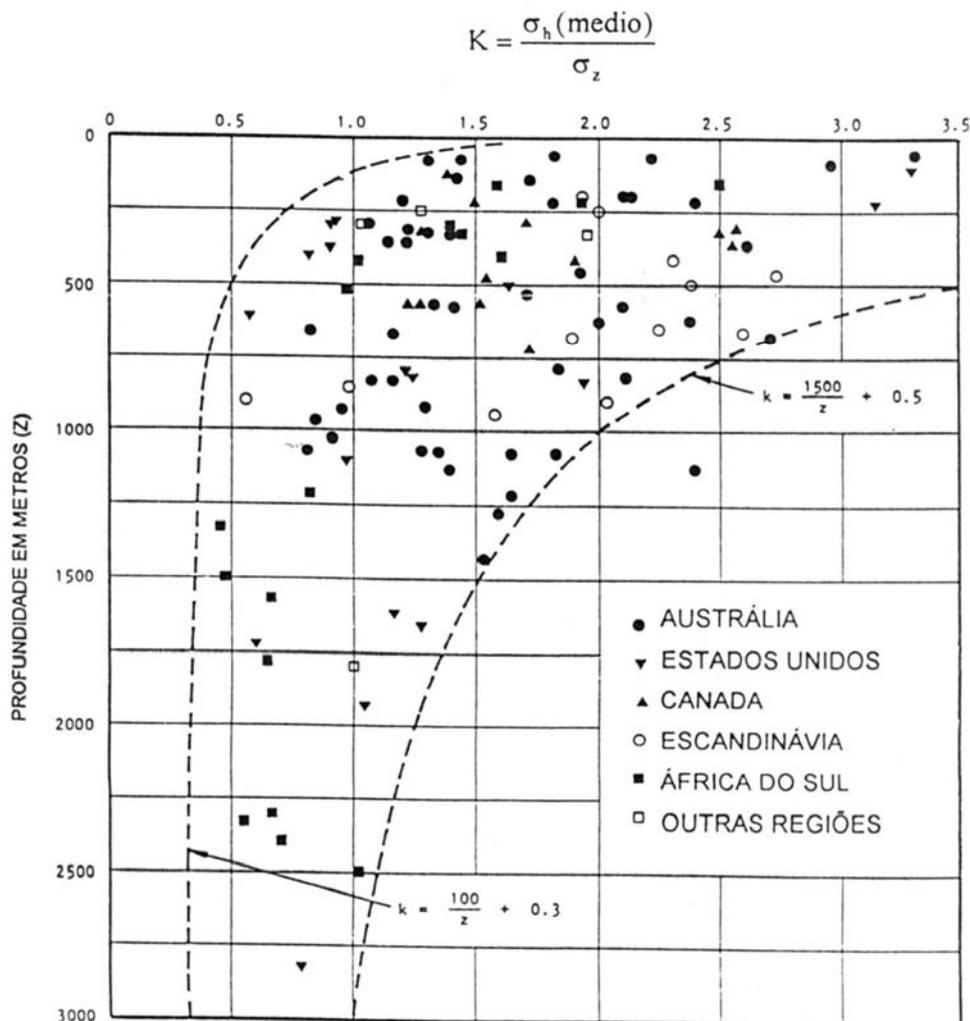


Figura 25: Variação da razão entre a tensão horizontal média e a tensão vertical para diferentes profundidades abaixo da superfície (Hoek & Brown, 1978).

Cabe ressaltar que as tensões geradas no plano horizontal muitas vezes não são iguais. Em muitos casos existe uma diferença significativa entre as tensões horizontais em diferentes direções. Evidentemente quando as tensões no plano horizontal foram consideradas iguais e o valor de  $k$  sugerido da ordem de  $1/3$ , fez-se uma série de hipóteses simplificadoras sobre as características e comportamento do maciço. O aspecto mais importante a ser evidenciado aqui é a presença de tensões horizontais altas (maiores do que as componentes verticais) nas partes mais superficiais da crosta terrestre.

Apesar de vários autores atribuírem a presença de altas tensões horizontais na parte superficial da crosta terrestre a causas tectônicas. Outros fatores podem também ser responsáveis pela ocorrência das mesmas, como por exemplo, a curvatura do planeta e a espessura da crosta rígida.

#### 4.2.1- Medições *In Situ*:

Os trabalhos pioneiros no desenvolvimento de técnicas de medição de tensões *in situ*, datam da década de 50 e 60, quando foram apresentadas as técnicas do fraturamento hidráulico, do macaco plano e técnicas baseadas na sobrefuração (ISRM, 1987). Pelo fato da tensão não ser medida diretamente essas técnicas baseiam-se nas "respostas" dadas pelos maciços rochosos quando perturbados de alguma forma. Essa resposta, geralmente é medida em forma de deslocamento ou deformação.

Apresenta-se a seguir um resumo das técnicas de medidas *in situ* existentes atualmente, dividindo-as da seguinte maneira:

##### 1) técnicas baseadas no princípio do restabelecimento

- Macaco Plano Convencional (*Flat Jack*);
- *Small Flat Jack* (SFJ);

##### 2) técnicas baseadas no princípio da recuperação

- Pinos de Referência;
- Variação do diâmetro dos furos;
  - Célula BDG (*Borehole Deformation Gage*) do *U.S. Bureau of Mines*;
  - Célula com Apalpadores;
  - Célula da Universidade de *Liège*;
  - Célula Japonesa (*Central Research Institute of Electric Power Industry of Japan*);
  - Célula do CERCHAR (*Centre de Recherches de Charbonnages*);
- Deformação da parede dos furos;
  - Célula do CSIR (*Council for Scientific and Industrial Research*) ou *Célula de Leeman*;

- Célula CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*);
- Célula SSPB (*Swedish State Power Board*);
- Célula LUH (*Universidade de Tecnologia Lulea*);
- *Borehole Slotter*;
- *Jack Fracturing*;
- Deformações no fundo dos furos;
  - Célula *Doorstopper*;
  - Célula CEJM (*Cellule Extensométrique à Jauges Multiples*);
  - Célula Hemisférica;

### 3) técnicas baseadas no princípio do fraturamento;

- Fraturamento Hidráulico;
- Fraturamento Dilatométrico;
- *Borehole Breakouts*;
- *Remaniement des carottes*;

### 4) técnicas baseadas em outros princípios;

- Velocidade Sônica;
- Efeito Kaiser.

Cada uma dessas técnicas obviamente possui vantagens e desvantagens, sobretudo em função do custo operacional, limitações em relação ao grau de fraturamento, alteração ou saturação do maciço rochoso, profundidade de realização das medidas, conhecimento prévio da orientação das tensões principais e em relação ao modelo de interpretação. Este último refere-se, principalmente, a possibilidade ou não de se introduzir, na determinação das tensões

principais (magnitude e direção), os efeitos que podem ser causados por um comportamento não linear anisotrópico ou heterogêneo do maciço rochoso.

No presente trabalho, utilizou-se uma técnica baseada na leitura de deformações tomadas em direções pré-estabelecidas e determinadas através de pinos de referência fixados na superfície do maciço, quando o mesmo, durante a fase de exploração, sofria cortes com maçarico (técnica do *Flame Jet*). Dessa forma, os cortes executados no maciço faziam com que regiões em que o mesmo encontrava-se confinado, sofressem relaxamento das tensões, demonstrando isso em forma de deformações lidas com extensômetro situado na zona de influência das tensões.

A escolha desse método deveu-se ao baixo custo na obtenção dos dados de deformação e principalmente ao processo de lavra local (utilização de maçarico) o qual possibilitou toda a idealização do trabalho, que é descrita a seguir.

#### **4.2.2- Trabalho de Campo:**

No capítulo anterior, todo o trabalho de campo realizado objetivava levantar dados para a classificação geomecânica dos maciços em estudo. Agora, o objetivo dessa nova empreitada em campo é a obtenção de leituras de deformação dos maciços rochosos, com o intuito de através das relações entre tensões e deformações de meios contínuos, se determinar as tensões *in situ* dos mesmos.

Sabendo-se a priori onde os funcionários da pedreira iriam efetuar cortes com maçarico nos maciços, com a finalidade de se iniciar uma nova frente de lavra, posicionou-se, de acordo com o desenho da figura 30, pinos de referência nas possíveis zonas de influência, com os quais determinamos os deslocamentos sofridos no maciço, conforme o andamento da execução do corte. O corte foi realizado na primeira bancada do talude, onde se pode observar uma pequena inclinação (10°) Norte-Sul no patamar da mesma. A orientação do talude e do

cutte são mostradas no tabela 25, assim como as orientações dos segmentos formados pelos pinos colados na superfície da bancada.

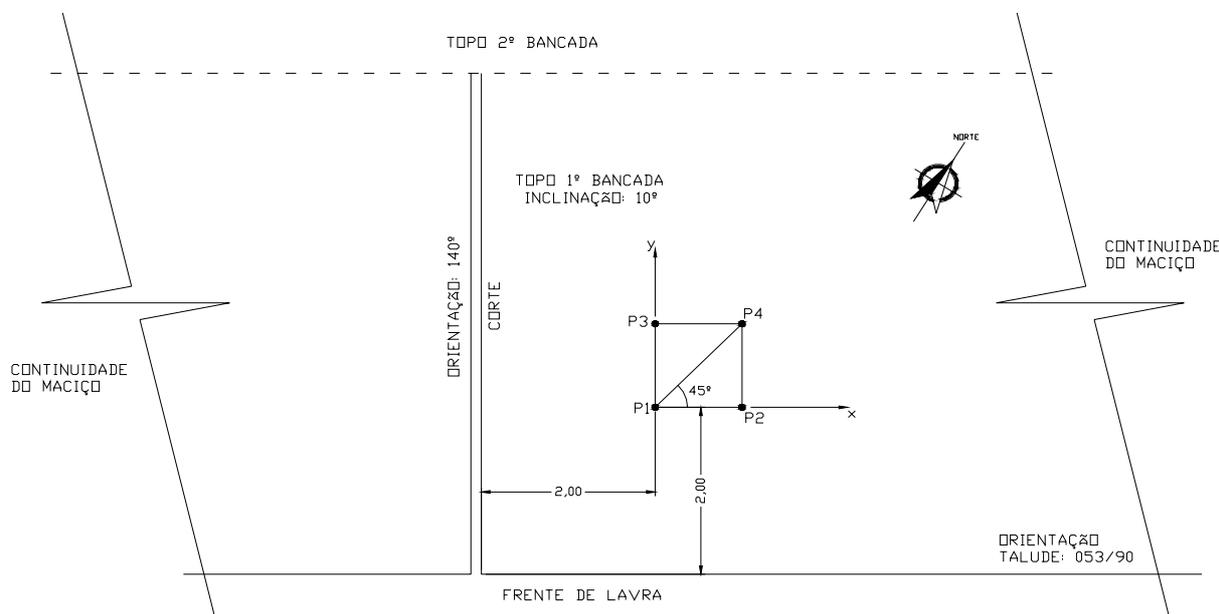


Figura 26: Esquema do posicionamento dos pinos (P) em relação ao talude e ao corte efetuado no mesmo com *Flame Jet* (Pedreira Olho de Pombo). Observar que a geometria dos segmentos formam um quadrado (ângulo bisetris =  $45^\circ$ ).

Os pinos foram fixados na superfície da rocha com um adesivo epóxi de secagem rápida (Araldite Hobby–10 minutos), sendo a superfície da bancada limpa com jato de ar comprimido para que a aderência dos pinos a superfície seja a melhor possível. Optou-se por um adesivo em forma de resina, pois dessa forma garante-se que a maior parte dos poros na superfície da rocha sejam preenchidos pela mesma, fazendo com que toda a base do pino fique em contato com a superfície do material.

O posicionamento e a direção dos segmentos que ligam os pontos colados na bancada foram propositadamente escolhidos para serem paralelos ao corte, paralelos a orientação do talude e fazendo um ângulo de  $45^\circ$  com os mesmos. Dessa forma será possível aferir deformações em quatro (04) direções diferentes.

Observa-se nos dados da tabela 25, que as deformações na direção perpendicular a face do talude (P1-P3 e P2-P4) são muito pequenas, o que já era esperado, pois nessa direção o maciço não se encontra mais em estado de confinamento. Ao contrário, nas direções paralelas à face do talude (P1-P2 e P3-P4), as deformações são maiores que as anteriores e crescem gradativamente a medida que o corte é aprofundado. Essas deformações ocorrem devido ao alívio das tensões confinantes existentes no maciço à medida que se executa o corte no mesmo.

Na tabela 25, observa-se também, na coluna das leituras, que existem 03 leituras diferentes para cada segmento orientado, sendo a primeira leitura feita no dia seguinte ao início da execução do corte, onde o mesmo se encontrava com uma profundidade média de 1,50m no momento da leitura. A segunda leitura foi executada 03 dias após a primeira para uma profundidade média de 2,50m e a terceira e última leitura ao término do corte, com um intervalo de 06 dias em relação a primeira leitura e uma profundidade média final de 5,00m para a Pedreira Olho de Pombo. No caso da Pedreira de Pedra Madeira, as profundidades são respectivamente 1,00m; 2,20m e 5,10m de média final de corte.

Tabela 25: Leitura dos deslocamentos e resultados das deformações dos maciços rochosos estudados.

| LEITURA DAS DEFORMAÇÕES EM CAMPO |            |                   |      |      |                                 |      |      |                                       |       |       |
|----------------------------------|------------|-------------------|------|------|---------------------------------|------|------|---------------------------------------|-------|-------|
| PEDREIRA OLHO DE POMBO           |            |                   |      |      |                                 |      |      |                                       |       |       |
| Direção                          | Orientação | Leitura ( $\mu$ ) |      |      | Profundidade Média do Corte (m) |      |      | Deformação ( $L_{final}-L_0$ )/ $L_0$ |       |       |
|                                  |            | 1°                | 2°   | 3°   | 1°                              | 2°   | 3°   | 1°                                    | 2°    | 3°    |
| P1-P2                            | 053°       | 909               | 991  | 1022 | 1,50                            | 2,50 | 5,00 | 0,122                                 | 0,223 | 0,262 |
| P1-P3                            | 140°       | 819               | 820  | 820  | 1,50                            | 2,50 | 5,00 | 0,011                                 | 0,012 | 0,012 |
| P1-P4                            | 008°       | 1215              | 1258 | 1285 | 1,50                            | 2,50 | 5,00 | 0,061                                 | 0,099 | 0,122 |
| P2-P3                            | 097°       | 1221              | 1262 | 1300 | 1,50                            | 2,50 | 5,00 | 0,066                                 | 0,102 | 0,135 |
| P2-P4                            | 140°       | 815               | 815  | 819  | 1,50                            | 2,50 | 5,00 | 0,006                                 | 0,006 | 0,011 |
| P3-P4                            | 053°       | 901               | 950  | 965  | 1,50                            | 2,50 | 5,00 | 0,112                                 | 0,173 | 0,191 |
| LEITURA DAS DEFORMAÇÕES EM CAMPO |            |                   |      |      |                                 |      |      |                                       |       |       |
| PEDREIRA PEDRA MADEIRA           |            |                   |      |      |                                 |      |      |                                       |       |       |
| Direção                          | Orientação | Leitura ( $\mu$ ) |      |      | Profundidade Média do Corte (m) |      |      | Deformação ( $L_{final}-L_0$ )/ $L_0$ |       |       |
|                                  |            | 1°                | 2°   | 3°   | 1°                              | 2°   | 3°   | 1°                                    | 2°    | 3°    |
| P1-P2                            | 070°       | 908               | 922  | 932  | 1,00                            | 2,20 | 5,10 | 0,121                                 | 0,138 | 0,151 |
| P1-P3                            | 340°       | 815               | 819  | 820  | 1,00                            | 2,20 | 5,10 | 0,006                                 | 0,011 | 0,012 |
| P1-P4                            | 023°       | 1210              | 1224 | 1241 | 1,00                            | 2,20 | 5,10 | 0,057                                 | 0,069 | 0,084 |
| P2-P3                            | 295°       | 1214              | 1228 | 1235 | 1,00                            | 2,20 | 5,10 | 0,060                                 | 0,072 | 0,079 |
| P2-P4                            | 340°       | 818               | 826  | 827  | 1,00                            | 2,20 | 5,10 | 0,010                                 | 0,020 | 0,021 |
| P3-P4                            | 070°       | 925               | 933  | 966  | 1,00                            | 2,20 | 5,10 | 0,142                                 | 0,152 | 0,193 |

O extensômetro utilizado na medição das deformações possui um gabarito ao qual era feita a calibração antes de qualquer tomada de dados. Esse mesmo gabarito foi utilizado na colagem dos pinos de referência para garantir uma medida padrão. Na última coluna da tabela 25 são mostrados dados referentes a deformação total de cada segmento respectivo, sendo o resultado plotado a leitura do segmento ( $L_{\text{final}}$ ) subtraída da Leitura do gabarito ( $L_{\text{inicial}} = L_0 = \text{cte}$ ), já que os pinos foram colados respeitando-se o gabarito original.

$$\varepsilon = (L_{\text{final}} - L_0)/L_0 \quad (22)$$



Figura 27- Corte executado com *Flame Jet* na Pedreira Olho de Pombo.

#### 4.2.3- Determinação das Deformações Principais:

As componentes de deformação  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$  podem ser determinadas em um ponto da superfície livre de um material pela simples medição das deformações normais ao longo dos eixos x e y desenhados nesse ponto em questão. Pode-se também, tomando-se partido de uma terceira medição ( $\varepsilon_{45}$ ), nesse caso na direção da bissetriz do ângulo formado pelos eixos x e y ( $45^\circ$ ), determinar a deformação de cisalhamento  $\gamma_{xy}$  pela equação 23.

$$\gamma_{xy} = 2 \cdot \varepsilon_{45} - (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (23)$$

Esse arranjo das direções de deformações usado para a obtenção das medidas descritas anteriormente é conhecido pelo nome de roseta a 45°. Outro tipo também muito utilizado é a roseta a 60°, onde como o próprio nome diz, as três direções de medidas de deformações diferem entre si por um ângulo de 60°.

De acordo a figura 28, observa-se que a roseta escolhida foi a de 45° devido a maior simplicidade e rapidez na sua montagem no campo e também facilidade na obtenção das deformações principais.

Utilizando-se o círculo de Mohr para deformações pode-se obter as relações que determinam a magnitude ( $\varepsilon_{\max}=\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_{\min}=\varepsilon_3$ ) e o ângulo de rotação ou direção ( $\theta_p$ ) das deformações principais no plano considerado.

Do círculo de Mohr para deformações retiram-se as seguintes relações:

$$\varepsilon_{\text{med}} = (\varepsilon_x + \varepsilon_y)/2 \quad (24)$$

$$R^2 = [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)/2]^2 + (\gamma_{xy}/2)^2 \quad (25)$$

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_{\text{med}} + R \quad (26)$$

$$\varepsilon_{\min} = \varepsilon_{\text{med}} - R \quad (27)$$

$$\text{tg } 2\theta_p = \gamma_{xy}/(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \quad (28)$$

Onde:

- $\varepsilon_{\text{med}}$  = deformação média
- R = Raio do círculo de Mohr
- $\varepsilon_{\max}$  = deformação principal maior ( $\varepsilon_1$ )
- $\varepsilon_{\min}$  = deformação principal menor ( $\varepsilon_3$ )
- $\theta_p$  = ângulo de rotação da direção principal (relativo ao eixo x).

Utilizando-se os dados das deformações tomadas em campo (tabela 25) e de acordo com as relações mostradas anteriormente, pode-se, tomando como referência os eixos coordenados conforme a figura 28, determinar as deformações principais para a Pedreira Olho de Pombo no momento da primeira leitura de deformações, como mostrado a seguir.

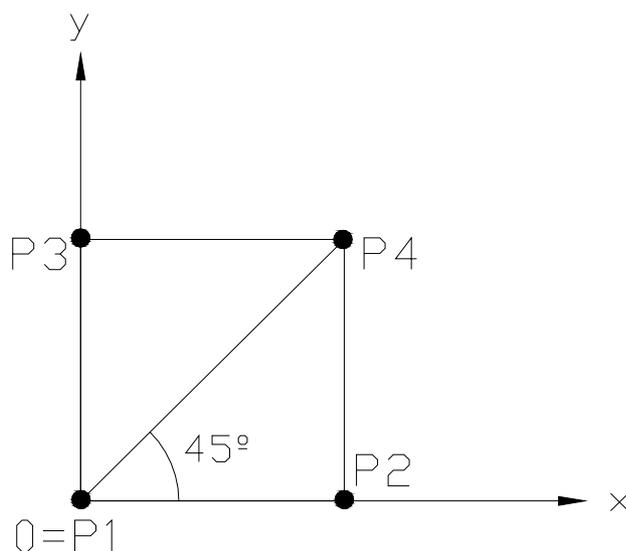


Figura 28- Posição dos eixos coordenados (x,y) em relação as deformações tomadas em campo.

$$\varepsilon_x = \varepsilon_{P1-P2} = 0,122$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{P1-P3} = 0,011$$

$$\varepsilon_{45} = \varepsilon_{P1-P4} = 0,061$$

$$\gamma_{xy} = 2 \cdot \varepsilon_{45} - (\varepsilon_x + \varepsilon_y) = -0,011$$

$$\varepsilon_{med} = (\varepsilon_x + \varepsilon_y)/2 = 0,067$$

$$R^2 = [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)/2]^2 + (\gamma_{xy}/2)^2 = 0,0031$$

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon_1 = \varepsilon_{med} + R = 0,0701 \quad (\text{deformação principal maior})$$

$$\varepsilon_{min} = \varepsilon_3 = \varepsilon_{med} - R = 0,064 \quad (\text{deformação principal menor})$$

$$\text{tg } 2\theta_p = \gamma_{xy}/(\varepsilon_x - \varepsilon_y) = 0,099$$

Logo:  $\theta_p = -2,83^\circ$  (sentido horário)

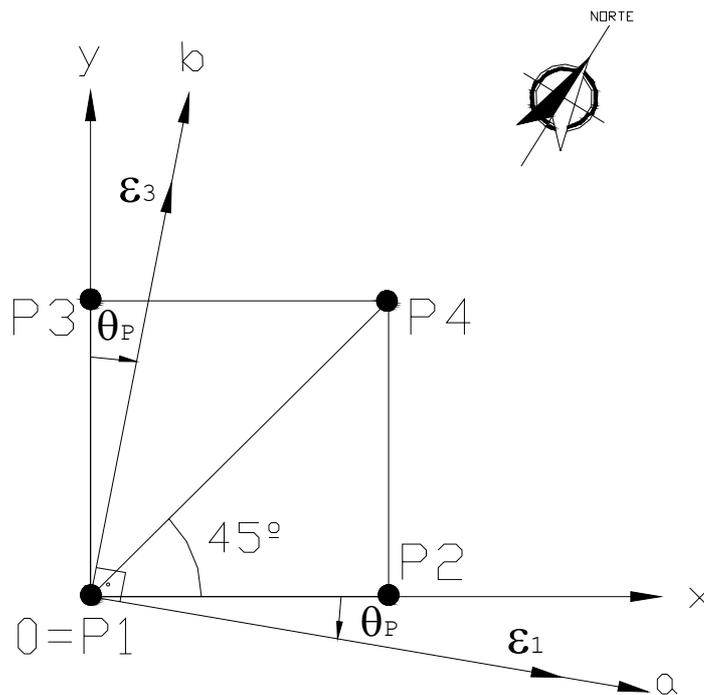


Figura 29- Eixos principais de deformação (a e b) e respectivas deformações principais ( $\epsilon_1$  e  $\epsilon_3$ ).

Os eixos principais de deformação, como mostra a figura 29 são defasados de  $90^\circ$ , ou seja, são ortogonais entre si e os correspondentes valores das deformações máxima e mínima são as denominadas deformações principais maior e menor respectivamente.

A seguir apresenta-se a tabela 26, que contém os valores da magnitude e direção das deformações principais para as demais leituras de campo contidas na tabela 25. Os cálculos foram efetuados de forma similar ao mostrado anteriormente nesse capítulo para a primeira leitura de deformações da pedra Olho de Pombo, sendo desnecessário a apresentação detalhada, como a anterior, para todas as leituras. Vale ressaltar que os eixos coordenados variam de posição para cada caso, de acordo com a figura 30. A fim de simplificar os cálculos, os eixos x e y foram locados nos vértices do quadrado formado pelos pinos de referência, de forma que dois lados do quadrado sempre se situem sobre os eixos coordenados.

A direção final das deformações principais, aqui denominadas de orientação principal, é dada em relação ao norte magnético da terra já que as orientações dos quatro lados do quadrado formado pelos pinos de referência foram previamente estabelecidas no campo com a

bússola de Brunton e conseqüentemente com a referência ao norte magnético. Dessa forma a direção média final das deformações principais podem ser visualizadas ou locadas em campo de forma mais simples e rápida. Para o exemplo anterior, temos que a orientação de  $\varepsilon_1$  é de  $056^\circ$  e  $\varepsilon_3$  é de  $146^\circ$ .

Observa-se na primeira coluna (leitura), da tabela 26, uma separação dos dados em conformidade com o descrito para a tabela 25, onde cada leitura corresponde a uma profundidade do corte realizado com o maçarico no maciço. A coluna “vértice” aponta em que ponto encontra-se a origem dos eixos coordenados, que é melhor mostrado na figura seguinte. Os itens  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$  são, respectivamente as deformações medidas nos eixos x e y e são adimensionais. A coluna correspondente a deformação  $\varepsilon_{45}$  informa as deformações na direção da bissetriz do arranjo dos pinos de referência, como informado anteriormente.

Tabela 26: Determinação das magnitudes e direções das deformações principais dos maciços rochosos das Pedreiras Olho de Pombo e Pedra Madeira.

| DEFORMAÇÕES PRINCIPAIS - PEDREIRA OLHO DE POMBO |                  |                 |                 |                    |               |                 |                 |            |                      |                 |
|-------------------------------------------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------------|---------------|-----------------|-----------------|------------|----------------------|-----------------|
| Leitura                                         | Vértice (origem) | $\varepsilon_x$ | $\varepsilon_y$ | $\varepsilon_{45}$ | $\gamma_{xy}$ | $\varepsilon_1$ | $\varepsilon_3$ | $\theta_p$ | Orientação Principal |                 |
|                                                 |                  |                 |                 |                    |               |                 |                 |            | $\varepsilon_x$      | $\varepsilon_y$ |
| 1°                                              | P1               | 0,122           | 0,011           | 0,061              | -0,011        | 0,122           | 0,011           | -2,83°     | 56                   | 146             |
|                                                 | P2               | 0,122           | 0,006           | 0,066              | 0,004         | 0,122           | 0,006           | 0,99°      | 52                   | 142             |
|                                                 | P3               | 0,112           | 0,011           | 0,066              | 0,009         | 0,112           | 0,011           | 2,55°      | 50                   | 140             |
|                                                 | P4               | 0,112           | 0,006           | 0,061              | 0,004         | 0,112           | 0,006           | 1,08°      | 52                   | 142             |
| 2°                                              | P1               | 0,223           | 0,012           | 0,099              | -0,037        | 0,225           | 0,010           | -4,97°     | 58                   | 148             |
|                                                 | P2               | 0,223           | 0,006           | 0,102              | -0,025        | 0,224           | 0,005           | -3,29°     | 56                   | 146             |
|                                                 | P3               | 0,173           | 0,012           | 0,102              | 0,019         | 0,174           | 0,011           | 3,37°      | 50                   | 140             |
|                                                 | P4               | 0,173           | 0,006           | 0,099              | 0,019         | 0,174           | 0,005           | 3,25°      | 50                   | 140             |
| 3°                                              | P1               | 0,262           | 0,012           | 0,122              | -0,03         | 0,263           | 0,011           | -3,42°     | 56                   | 146             |
|                                                 | P2               | 0,262           | 0,011           | 0,135              | -0,003        | 0,262           | 0,011           | -0,35°     | 53                   | 143             |
|                                                 | P3               | 0,191           | 0,012           | 0,135              | 0,067         | 0,197           | 0,006           | 10,26°     | 63                   | 153             |
|                                                 | P4               | 0,191           | 0,011           | 0,122              | 0,042         | 0,193           | 0,009           | 6,57°      | 46                   | 136             |
| DEFORMAÇÕES PRINCIPAIS - PEDREIRA PEDRA MADEIRA |                  |                 |                 |                    |               |                 |                 |            |                      |                 |
| 1°                                              | P1               | 0,121           | 0,006           | 0,057              | -0,013        | 0,121           | 0,006           | -3,23°     | 73                   | 163             |
|                                                 | P2               | 0,121           | 0,010           | 0,060              | -0,011        | 0,121           | 0,010           | -2,83°     | 73                   | 163             |
|                                                 | P3               | 0,142           | 0,006           | 0,060              | -0,028        | 0,143           | 0,005           | -5,82°     | 76                   | 166             |
|                                                 | P4               | 0,142           | 0,010           | 0,057              | -0,038        | 0,145           | 0,007           | -8,03°     | 78                   | 168             |
| 2°                                              | P1               | 0,138           | 0,011           | 0,069              | -0,011        | 0,138           | 0,011           | -2,48°     | 72                   | 162             |
|                                                 | P2               | 0,138           | 0,020           | 0,072              | -0,014        | 0,138           | 0,020           | -3,38°     | 73                   | 163             |
|                                                 | P3               | 0,152           | 0,011           | 0,072              | -0,019        | 0,153           | 0,010           | -3,84°     | 74                   | 164             |
|                                                 | P4               | 0,152           | 0,020           | 0,069              | -0,034        | 0,154           | 0,018           | -7,22°     | 77                   | 167             |
| 3°                                              | P1               | 0,151           | 0,012           | 0,084              | 0,005         | 0,151           | 0,012           | 1,03°      | 69                   | 159             |
|                                                 | P2               | 0,151           | 0,021           | 0,079              | -0,014        | 0,151           | 0,021           | -3,08°     | 73                   | 163             |
|                                                 | P3               | 0,193           | 0,012           | 0,079              | -0,047        | 0,196           | 0,009           | -7,28°     | 77                   | 167             |
|                                                 | P4               | 0,193           | 0,021           | 0,084              | -0,046        | 0,196           | 0,018           | -7,49°     | 77                   | 167             |

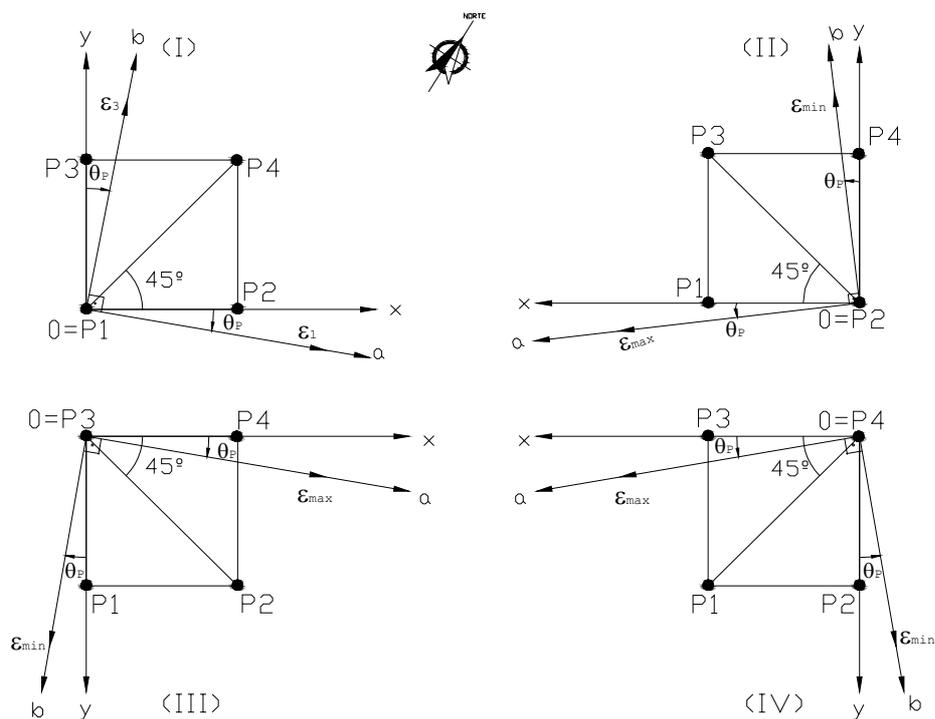


Figura 30- Posição dos eixos coordenados (x,y) em relação aos vértices do quadrado (P1, P2, P3 e P4) e eixos principais de deformação (a e b) com respectivas deformações principais ( $\epsilon_1 = \epsilon_{\max}$  e  $\epsilon_3 = \epsilon_{\min}$ ).

Calculando-se um valor médio para as deformações e direções principais dos maciços, pode-se observar (tabela 27) que as deformações principais variam gradativamente sua magnitude conforme cresce a profundidade do corte realizado no maciço rochoso, denotando um crescente alívio das tensões confinantes pertencentes ao mesmo. Contudo, como já era esperado, as direções principais das deformações apontam para valores próximos, independente da profundidade do corte, variando de aproximadamente  $8^\circ$  em relação a orientação do talude. Contudo, em uma mesma direção denominada direção principal.

Tabela 27: Deformações principais médias (Maior =  $\varepsilon_1$ , Menor =  $\varepsilon_3$ ) e direções principais referente ao norte magnético da Terra para os maciços rochosos em estudo.

| Deformações Principais Médias - Pedreira Olho de Pombo |                                   |                                   |                            |                 |                      |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------|
| Leituras                                               | $\varepsilon_1$ (médio) ( $\mu$ ) | $\varepsilon_3$ (médio) ( $\mu$ ) | Orientação Principal média |                 | Orientação do Talude |
|                                                        |                                   |                                   | $\varepsilon_1$            | $\varepsilon_3$ |                      |
| 1°                                                     | 0,117                             | 0,008                             | 053°                       | 143°            | 053°/66°             |
| 2°                                                     | 0,199                             | 0,008                             | 053°                       | 143°            |                      |
| 3°                                                     | 0,229                             | 0,009                             | 050°                       | 140°            |                      |
| Deformações Principais Médias - Pedreira Pedra Madeira |                                   |                                   |                            |                 |                      |
| Leituras                                               | $\varepsilon_1$ (médio) ( $\mu$ ) | $\varepsilon_3$ (médio) ( $\mu$ ) | Orientação Principal média |                 | Orientação do Talude |
|                                                        |                                   |                                   | $\varepsilon_1$            | $\varepsilon_3$ |                      |
| 1°                                                     | 0,133                             | 0,007                             | 075°                       | 165°            | 070°/60°             |
| 2°                                                     | 0,146                             | 0,015                             | 074°                       | 164°            |                      |
| 3°                                                     | 0,174                             | 0,015                             | 074°                       | 164°            |                      |

O comportamento ou variação das deformações principais dos maciços rochosos em estudo é observado nas figuras 31, 32, 33 e 34.

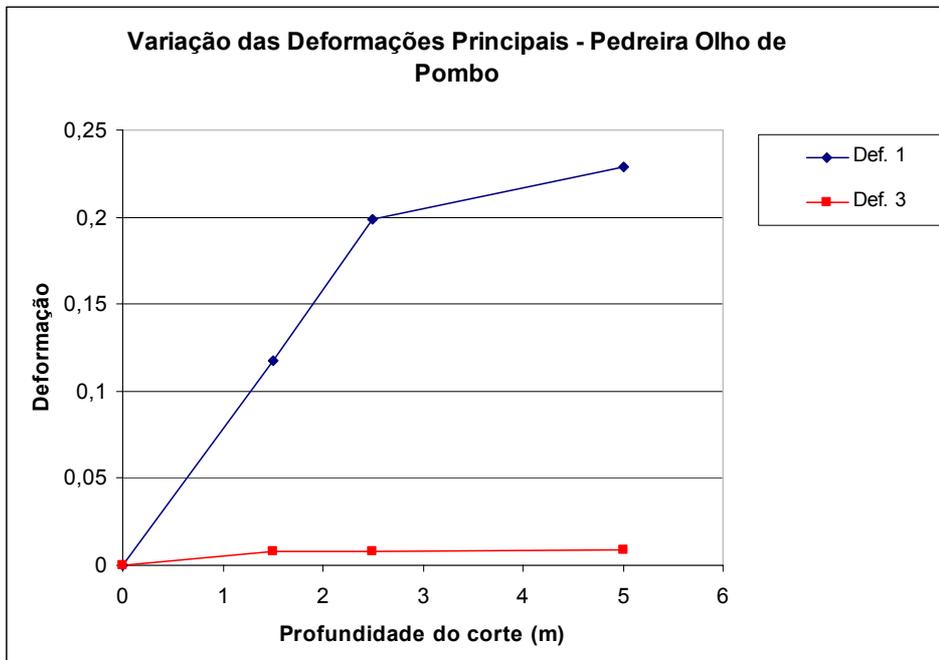


Figura 31- Variação das deformações principais com a profundidade de corte na Pedreira Olho de Pombo.

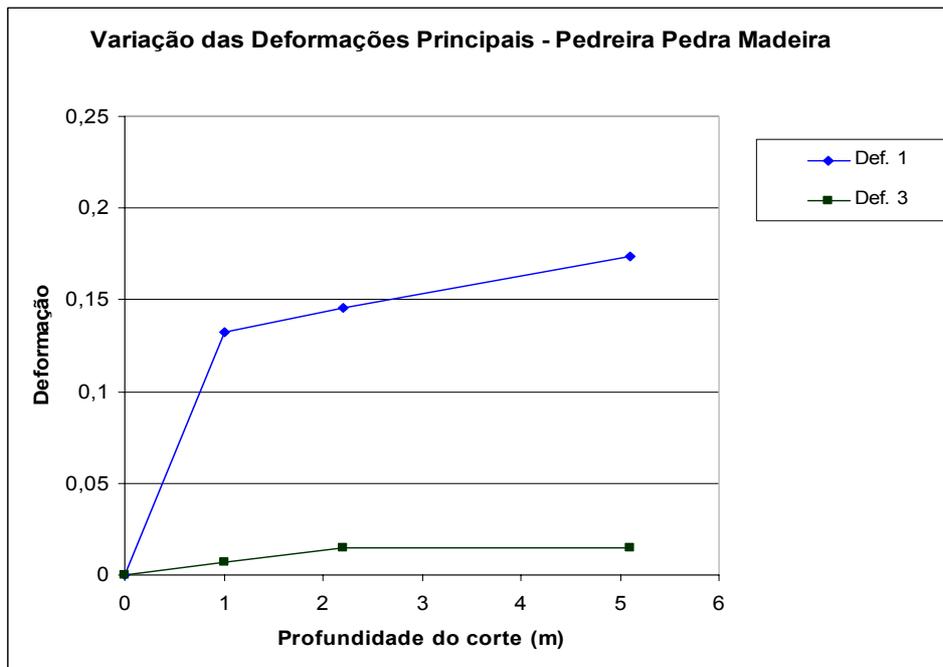


Figura 32- Variação das deformações principais com a profundidade de corte na Pedreira Pedra Madeira.

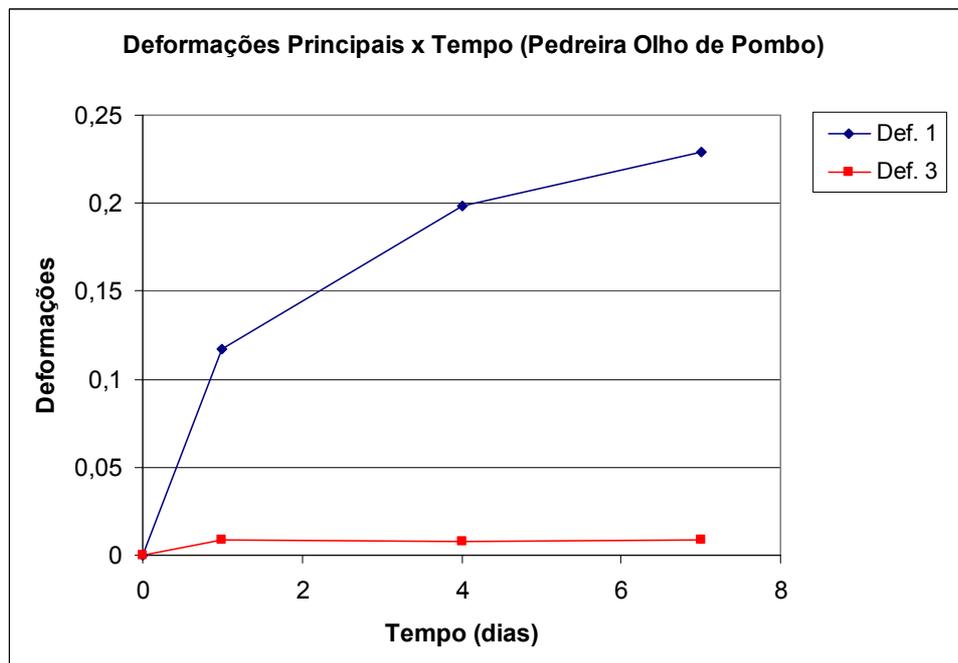


Figura 33- Variação das deformações principais com relação ao tempo na Pedreira Olho de Pombo.

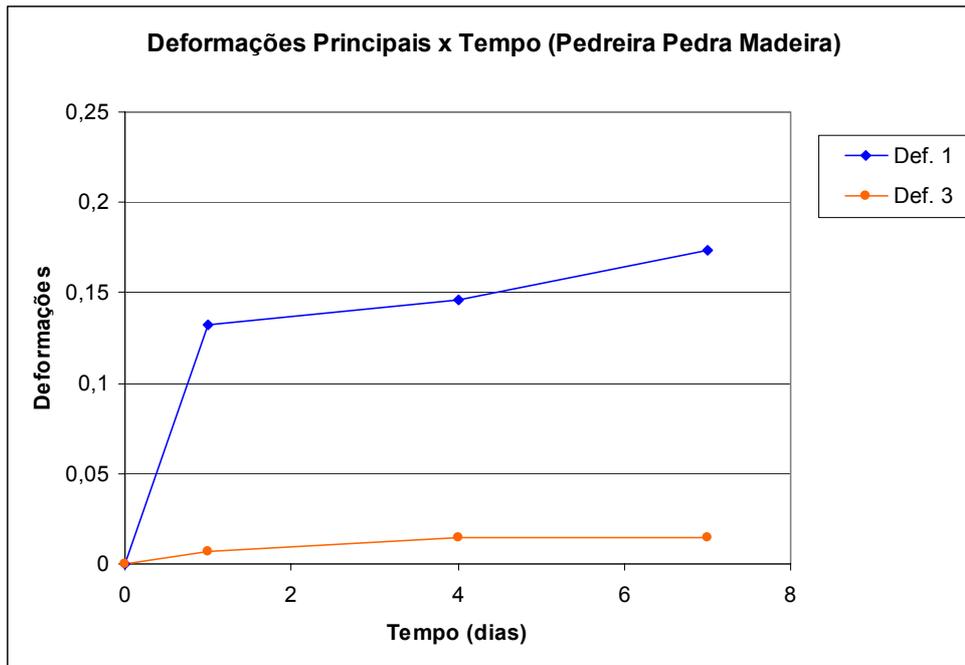


Figura 34- Variação das deformações principais com o tempo na Pedreira Pedra Madeira, com suas respectivas aproximações lineares.

Nas figuras 33 e 34 são plotados os dados de *Deformações Principais vs. Tempo*, para os dois maciços estudados. Vale ressaltar que em ambos os casos a profundidade do corte feito pelo maçarico aumenta com o passar do tempo, o que também influencia o comportamento das deformações (ver figuras 31 e 32). Não se realizaram medidas de deslocamentos quando a operação de corte dos maciços foi paralisada (profundidade de corte constante), pois logo que isso aconteceu, os mesmos sofreram detonações que impediram qualquer tentativa de realizar tais medidas devido a imensa perturbação causada na área com a ação de explosivos, influenciando quaisquer dados coletados e conseqüentemente invalidando-os.

A empresa exploradora do local informou que não poderia adiar a seqüência de lavra por alguns dias devido a prazos de entrega de material e perda financeira com mão de obra ociosa.

Contudo, foram ainda realizadas medidas de deslocamentos relativos dos cortes nos maciços, nas direções mostradas de acordo com o croqui da figura 35.

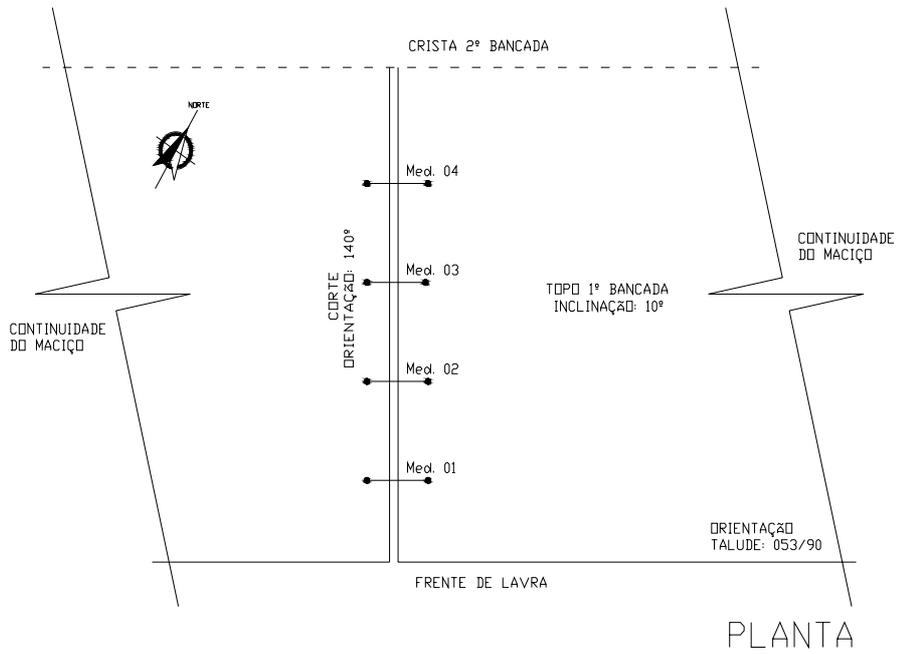


Figura 35- Desenho em planta do posicionamento dos pinos de referência em relação ao corte executado no maciço da Pedreira Olho de Pombo.

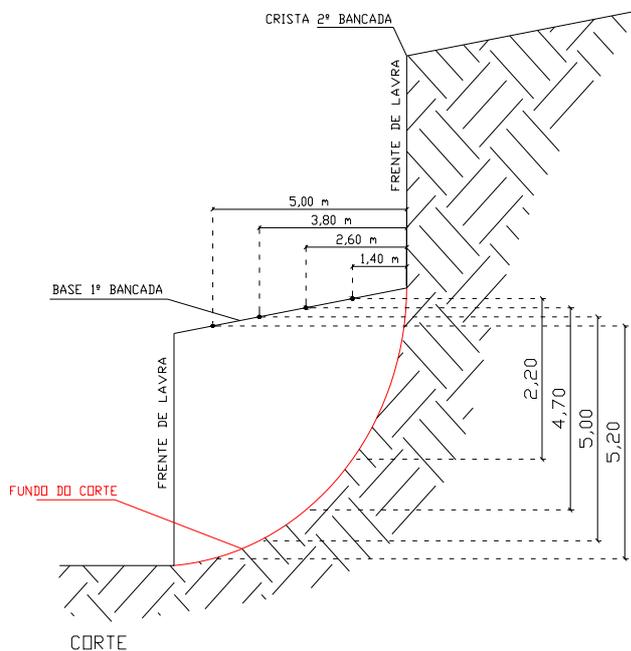


Figura 36- Desenho, visto em corte, da profundidade e posicionamento do corte realizado com maciço da Pedreira Olho de Pombo.

Os deslocamentos foram mensurados através de pinos de referência colados ao maciço em um processo similar ao descrito anteriormente, e posicionados transversalmente ao corte feito pelo maçarico no talude (Medida 01, Medida 02, Medida 03 e Medida 04), com o objetivo de verificar a deformação nessa direção.

Na tabela 28 são apresentados as medidas dos deslocamentos relativos e o cálculo das respectivas deformações relativas para os maciços em estudo. Observar que as leituras foram tomadas em dias diferentes a medida que o corte era feito na bancada. Isso também implicou em uma profundidade média de corte diferente para cada leitura, sendo os deslocamentos medidos, a resposta dos maciços ao desconfinamento das tensões do mesmo em função da execução do corte pelo maçarico.

Tabela 28: Deslocamentos relativos transversais ao corte sofrido nos maciços estudados.

| <b>Deslocamentos do Corte - Pedreira Olho de Pombo</b> |              |                   |                        |                                    |
|--------------------------------------------------------|--------------|-------------------|------------------------|------------------------------------|
| Ponto                                                  | Tempo (dias) | Leitura ( $\mu$ ) | Profundidade média (m) | $D = L_{\text{final}} - L_0$ (m)   |
| Desl. 01                                               | 1            | 720               | 1,50                   | -0,000090                          |
|                                                        | 4            | 417               | 2,50                   | -0,000393                          |
|                                                        | 7            | 334               | 5,00                   | -0,000476                          |
| Desl. 02                                               | 1            | 732               | 1,50                   | -0,000078                          |
|                                                        | 4            | 595               | 2,50                   | -0,000215                          |
|                                                        | 7            | 377               | 5,00                   | -0,000433                          |
| Desl. 03                                               | 1            | 755               | 1,50                   | -0,000055                          |
|                                                        | 4            | 629               | 2,50                   | -0,000181                          |
|                                                        | 7            | 454               | 5,00                   | -0,000356                          |
| Desl. 04                                               | 1            | 801               | 1,50                   | -0,000009                          |
|                                                        | 4            | 727               | 2,50                   | -0,000083                          |
|                                                        | 7            | 638               | 5,00                   | -0,000172                          |
| <b>Deslocamentos do Corte - Pedreira Pedra Madeira</b> |              |                   |                        |                                    |
| Ponto                                                  | Tempo (dias) | Leitura ( $\mu$ ) | Profundidade média (m) | $D = (L_{\text{final}} - L_0)$ (m) |
| Desl. 01                                               | 1            | 738               | 1,00                   | -0,000072                          |
|                                                        | 4            | 451               | 2,20                   | -0,000359                          |
|                                                        | 7            | 364               | 5,10                   | -0,000446                          |
| Desl. 02                                               | 1            | 774               | 1,00                   | -0,000036                          |
|                                                        | 4            | 522               | 2,20                   | -0,000288                          |
|                                                        | 7            | 371               | 5,10                   | -0,000439                          |
| Desl. 03                                               | 1            | 800               | 1,00                   | -0,000010                          |
|                                                        | 4            | 607               | 2,20                   | -0,000203                          |
|                                                        | 7            | 599               | 5,10                   | -0,000211                          |
| Desl. 04                                               | 1            | 809               | 1,00                   | -0,000001                          |
|                                                        | 4            | 754               | 2,20                   | -0,000056                          |
|                                                        | 7            | 694               | 5,10                   | -0,000116                          |

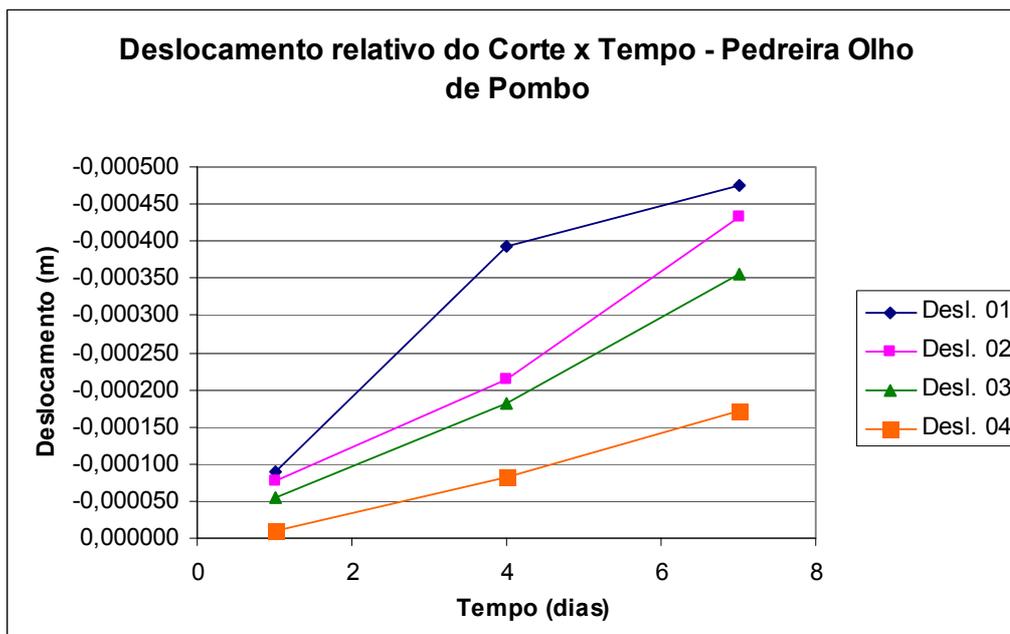


Figura 37- Variação dos deslocamentos relativos do corte com o tempo, dos 4 pontos de medição na Pedreira Olho de Pombo.

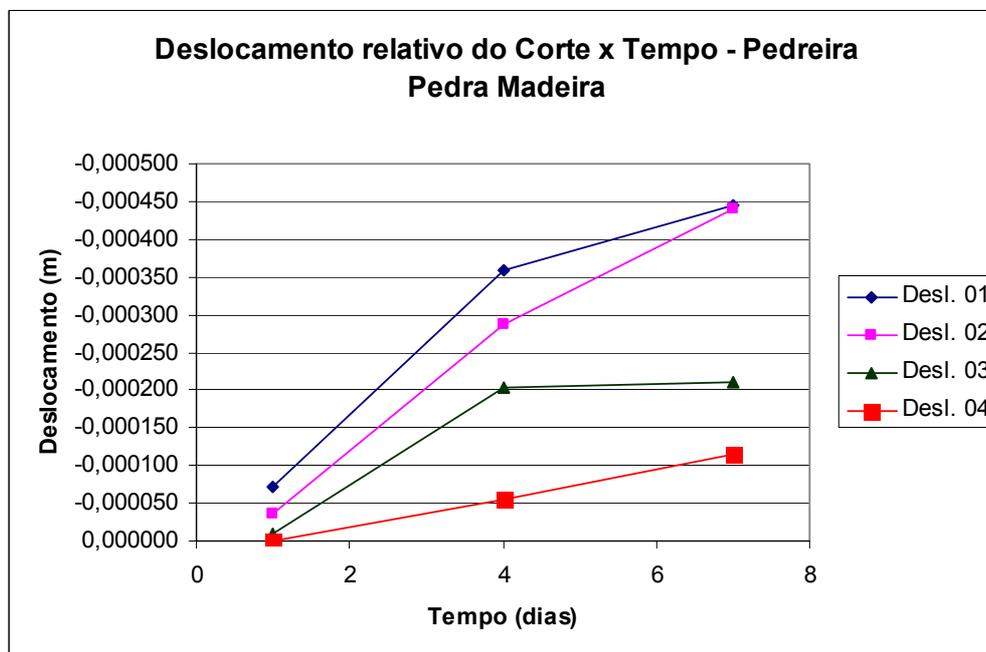


Figura 38- Variação dos deslocamentos relativos do corte com o tempo, dos 4 pontos de medição na Pedreira Pedra Madeira.

No próximo capítulo desse trabalho realizam-se ensaios de compressão uniaxial na determinação dos parâmetros  $E$  e  $\nu$  de cada material em estudo, com a finalidade de se correlacioná-los com as respectivas deformações *in situ* determinadas até o momento, objetivando a obtenção, através da Lei de Hooke generalizada, das tensões *in situ* nos referidos maciços rochosos.

## CAPÍTULO 5: ENSAIOS DE LABORATÓRIO E DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES *IN SITU*

### 5.1- Introdução:

Todo material que responde na forma de deformações à aplicação de tensões e tem ainda, a propriedade da reversibilidade dessas deformações ao se remover a carga nela aplicada recebe a denominação de material elástico. Um corpo elástico que apresenta linearidade na relação tensão deformação recebe a denominação de linear elástico. Caso não se observe essa linearidade, o corpo é denominado elástico não linear.

Materiais que quando da aplicação e retirada de carregamento apresentam deformações residuais são chamados de materiais não elásticos. Essas componentes de deformações são denominadas de deformações plásticas.

A deformabilidade é caracterizada por um módulo que descreve a relação entre um carregamento e sua deformação resultante.

Na realidade um maciço rochoso não apresenta um comportamento elástico; sendo induzido o uso do termo Módulo de Deformabilidade no lugar do Módulo de elasticidade ou Young. Bieniawski (1978) relata que a ISRM apresenta as seguintes definições:

- Módulo de Deformabilidade: é a razão entre a tensão que corresponde a uma deformação durante um carregamento de um maciço rochoso, incluindo o comportamento elástico e não elástico.
- Módulo de Elasticidade ou *Young*: é a razão entre a tensão que corresponde a uma deformação durante um carregamento abaixo do limite de proporcionalidade do material.

Admitindo-se trabalhar com um material elástico linear, pode-se com um ensaio de compressão simples ou uniaxial, determinar o Módulo de Elasticidade (E) e o Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), que é a razão entre a deformação radial ( $\epsilon_r$ ) e a deformação axial ( $\epsilon_a$ ) do material.

$$E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon_a \quad (29)$$

$$\nu = \varepsilon_r/\varepsilon_a \quad (30)$$

Onde:

$$\varepsilon_a = \Delta L/L \quad (31)$$

$$\varepsilon_r = \Delta r/r \quad (32)$$

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de compressão uniaxial para corpos de prova de material retirados dos maciços rochosos em estudo, assim como seus respectivos Módulo de Deformação (E) e Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

### **5.2- Retirada e Preparação dos Corpos de Prova:**

De acordo com a norma da ASTM D3148-02, a qual foi utilizada como referência para a realização dos referidos ensaios, os CP's para ensaios de resistência a compressão simples devem possuir a forma cilíndrica com a finalidade de se distribuir melhor as tensões geradas na aplicação da carga de compressão no decorrer do ensaio.

Nesse caso optou-se por coletar e transportar pequenos blocos de rocha, que pudessem ser carregados em veículos comuns para o campus da Universidade com o objetivo de retirar os CP's cilíndricos desses blocos. Para tanto, blocos maiores foram monitorados nas pedreiras e depois repartidos no galpão da empresa exploradora do material, pois dessa forma sabe-se de que região (bancada ou setor) da pedreira esses blocos vieram.

Feito isso, os blocos foram concretados no solo com a finalidade de se obter uma melhor fixação dos mesmos para a utilização da perfuratriz rotativa com a qual os testemunhos foram retirados (figura 39).



Figura 39- Blocos retirados das pedreiras e concretados no solo para a posterior remoção dos corpos de prova com a perfuratriz rotativa.

Paralelamente a tudo isso, executou-se uma reforma na perfuratriz existente com a aquisição de motor elétrico, cálice e sapata de vídia ( $\phi_{\text{interno}}=3$  polegadas) para a coleta e corte do material respectivamente, assim como a manufatura e montagem de peças para a mesma na própria oficina do LECIV.

Após a retirada dos CP's dos blocos, os mesmos foram encaminhados ao Departamento de Apoio e Controle Técnico (DCT.T) de Furnas Centrais Elétricas S.A. em Aparecida de Goiânia/GO para usinagem com serviços de alinhamento da geratriz e retificação dos planos do topo e base.



Figura 40- Blocos “furados” após a retirada dos corpos de prova com a perfuratriz rotativa.



Figura 41- Corpos de Prova logo após a retirada com a perfuratriz rotativa (sem acabamento).

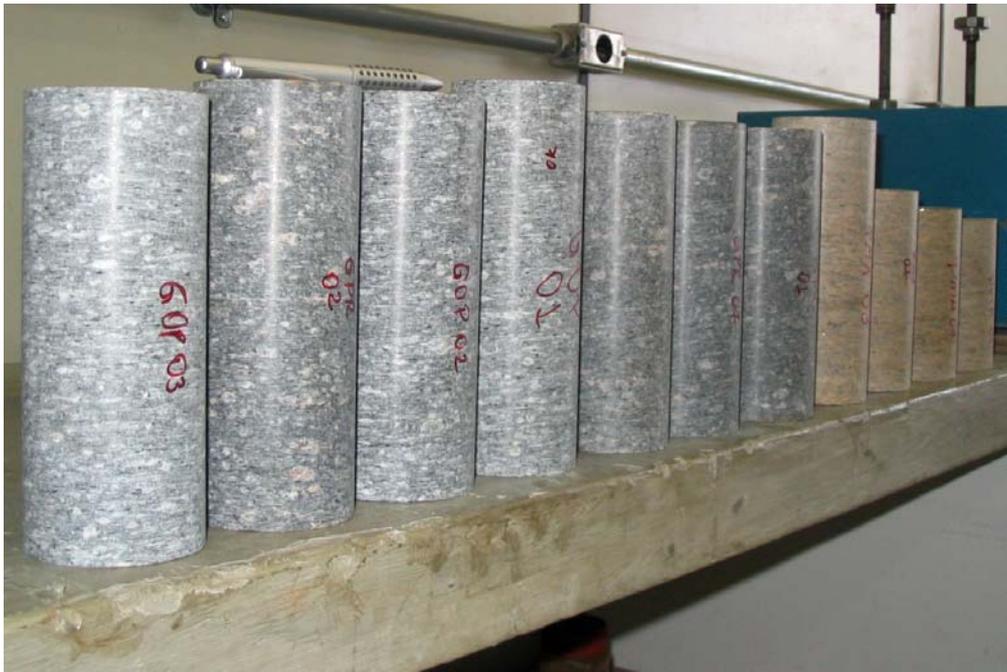


Figura 43- Corpos de Prova com as geratrizes, topos e bases regularizados (após usinagem).

### **5.3- Ensaio de Compressão Uniaxial:**

Os ensaios de Compressão simples foram realizados de acordo com a norma ASTM D3148-02, conforme dito anteriormente, pois essa norma prevê a determinação do Módulo de Elasticidade e Coeficiente de *Poisson* para corpos de prova de rocha intacta com a monitoração das deformações axiais e radiais. Os referidos ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

As deformações dos corpos de prova foram avaliadas através de sensores elétricos denominados de Strain Gauges, e os procedimentos para a sua preparação e colagem nos respectivos CP's seguiram a orientação da HBM (*Hottinger Baldwin Messtechnik – 2000*). Logicamente, os materiais utilizados na descrição da HBM são de difícil acesso e foram substituídos por similares mais facilmente encontrados no Brasil. Entretanto, tentou-se ao máximo manter a finalidade de cada material substituído bem próxima a da matéria prima original, sem perdas significativas para o resultados dos ensaios.

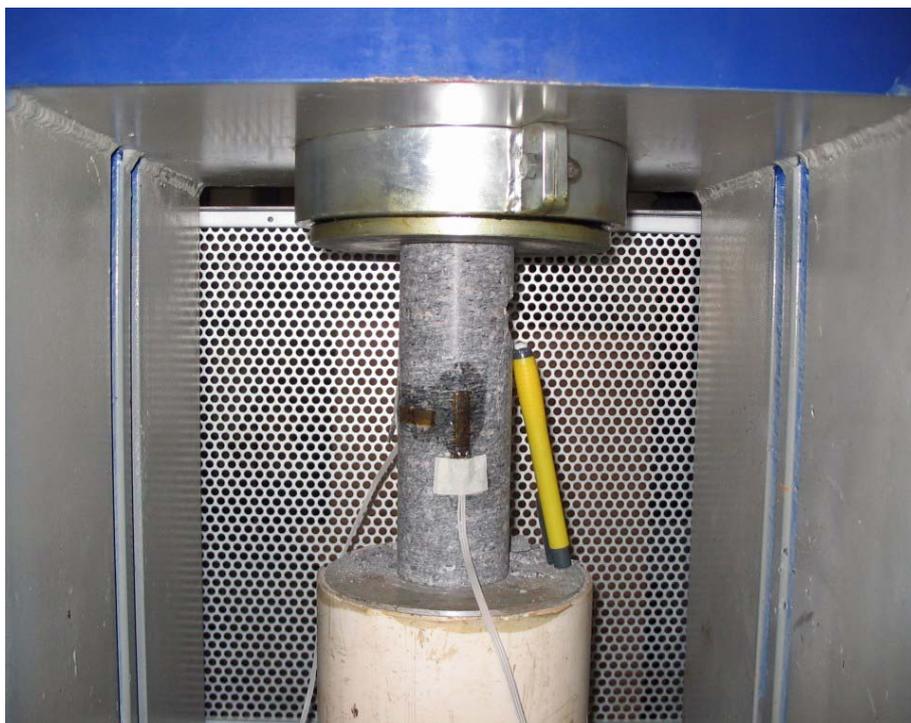


Figura 43- Corpo de Prova posicionado na presa. Notar a disposição dos sensores elétricos na direção longitudinal e radial a peça.



Figura 44- Corpos de Prova do Olho de Pombo rompidos após a realização do ensaio.

Vale ressaltar que as deformações radiais são determinadas indiretamente através de medições das deformações circunferenciais dos CP's.

Apresentam-se nas tabelas 29 e 30 e figuras 45 e 46 os resultados dos ensaios de compressão uniaxial com monitoramento das deformações axiais e radiais, bem como os

valores do Módulo de Deformabilidade e Coeficiente de Poisson para o Granito Olho de Pombo e Pedra Madeira dos maciços estudados.

Tabela 29- Resultados dos ensaios de compressão uniaxial com monitoramento das deformações e Módulo de Deformabilidade e Coeficiente de *Poisson* para o Granito Olho de Pombo.

| Resultados do Ensaio de Compressão Uniaxial - Granito Olho de Pombo |           |        |     |            |       |                      |                    |                    |                  |        |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|--------|-----|------------|-------|----------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------|
| CP                                                                  | Diam.(cm) | H (cm) | H/D | Temp. (°C) |       | $\sigma_{rup}$ (Mpa) | $\epsilon_a$ (rup) | $\epsilon_r$ (rup) | $E_{50\%}$ (GPa) | $\nu$  |
|                                                                     |           |        |     | Inicial    | Final |                      |                    |                    |                  |        |
| GOP 01                                                              | 7,22      | 18,00  | 2,5 | 27,10      | 27,10 | -162,09              | -0,00463           | 0,00265            | 39,60            | -0,144 |
| GOP 02                                                              | 7,04      | 17,60  | 2,5 | 26,80      | 26,80 | -133,80              | -0,00348           | 0,00053            | 49,40            | -0,103 |
| GOP 03                                                              | 6,55      | 16,60  | 2,5 | 25,40      | 25,30 | -122,96              | -0,00251           | 0,00031            | 58,00            | -0,105 |
| GOP 04                                                              | 6,71      | 17,50  | 2,6 | 25,10      | 25,00 | -137,73              | -0,00169           | 0,00058            | 72,00            | -0,241 |
| GOP 05                                                              | 6,03      | 18,00  | 3,0 | 25,00      | 24,80 | -115,19              | -0,00070           | 0,00009            | 153,00           | -0,168 |

Tabela 30- Resultados dos ensaios de compressão uniaxial com monitoramento das deformações e Módulo de Deformabilidade e Coeficiente de *Poisson* para a Pedra Madeira Rosa.

| Resultados do Ensaio de Compressão Uniaxial - Pedra Madeira Rosa |           |        |     |            |       |                      |                    |                    |                  |        |
|------------------------------------------------------------------|-----------|--------|-----|------------|-------|----------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------|
| CP                                                               | Diam.(cm) | H (cm) | H/D | Temp. (°C) |       | $\sigma_{rup}$ (Mpa) | $\epsilon_a$ (máx) | $\epsilon_r$ (máx) | $E_{50\%}$ (Mpa) | $\nu$  |
|                                                                  |           |        |     | Inicial    | Final |                      |                    |                    |                  |        |
| PMR 01                                                           | 6,82      | 13,50  | 2,0 | 24,80      | 24,70 | -134,93              | -0,00121           | 0,00017            | 106,60           | -0,099 |
| PMR 02                                                           | 7,32      | 9,60   | 1,3 | 24,70      | 24,70 | -163,26              | -0,00084           | 0,00019            | 211,20           | -0,107 |
| PMR 03                                                           | 7,24      | 10,00  | 1,4 | 24,70      | 24,60 | -180,54              | -0,00173           | 0,00028            | 116,60           | -0,112 |
| PMR 04                                                           | 7,14      | 10,00  | 1,4 | 24,60      | 24,70 | -135,05              |                    | 0,00015            |                  |        |
| PMR 05                                                           | 6,70      | 10,00  | 1,5 | 24,70      | 24,70 | -187,85              | -0,00138           | 0,00035            | 123,00           | -0,152 |

Onde:

- GOP = granito olho de pombo
- PMR = pedra madeira rosa
- Diam. = diâmetro do CP
- H = altura do CP
- H/D = relação altura/diâmetro do CP
- Temp. = temperatura no início e final do ensaio
- $\sigma_{rup}$  = tensão de ruptura
- $\epsilon_{a(Max)}$  = deformação axial máxima

- $\epsilon_{r(\text{Max})}$  = deformação radial máxima
- $E_{50\%}$  = Módulo de Deformabilidade a 50% da tensão de ruptura
- $\nu$  = Coeficiente de Poisson.

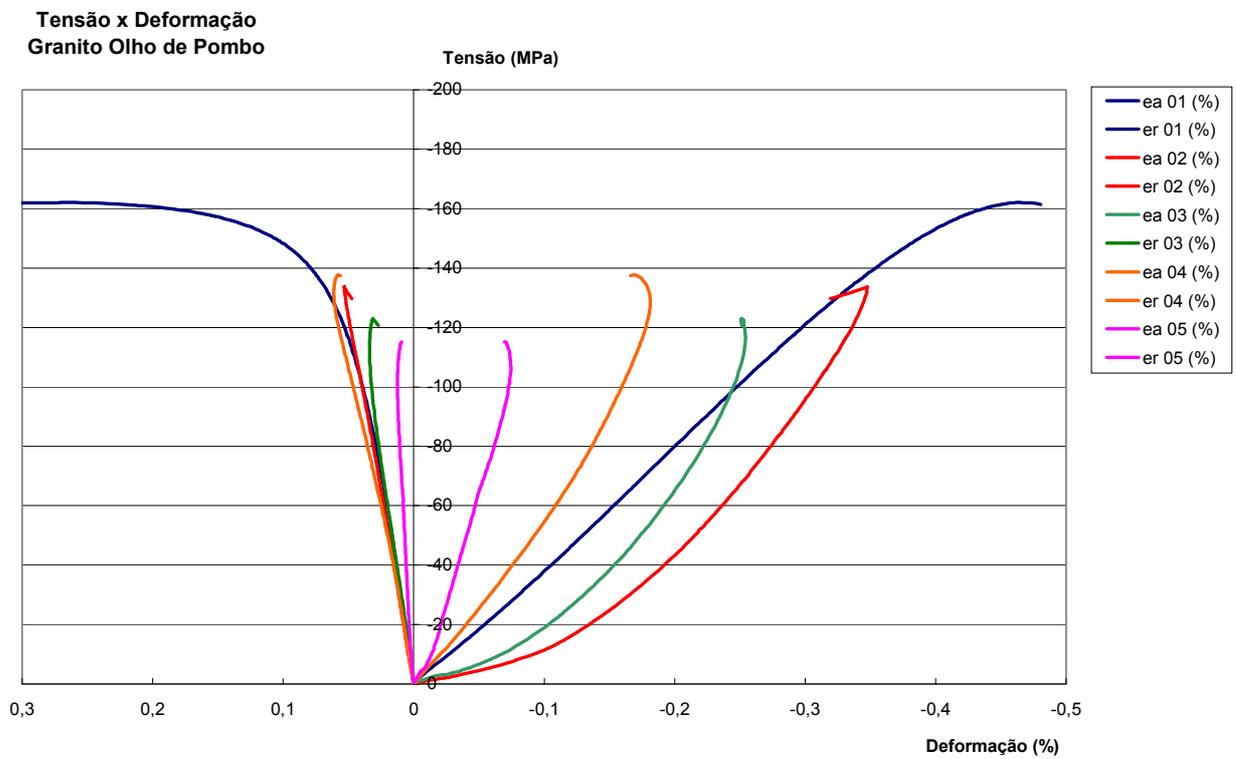


Figura 45- Gráfico Tensão x Deformação das 5 amostras de Granito Olho de Pombo.

### Tensão x Deformação - Pedra Madeira

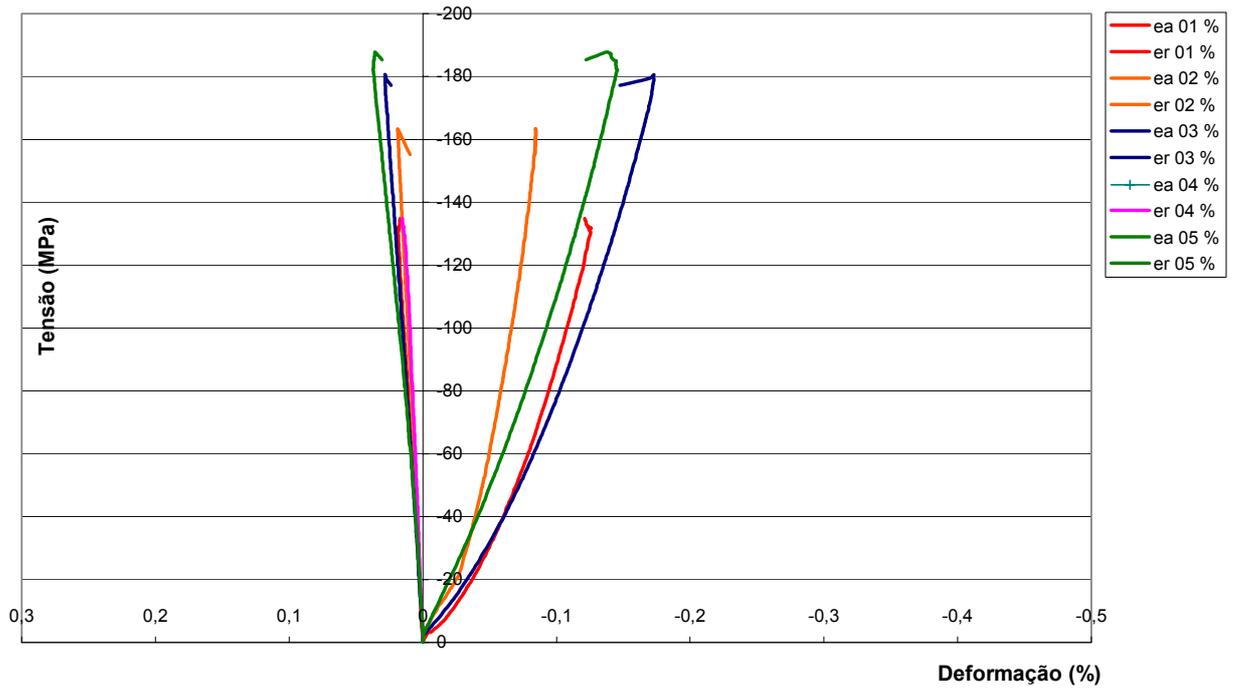


Figura 46- Gráfico Tensão x Deformação das 5 amostras de Pedra Madeira.

Observando-se a tabela 30 nota-se na linha correspondente ao CP - PMR 04 a falta de alguns resultados do ensaio ( $\epsilon_a$ , E e  $\nu$ ). Isso ocorreu devido ao fato de um dos sensores (*strain gauge*) conter um provável defeito de fabricação, impossibilitando a leitura correta das deformações axiais desse CP, uma vez que o mesmo estava posicionado nessa direção. Não se realizou outro ensaio para suprir essa deficiência por falta de corpos de prova reserva do material.

Tabela 31- Valores Médios para o Módulo de Deformabilidade e Coeficiente de *Poisson*.

| E (médio) e $\nu$ (médio) Granito Olho de Pombo |       |
|-------------------------------------------------|-------|
| E (GPa)                                         | $\nu$ |
| 74,40                                           | -0,15 |

| E (médio) e $\nu$ (médio) Pedra Madeira Rosa |       |
|----------------------------------------------|-------|
| E (GPa)                                      | $\nu$ |
| 139,35                                       | -0,12 |

#### 5.4- Determinação das Tensões Principais *in situ* dos Maciços Estudados:

A equação mais geral que define o comportamento de um material elástico linear é normalmente apresentada sob a forma da Lei de Hooke generalizada, onde cada componente de deformação é função linear dos componentes de tensão aplicados em um determinado ponto.

$$[\varepsilon] = [S][\sigma] \quad (33)$$

onde:  $[\varepsilon]$  = tensor de deformações

$[S]$  = matriz de rigidez

$[\sigma]$  = tensor de tensões

Entretanto em vários casos, inclusive nesse trabalho, é mais conveniente utilizar-se a forma inversa da equação 33.

$$[\sigma] = [D][\varepsilon] \quad (34)$$

onde:  $[\sigma]$  = tensor de deformações

$[D]$  = matriz elástica

$[\varepsilon]$  = tensor de tensões

Cada elemento da matriz elástica é formado pela relação entre o Módulo de Deformabilidade (E) do material e pelo Coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) do mesmo. A forma inversa generalizada da equação *tensão vs. deformação* é dada pela Equação 35.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu/(1-\nu) & \nu/(1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ \nu/(1-\nu) & 1 & \nu/(1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ \nu/(1-\nu) & \nu/(1-\nu) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (35)$$

De acordo com a hipótese do estado plano de tensões onde é garantida a não existência de tensões normais ao plano analisado e com os dados levantados nos capítulos 3 e 4 desse trabalho, os elementos formadores da equação 35 são os mostrados na tabela 32 a seguir.

Tabela 32- Valores utilizados na montagem da equação *tensão x deformação* para os maciços de Granito Olho de Pombo e Pedra Madeira.

| <b>Granito Olho de Pombo</b> |                   |                    |        |       |
|------------------------------|-------------------|--------------------|--------|-------|
| $\epsilon_1(\mu)$            | $\epsilon_3(\mu)$ | $\gamma_{13}(\mu)$ | E(GPa) | $\nu$ |
| 0,229                        | 0,009             | 0,019              | 74     | -0,15 |
| <b>Pedra Madeira Rosa</b>    |                   |                    |        |       |
| 0,174                        | 0,015             | -0,102             | 139    | -0,12 |

Aplicando-se os dados da tabela 32 na equação 35, obtém-se os resultados apresentados na

Tabela 33:

Tabela 33- Resumo dos valores das magnitudes e direções das tensões principais dos maciços de Granito Olho de Pombo e Pedra Madeira.

| <b>Maciço Olho de Pombo</b> |                 |            |
|-----------------------------|-----------------|------------|
|                             | magnitude (Mpa) | Orientação |
| $\sigma_1$                  | 17,54           | 052°       |
| $\sigma_3$                  | -1,6            | 142°       |
| talude                      |                 | 053°       |
| <b>Maciço Pedra Madeira</b> |                 |            |
| $\sigma_1$                  | 24,5            | 074°       |
| $\sigma_3$                  | -0,34           | 164°       |
| talude                      |                 | 070°       |

onde:  $\sigma_1$  = tensão principal maior

$\sigma_3$  = tensão principal menor

As figuras 47 e 48 representam a direção principal das tensões principais nos maciços de Olho de Pombo e Pedra Madeira, respectivamente.

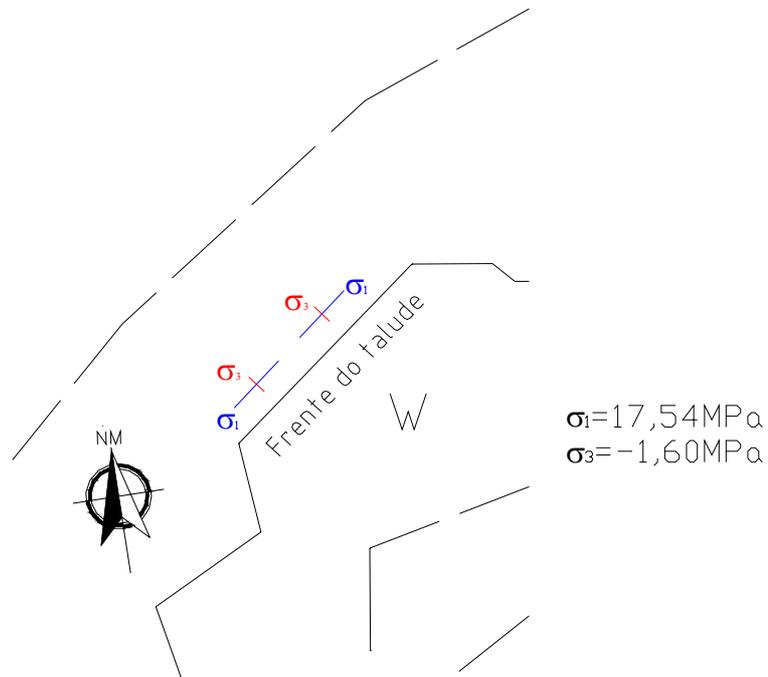


Figura 47- Representação por cruzetas da direção e magnitude das tensões principais na região estudada do maciço Olho de Pombo.

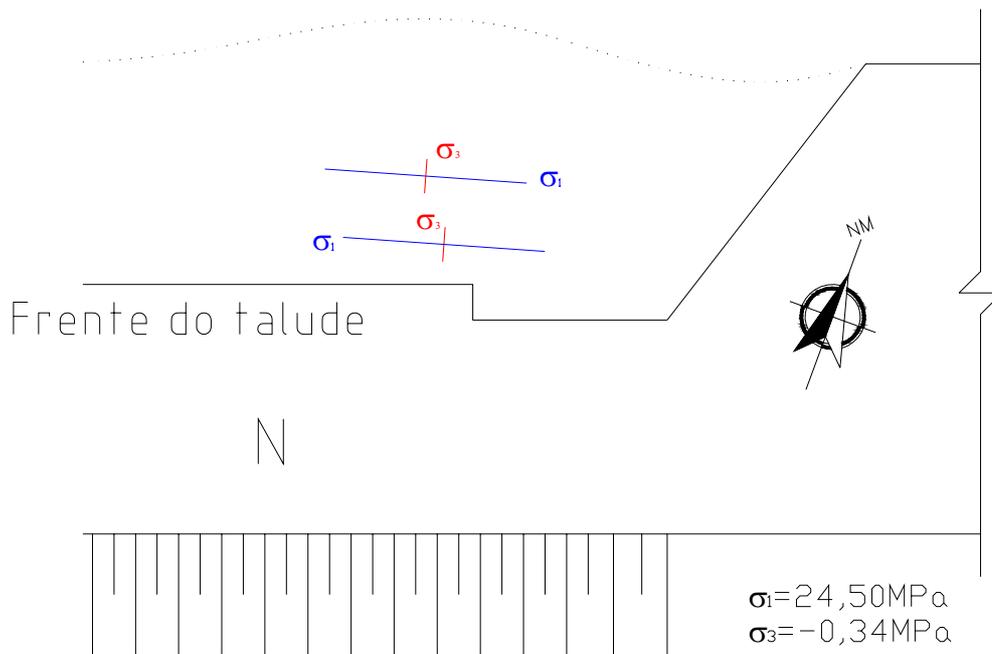


Figura 48- Representação por cruzetas da direção e magnitude das tensões principais na região estudada do maciço Pedra Madeira.

### 5.5- Ensaios de *Point Load* (tensão por carga pontual):

O ensaio denominado *Point Load Test* (ensaio de carga pontual) é usado para calcular o índice de tensão de carga pontual ( $I_s$ ) e também para se estimar a tensão de compressão de uma amostra de rocha ( $\sigma_c$ ).

Os ensaios obedeceram a norma técnica americana da ASTM D5731-95 e foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (CCT-UENF).

Devido a grande praticidade de se realizar esse ensaio e também a mínima preparação que requer os corpos de prova nele utilizados, é que se optou por sua realização com o objetivo maior de se calibrar o fator  $C$ , que correlaciona o índice de tensão pontual ( $I_s$ ) e a tensão de compressão ( $\sigma_c$ ), especificamente para cada área de estudo desse trabalho. Com isso poderá-se, futuramente, estimar a resistência à compressão simples de materiais rochosos da região de Pádua com maior precisão devido aos ensaios de *point load* já estarem calibrados. Não havendo a necessidade, dependendo do caso, da realização de ensaios de

compressão simples em laboratório, que demandam mais trabalho e conseqüentemente mais tempo de execução.

As amostras para os ensaios foram retiradas das mesmas áreas das quais retirou-se os CP's para os ensaios de Compressão Simples (item 5.2 desse capítulo). Contudo, optou-se por corpos de prova em forma de blocos por haver maior facilidade de obtenção dos mesmos perante a empresa exploradora do material e também para se manter uma regularidade entre os mesmos. A norma utilizada permite a execução com CP's de acordo com a figura 49, e também informa que devem-se utilizar no mínimo 10 espécimes de um mesmo material para a realização do ensaio com corpos de prova na forma de pequenos blocos.

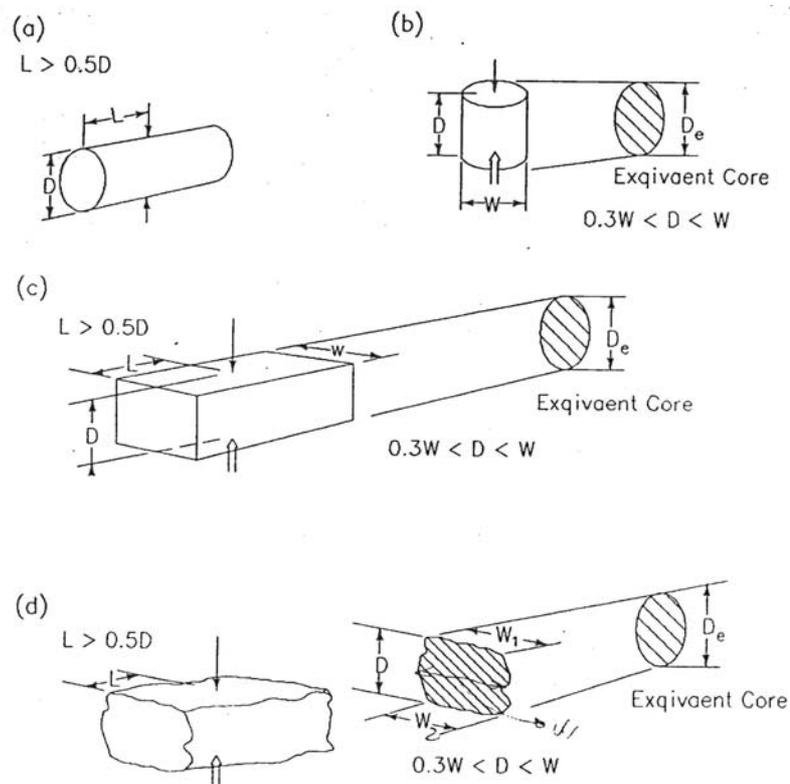


Figura 49- Formas adequadas de corpos de prova para a execução de ensaios de *point load*. Onde (a) teste diametral, (b) teste axial, (c) teste com bloco e (d) teste com CP irregular (ASTM, 1995).

O cálculo do Índice de Carga Pontual ( $I_s$ ) é dado pela equação:

$$I_s = P/D_e^2 \text{ (Mpa)} \quad (36)$$

Onde: P = carga de ruptura (N)

$D_e$  = diâmetro equivalente (mm)

Com o intuito de se obter um valor único ou uniforme de  $I_s$  para diversos corpos de provas de dimensões diferentes, há a necessidade de se determinar o fator de correção de tamanho (F) com o qual obtém-se o Índice de Carga Pontual Corrigido ( $I_{s(50)}$ ). O  $I_{s(50)}$  de um corpo de prova qualquer é definido como o valor de  $I_s$  para uma medida diametral de 50mm ( $D_e=50\text{mm}$ ) e pode ser obtido de acordo com a equação 37.

$$F = (D_e/50)^{1/2} \quad (37)$$

Estima-se o valor da tensão de compressão uniaxial do material através da relação:

$$\sigma_c = C \cdot I_{s(50)} \quad (38)$$

onde:  $\sigma_c$  = Tensão de compressão uniaxial

C = fator que depende da correlação entre  $\sigma_c$  e  $I_{s(50)}$  para uma maciço rochoso específico.

A seguir apresentam-se os dados obtidos na realização dos ensaios de *point load* com o material rochoso em estudo.

Tabela 34- Resultados dos ensaios de *point load* com o Granito Olho de Pombo.

Material: "Granito" Olho de Pombo

Aplicação da carga: normal a foliação

Local de Coleta: Pedreira Olho de Pombo - Pádua/RJ

Data: 01/04/2003

| Amostra | D (mm) | W (mm) | L (mm) | A (mm <sup>2</sup> ) | De2 (mm <sup>2</sup> ) | De (mm) | P (KN) | Is (MPa) | F    | Is(50) | C     | $\sigma_c$ (MPa) |
|---------|--------|--------|--------|----------------------|------------------------|---------|--------|----------|------|--------|-------|------------------|
| 01      | 46,00  | 80,00  | 56,00  | 3.680,00             | 4.685,66               | 68,45   | 24,30  | 5,19     | 1,17 | 6,07   | 24,50 | 148,67           |
| 02      | 38,00  | 80,00  | 57,50  | 3.040,00             | 3.870,76               | 62,22   | 20,50  | 5,30     | 1,12 | 5,91   | 24,50 | 144,74           |
| 03      | 44,00  | 80,00  | 57,50  | 3.520,00             | 4.481,94               | 66,95   | 27,07  | 6,04     | 1,16 | 6,99   | 24,50 | 171,23           |
| 04      | 51,00  | 77,00  | 56,00  | 3.927,00             | 5.000,16               | 70,71   | 30,68  | 6,14     | 1,19 | 7,30   | 24,50 | 178,77           |
| 05      | 40,00  | 81,00  | 57,50  | 3.240,00             | 4.125,42               | 64,23   | 23,67  | 5,74     | 1,13 | 6,50   | 24,50 | 159,32           |
| 06      | 54,00  | 79,00  | 59,00  | 4.266,00             | 5.431,80               | 73,70   | 39,21  | 7,22     | 1,21 | 8,76   | 24,50 | 214,72           |
| 07      | 49,00  | 50,00  | 50,00  | 2.450,00             | 3.119,53               | 55,85   | 17,84  | 5,72     | 1,06 | 6,04   | 24,50 | 148,08           |
| 08      | 48,00  | 50,00  | 50,00  | 2.400,00             | 3.055,87               | 55,28   | 18,05  | 5,91     | 1,05 | 6,21   | 24,50 | 152,16           |
| 09      | 49,00  | 50,00  | 50,00  | 2.450,00             | 3.119,53               | 55,85   | 16,39  | 5,25     | 1,06 | 5,55   | 24,50 | 136,05           |
| 10      | 49,00  | 50,00  | 50,00  | 2.450,00             | 3.119,53               | 55,85   | 17,51  | 5,61     | 1,06 | 5,93   | 24,50 | 145,35           |
| 11      | 49,00  | 50,00  | 50,00  | 2.450,00             | 3.119,53               | 55,85   | 16,89  | 5,41     | 1,06 | 5,72   | 24,50 | 140,20           |
| 12      | 49,00  | 50,00  | 50,00  | 2.450,00             | 3.119,53               | 55,85   | 17,54  | 5,62     | 1,06 | 5,94   | 24,50 | 145,59           |

Tabela 35- Resultados dos ensaios de *point load* com a Pedra Madeira.

Material: Pedra Madeira Rosa

Aplicação da carga: normal a foliação

Local de Coleta: Pedreira Pedra Madeira - Pádua/RJ

Data: 01/04/2003

| Amostra | D (mm) | W (mm) | L (mm) | A (mm <sup>2</sup> ) | De2 (mm <sup>2</sup> ) | De (mm) | P (KN) | Is (MPa) | F    | Is(50) | C     | $\sigma_c$ (MPa) |
|---------|--------|--------|--------|----------------------|------------------------|---------|--------|----------|------|--------|-------|------------------|
| 01      | 46,00  | 80,00  | 55,00  | 3.680,00             | 4.685,66               | 68,45   | 32,01  | 6,83     | 1,17 | 7,99   | 24,50 | 195,83           |
| 02      | 45,00  | 81,00  | 55,00  | 3.645,00             | 4.641,10               | 68,13   | 29,63  | 6,38     | 1,17 | 7,45   | 24,50 | 182,58           |
| 03      | 41,00  | 80,00  | 54,50  | 3.280,00             | 4.176,35               | 64,62   | 41,77  | 10,00    | 1,14 | 11,37  | 24,50 | 278,58           |
| 04      | 35,00  | 80,00  | 56,00  | 2.800,00             | 3.565,18               | 59,71   | 22,93  | 6,43     | 1,09 | 7,03   | 24,50 | 172,20           |
| 05      | 52,00  | 80,00  | 54,00  | 4.160,00             | 5.296,83               | 72,78   | 42,87  | 8,09     | 1,21 | 9,76   | 24,50 | 239,23           |
| 06      | 50,00  | 80,00  | 58,00  | 4.000,00             | 5.093,11               | 71,37   | 42,29  | 8,30     | 1,19 | 9,92   | 24,50 | 243,04           |
| 07      | 37,00  | 53,00  | 40,00  | 1.961,00             | 2.496,90               | 49,97   | 23,16  | 9,28     | 1,00 | 9,27   | 24,50 | 227,18           |
| 08      | 44,00  | 52,00  | 40,00  | 2.288,00             | 2.913,26               | 53,97   | 30,37  | 10,42    | 1,04 | 10,83  | 24,50 | 265,36           |
| 09      | 43,00  | 50,00  | 40,00  | 2.150,00             | 2.737,55               | 52,32   | 24,89  | 9,09     | 1,02 | 9,30   | 24,50 | 227,87           |
| 10      | 40,00  | 51,00  | 40,00  | 2.040,00             | 2.597,49               | 50,97   | 25,30  | 9,74     | 1,01 | 9,83   | 24,50 | 240,93           |
| 11      | 38,00  | 51,00  | 40,00  | 1.938,00             | 2.467,61               | 49,68   | 30,40  | 12,32    | 1,00 | 12,28  | 24,50 | 300,85           |
| 12      | 41,00  | 50,00  | 40,00  | 2.050,00             | 2.610,22               | 51,09   | 25,80  | 9,88     | 1,01 | 9,99   | 24,50 | 244,79           |

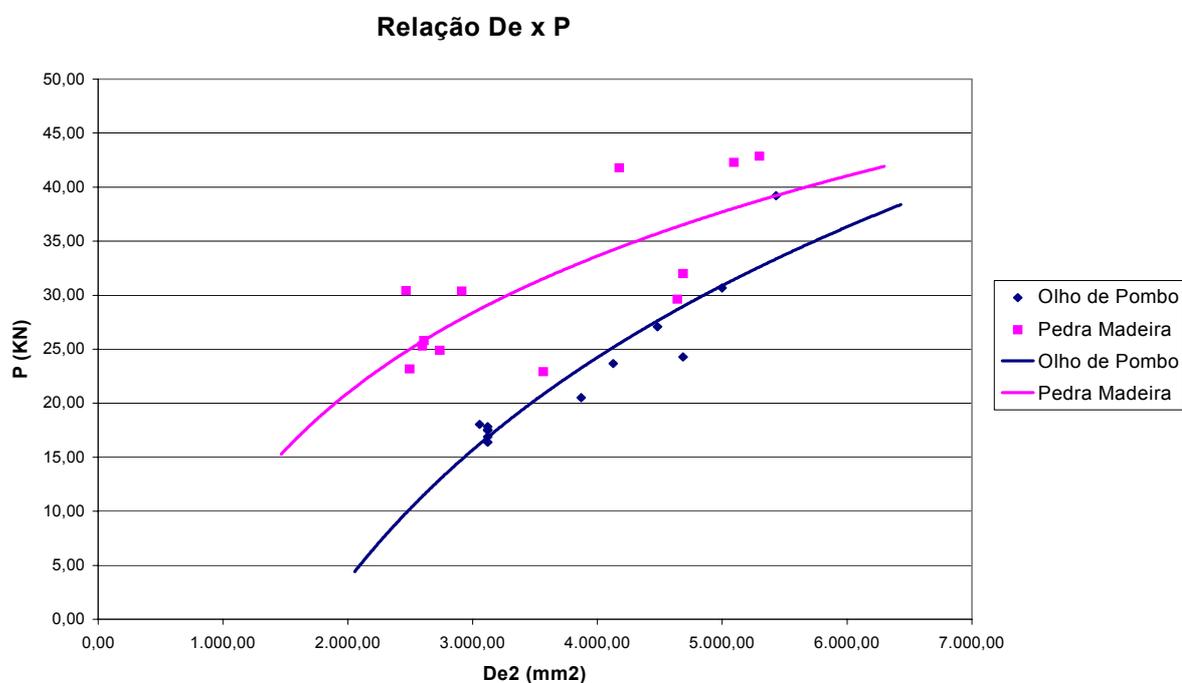


Figura 50- Relação entre o diâmetro equivalente e a carga de ruptura do *point load* para o granito olho de pombo e a pedra madeira.

O valor do fator “C” adotado nas tabelas 34 e 35 é proveniente da tabela 36 retirada da Norma da ASTM D5731-95, que relaciona o fator C com o diâmetro equivalente médio dos corpos de prova utilizados no ensaio.

Tabela 36- Valor geral de C em função do De (ASTM, 1995).

| $D_e$ médio (mm) | C    |
|------------------|------|
| 20               | 17,5 |
| 30               | 19   |
| 40               | 21   |
| 50               | 23   |
| 54               | 24   |
| 60               | 24,5 |

De acordo com os resultados dos ensaios de compressão uniaxial realizados no item 5.3 desse capítulo, pode-se realizar o cálculo inverso do fator C, com os valores de  $\sigma_c$  (obtidos em laboratório) e de  $I_{s(50)}$ , para o mesmo tipo de material. Com isso determina-se um valor de C mais realista para esses dois casos particulares (granito olho de pombo e pedra madeira rosa).

Resolvendo a equação 38 para “C” obtemos a tabela 38:

Tabela 37- Valor de C corrigido em função de  $\sigma_c$  determinado em laboratório para os mesmos materiais rochosos.

| <b>Granito Olho de Pombo</b> |                       |                 |
|------------------------------|-----------------------|-----------------|
| $I_{s(50)}$ médio (Mpa)      | $\sigma_{cméd}$ (Mpa) | $C_{corrigido}$ |
| 6,20                         | 134,35                | 17,34           |
| <b>Pedra Madeira</b>         |                       |                 |
| $I_{s(50)}$ médio (Mpa)      | $\sigma_{cméd}$ (Mpa) | $C_{corrigido}$ |
| 9,61                         | 160,32                | 16,70           |

## CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

Relativo a classificação dos maciços rochosos em estudo conclui-se que:

Pode-se observar em ambos os maciços estudados, que as prováveis rupturas na superfície dos taludes estão condicionadas principalmente pela própria estrutura geológica, com foliação dominante plana, persistentes e fechadas, possuindo mergulhos altos (acima de  $45^\circ$ ) e os mergulhos do talude também próximos desse valor (Maciço Olho de Pombo com mergulho de  $66^\circ$  e maciço de Pedra Madeira com mergulho de  $60^\circ$ ). Outro fator que condiciona as possíveis rupturas nas pedreiras é o processo de lavra a fogo, aplicado sem um controle racional, o que desestrutura os maciços. Contudo essas prováveis rupturas não abalam a estabilidade global do talude para o nível atual da lavra.

Vale ressaltar que na classificação geomecânica pelo sistema RMR do maciço da Pedreira Olho de Pombo obteve um conceito de bom a muito bom (setor N e NW: classe I e setor W: classe II) e a Pedreira Pedra Madeira um conceito de regular a Bom (Setor N: classe II e setor S: classe III), o que denota mais uma vez a estabilidade dos mesmos.

Analisando os valores das constantes  $m_b$  e  $s$ , determinados de acordo com o critério de ruptura de Hoek & Brown, pode-se concluir, comparando o maciço Olho de Pombo ( $m_b=9,8$  e  $s=0,023$ ) com o maciço Pedra Madeira ( $m_b=10,15$  e  $s=0,026$ ), que esse último possui um “ângulo de atrito” maior que o maciço Olho de Pombo, denotado pelo maior valor de  $m_b$  que de acordo com o critério adotado tem função semelhante ao ângulo de atrito para solos. Já de acordo com o parâmetro  $s$ , que denota o grau de fraturamento dos maciços, os mesmos possuem um valor de  $s$  próximo um ao outro denotando uma similaridade entre o grau de fraturamento presente, evidenciado no levantamento de superfície que mostrou três famílias para o maciço Olho de Pombo e apenas duas famílias de discontinuidades para o maciço de Pedra Madeira, sendo uma delas a foliação dominante.

Recomenda-se nesse caso a realização de ensaios que determinem os parâmetros de resistência dos materiais no sentido paralelo à foliação, com o intuito de se observar melhor as condições de ruptura condicionadas a foliação dominante dos maciços.

Com relação à determinação das deformações e tensões principais dos maciços rochosos em estudo conclui-se que:

Os procedimentos de campo para o levantamento das deformações e deslocamentos dos maciços mostraram-se bastante simples e podem ser executados de modo rápido, desde que se tomem os cuidados necessários para isso. Como, evitar o surgimento de umidade e impurezas na superfície em que se colará os pinos de referência e escolher com cuidado o posicionamento dos mesmos, de acordo com o objetivo do levantamento. Isso tudo poderá futuramente implicar em atrasos e aumento dos custos no trabalho.

Os gráficos das deformações e deslocamentos recuperados (Cap. 04) revelaram que bons resultados podem ser obtidos com equipamentos simples e poucos recursos.

Observa-se que as deformações principais e conseqüentemente as tensões principais na direção perpendicular a face de ambos os taludes possuem magnitudes bem inferiores aos respectivos valores na direção paralela aos mesmos (Fig.47 e 48 Cap. 05). O que já era esperado, pois na direção perpendicular ao talude, o maciço não se encontra mais em estado de confinamento (frente da lavra). Ao contrário, na direção paralela à face do talude as deformações e tensões principais são maiores que as anteriores e crescem gradativamente à medida que o corte é aprofundado (Tabela 28). Essas deformações ocorrem devido ao alívio das tensões confinantes existentes nos maciços a medida em que se executa os cortes nos mesmos.

Os dados das medidas de deslocamento dos maciços através dos cortes executados pelo maçarico (final do Cap. 04), denotam que as tensões principais maiores ( $\sigma_1$ ) *in situ* nos locais de medição são de compressão, pois as paredes do corte se aproximam uma da outra

conforme o corte é executado. Conseqüentemente, as tensões principais menores ( $\sigma_3$ ) de ambos os maciços são de tração devido ao sinal contrário a  $\sigma_1$ , como mostra a tabela 33 do Capítulo 05.

Os gráficos (Fig. 37 e 38 do Cap. 04) mostram o crescimento dos deslocamentos à medida que o tempo de relaxamento das tensões nos maciços aumenta, assim como a profundidade do corte. Nota-se uma discrepância na terceira leitura do Deslocamento 03 para o maciço de Pedra Madeira (Fig. 38), possivelmente devido a um erro de leitura de campo, pois é o único gráfico que foge sensivelmente do padrão dos demais.

Recomenda-se que se faça uma preparação melhor no local da colagem dos pinos de referência, como planificação e polimento da superfície da rocha, o que evitará que os pinos se posicionem em superfícies irregulares dificultando o posicionamento do extensômetro e conseqüentemente a leitura correta dos dados.

Com relação aos procedimentos de laboratório e ensaios realizados pode-se concluir que:

De um modo geral o ensaio escolhido para a determinação dos parâmetros E e  $\nu$ , necessários ao cálculo das tensões *in situ*, são simples e de fácil execução.

Os parâmetros elásticos obtidos através dos ensaios de laboratório foram realizados no plano perpendicular a foliação do material. Tal fato fornece parâmetros aproximados para o maciço como um todo, podendo induzir a erros na determinação das tensões *in situ*.

Mesmo sabendo da existência de modelos e critérios que integram a anisotropia e heterogeneidade dos materiais rochosos, o presente trabalho considerou os materiais em estudo como isotrópicos, homogêneos e lineares.

Os resultados dos ensaios de compressão uniaxial com monitoramento das deformações mostraram que ambos os materiais em estudo possuem uma ruptura frágil, principalmente a pedra madeira (mais rígida) que sofreu deformações menores com uma maior resistência final a compressão (ver Fig. 45 e 46). Os valores das tensões de resistência à

compressão dos materiais obtidos estão em conformidade com dados de outros trabalhos realizados com os mesmos materiais da área.

Na determinação do fator de correção  $C$  nos ensaios de *Point Load*, mostrou-se que o valor de  $C$  da literatura é maior que o determinado para cada maciço estudado. Isso possivelmente é devido ao fato do “ $C$ ” determinado pela literatura ser proveniente de um valor médio para vários materiais já estudados anteriormente. Com um “ $C$ ” específico para o material da região de Pádua pode-se, futuramente estimar a resistência à compressão do mesmo mais facilmente com uma melhor aproximação. Vale ressaltar que mesmo numa região próxima, as propriedades dos materiais podem variar sensivelmente, não sendo indicado à realização de tais aproximações para projetos de grande monta. Contudo, o valor do fator  $C$  para os dois maciços ficaram muito próximos um do outro ( $C \approx 17$ ) denotando que possivelmente a utilização desse valor para se estimar a resistência a compressão do material é bastante coerente para toda a região.

Recomenda-se a utilização de técnicas mais modernas na determinação das deformações *in situ*, com a utilização de sensores elétricos que dariam uma maior precisão e um maior número de dados. Recomenda-se também a determinação das deformações em outros planos da frente de lavra, como na face e na base do talude. Com esses dados seria possível determinar a orientação espacial das tensões principais no maciço.

Finalmente, a utilização da técnica dos pinos de referência permitiu a determinação das tensões *in situ* em duas diferentes localidades de exploração de rochas ornamentais de Santo Antônio de Pádua. Os objetivos específicos de aprendizagem da técnica e do desenvolvimento de um trabalho científico foram cumpridos, possibilitando a realização de futuros trabalhos na área de Mecânica das Rochas na região de Santo Antônio de Pádua.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Alencar*, C.A.A. (Coord). Estudo Econômico sobre Rochas Ornamentais Vol. 3. Tecnologias de Lavra e Beneficiamento. Federação das Indústrias do Estado do Ceará. Fortaleza, Ceará. 225p. 1996.
- ABGE* - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. Comitê Brasileiro de Mecânica das Rochas. Métodos para Descrição Quantitativa de Descontinuidades em Maciços Rochosos. São Paulo, 132p. 1993.
- ABNT*- Associação Brasileira de Normas Técnicas.NBR 6023. Rio de Janeiro, RJ. 24p. 2002.
- ASTM* - Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock. Designation: D 5731-95. Annual Book of ASTM Standard, 4: 494-500. 1995.
- ASTM* - Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression. Designation: D 3148-02. Annual Book of ASTM Standard, 1-5. 2002.
- Bacci*, D.C. Vibrações Geradas pelo Uso de Explosivos no Desmonte de Rochas: Avaliação dos Parâmetros Físicos do Terreno e dos Efeitos Ambientais. Tese de Doutorado. UNESP, São Paulo. 211p. 2000.
- Barroso*, J.A., Marques, E.A.G., Almeida, L.C.R., Barroso, E.V. & Silva, A.M.C. A importância de um melhor conhecimento da compartimentação de maciços rochosos em taludes de corte rodoviário – Instituto de Geociências, UFRJ.
- Bieniawski*, Z.T. Engineering rock mass classifications. John Wiley & Sons inc., New York, N.Y. 1989.
- Bortolucci*, A.A. Modelo de Ruptura em Compressão de Materiais Frágeis Baseado na Mecânica da Fratura e Aplicado ao Efeito-Escala. Tese de Doutorado. USP, São Paulo. 132p. 1993.
- Bravo*, B. Fundamentos de Mecânica de Rocas. Madri. 576p. 1973. Brown, E.T. (Ed) Rock Characterization Testing and Monitoring. Pergamon Press. Oxford, England. 211p. 1981.

*Caputo*, H.P. Mecânica dos Solos e suas Aplicações, Vol. 1, 2 e 3: Mecânica das Rochas, Fundações, Obras de Terra. 6ª Edição. Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro, RJ. 1988.

*Farfán*, A.D. Estudo de Estabilidade de Taludes em Mineração a partir de Classificação Geomecânica. Dissertação de Mestrado. UnB, Brasília. 192p. 1995.

*Filho*, O.A. Caracterização geológico-geotécnica voltada a estabilização de encostas: Uma proposta metodológica. IPT.

*Figueiredo Ferraz Consultoria e Engenharia de Projeto*. Estudo de Estabilidade de Taludes da Face Sul. Relatório Final T-90.054/S-I16. Belo Horizonte, MG. 1991.

*Grossmann*, N.F. (1978) Contribuição para o estudo da compartimentação dos maciços . 1º Relatório, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 197p.

*Grossmann*, N.F. (1988) As descontinuidades nos maciços rochosos. 1º Relatório. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 118p.

*Hees*, F.J. Utilização da Técnica do Doorstopper Modificada na Determinação de Tensões *in situ* em Maciços Rochosos. Dissertação de Mestrado. PUC-RIO, Rio de Janeiro. 154p. 1996.

*Hoek*, E. & *Brown*, E.T. The Hoek – Brown Failure Criterion. Dept. Civil Engineering. University of Toronto, Canadá. 1988.

*Iamaguti*, A.P.S. Manual de Rochas Ornamentais para Arquitetos. Dissertação de Mestrado. UNESP, São Paulo. 318p. 2001.

*Kayabasi*, A., *Gokceoglu*, C. e *Ercanoglu*, M. Estimating the Deformation Modulus of Rock Masses: A Comparative Study. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 40:55-63. 2003.

*Lana*, M.S. e *Gripp*, M.F. Um Procedimento para Identificação dos Mecanismos de Ruptura em Taludes Rochosos. Revista da Escola de Minas, 52(4): p245-249. 1999.

*Lana*, M.S., *Pinheiro*, A.L. & *Goulart*. A.E.L. Influência das Estruturas Geológicas e da escala de trabalho na metodologia de levantamentos geológicos-geotécnicos. Escola de Minas, UFOP.

*Leme*, R.A.S. Dicionário de Engenharia Geotécnica Inglês-Português. São Paulo, SP. 171p. 1980.

*Oliveira*, A.M.S. e *Brito*, S.N.A. (Ed). Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE. São Paulo, SP. 586p. 1998.

*Oliveira*, M.A. Avaliação Técnico-Econômica da Extração de Rocha Ornamental no Município de Santo Antônio de Pádua - RJ. Dissertação de Mestrado. UFRJ, Rio de Janeiro. 156p. 1998.

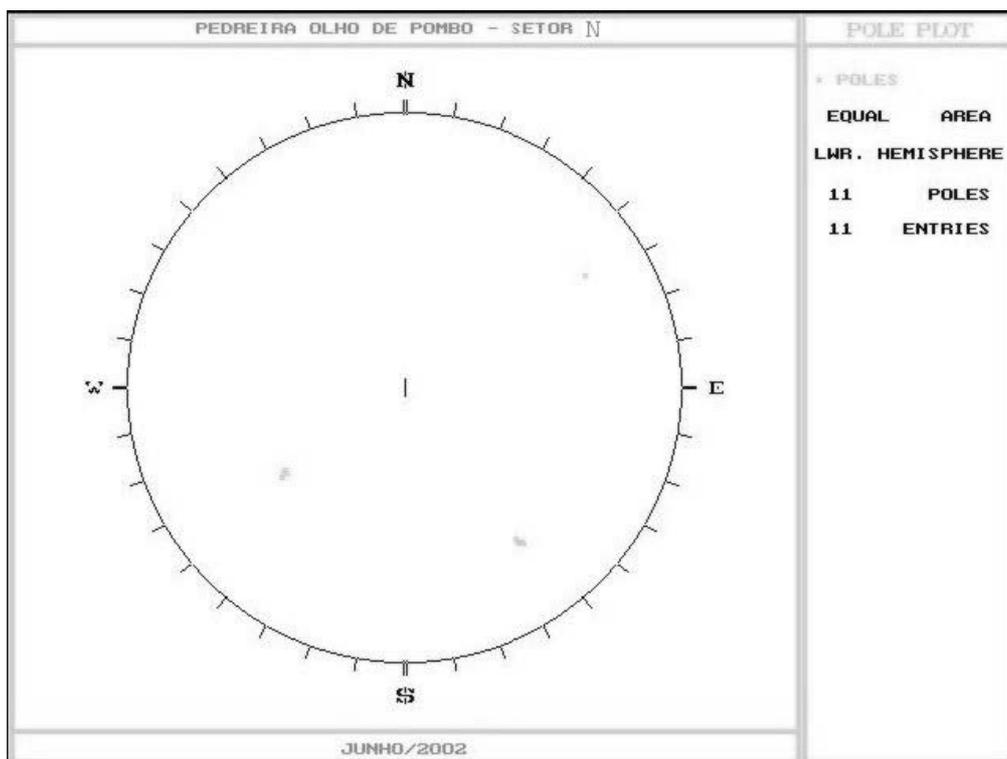
*Park*, H.J. e *West*,T.R. Sampling Bias of Discontinuity Orientation Caused by Linear Sampling Technique. *Engineering Geology*, 66: p99-p110. 2002.

## A- Anexos:

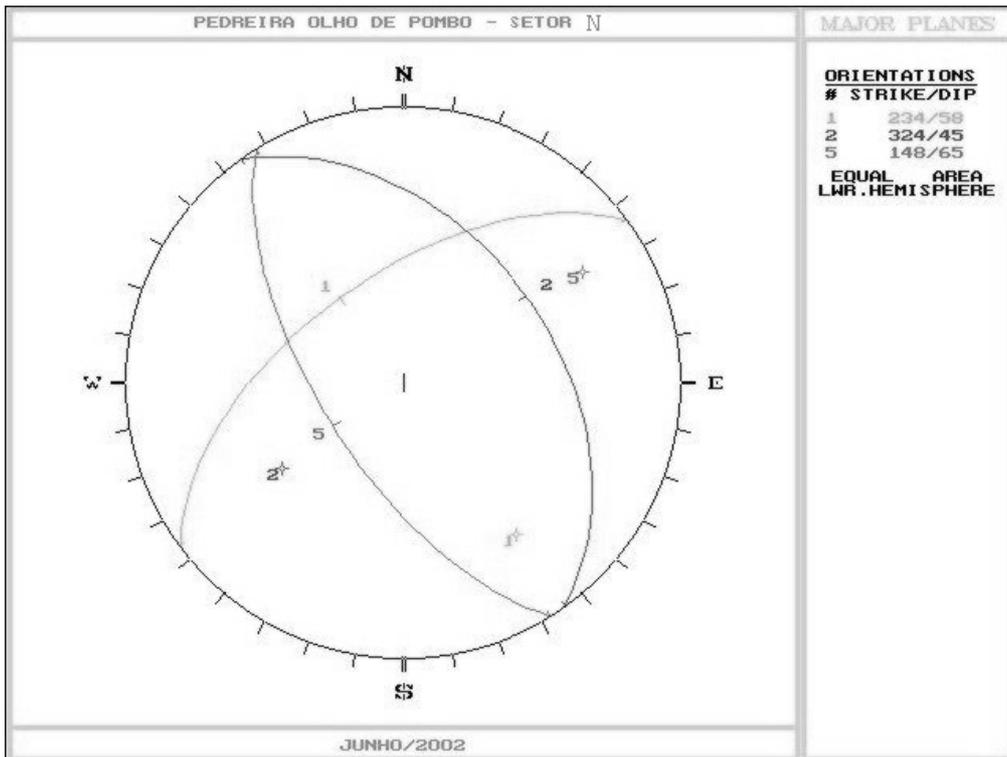
### A1: Projeções Estereográficas de igual área dos maciços rochosos das pedreiras Olho de Pombo e Pedra Madeira em Santo Antônio de Pádua/RJ.

Apresenta-se a seguir, estereogramas das atitudes dos planos de descontinuidades existentes nos maciços rochosos em estudo. Com o intuito de se definir melhor cada uma das famílias, as mesmas foram plotadas separadamente. Contudo no final da seção observam-se todas as famílias numa mesma projeção.

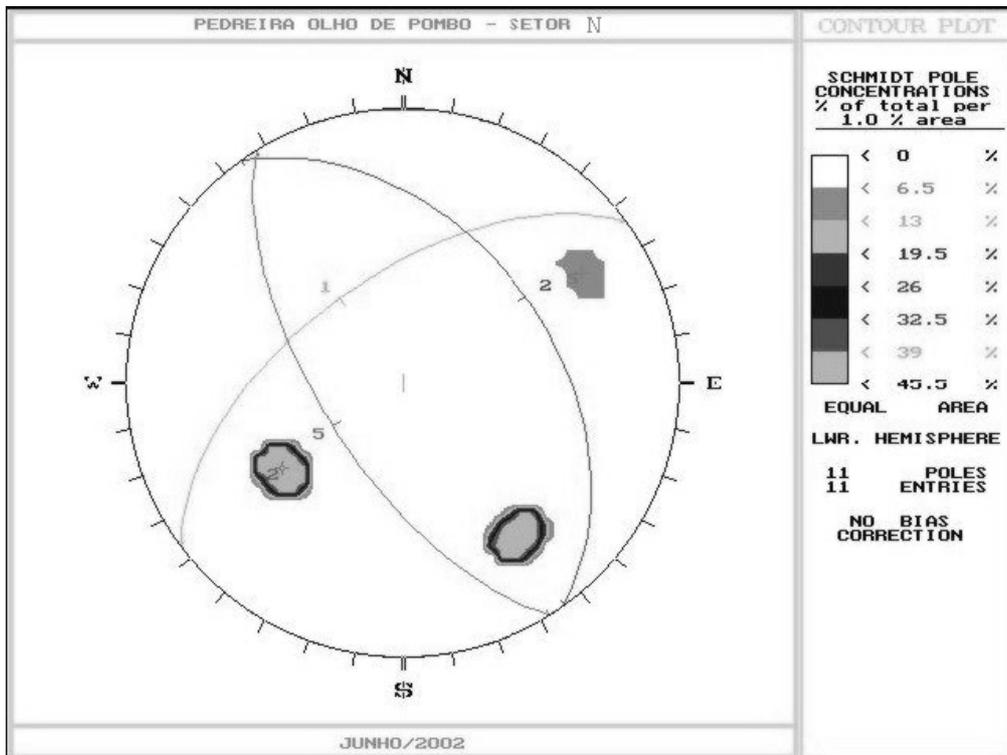
Nota-se nas seguintes projeções que foram representados os planos médios das descontinuidades presentes em cada maciço rochoso.



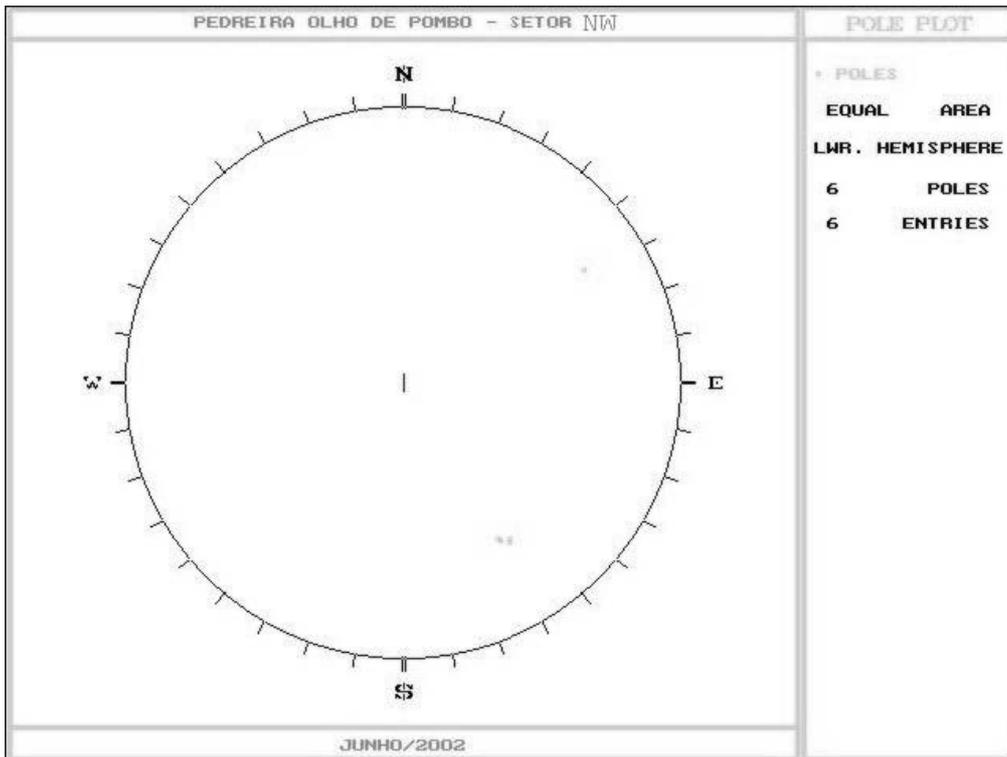
Projeção Estereográfica 01- Distribuição dos pólos das descontinuidades presente no setor N do maciço da pedreira Olho de Pombo. Observa-se também o pólo do talude de corte do mesmo (acima à direita do círculo).



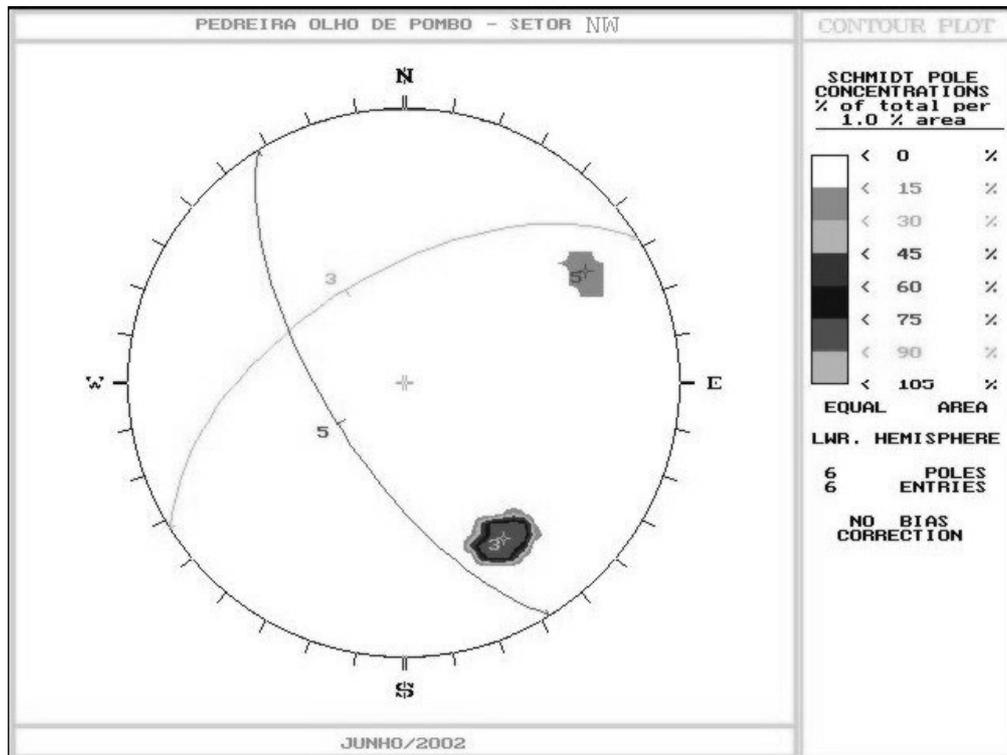
Projeção Estereográfica 02- Orientação dos vetores do talude de corte e das discontinuidades encontradas no setor N do maciço da pedraira Olho de Pombo (1- família N/01, 2- família N/02 e 5- talude de corte).



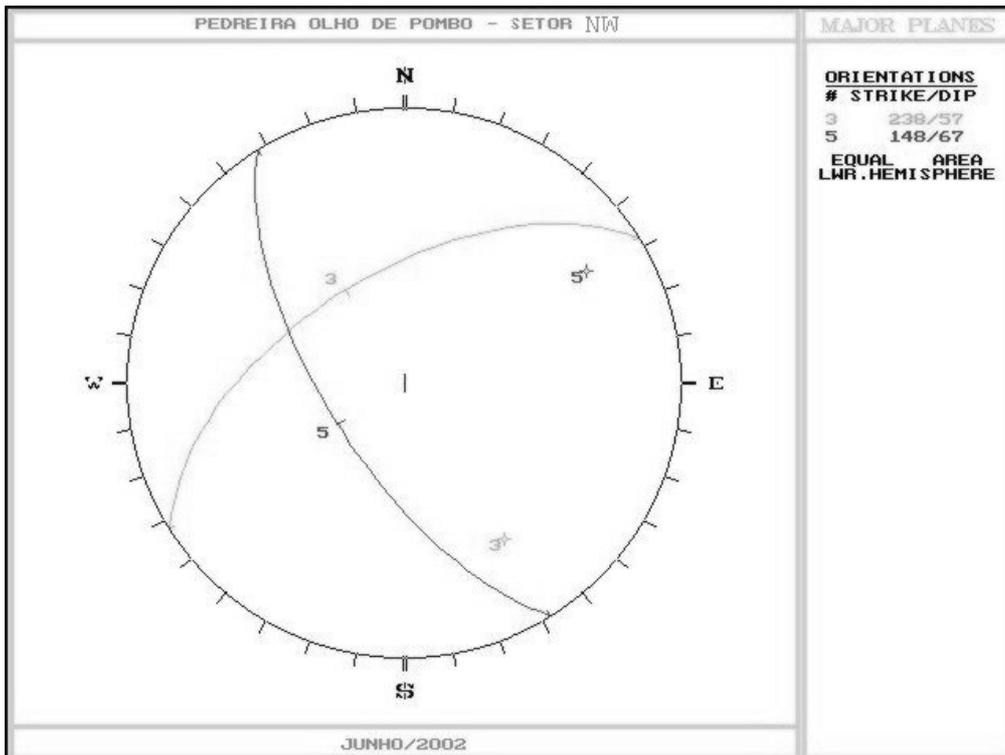
Projeção Estereográfica 03- Concentração dos pólos das discontinuidades encontradas no setor N do maciço da pedraira Olho de Pombo (1- família N/01, 2- família N/02 e 5- talude de corte).



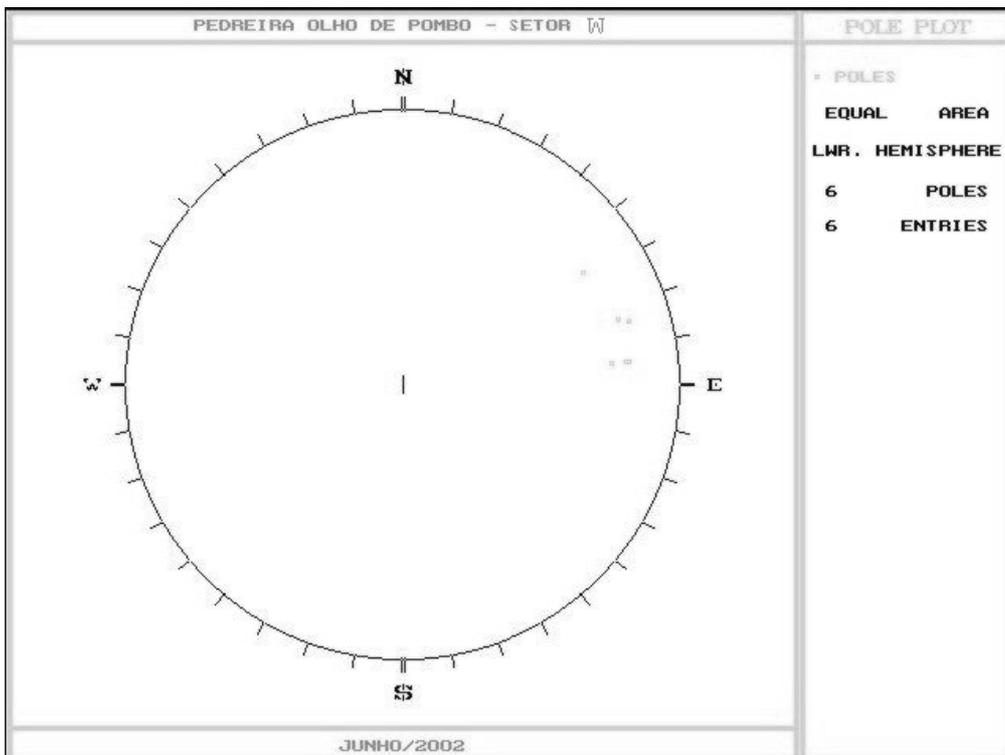
Projeção Estereográfica 04- Distribuição dos pólos das descontinuidades presente no setor NW do maciço da pedreira Olho de Pombo. Observa-se também o pólo do talude de corte do mesmo (acima à direita do círculo).



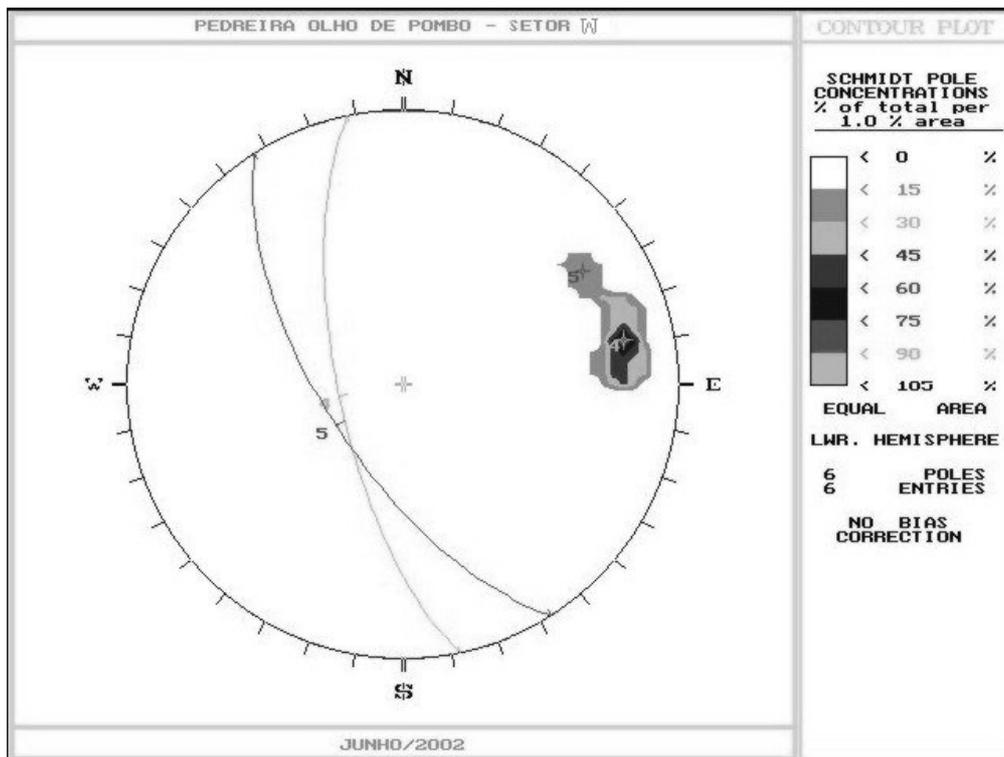
Projeção Estereográfica 05- Concentração dos pólos das descontinuidades encontradas no setor NW do maciço da pedreira Olho de Pombo (3- família NW/01 e 5- talude de corte).



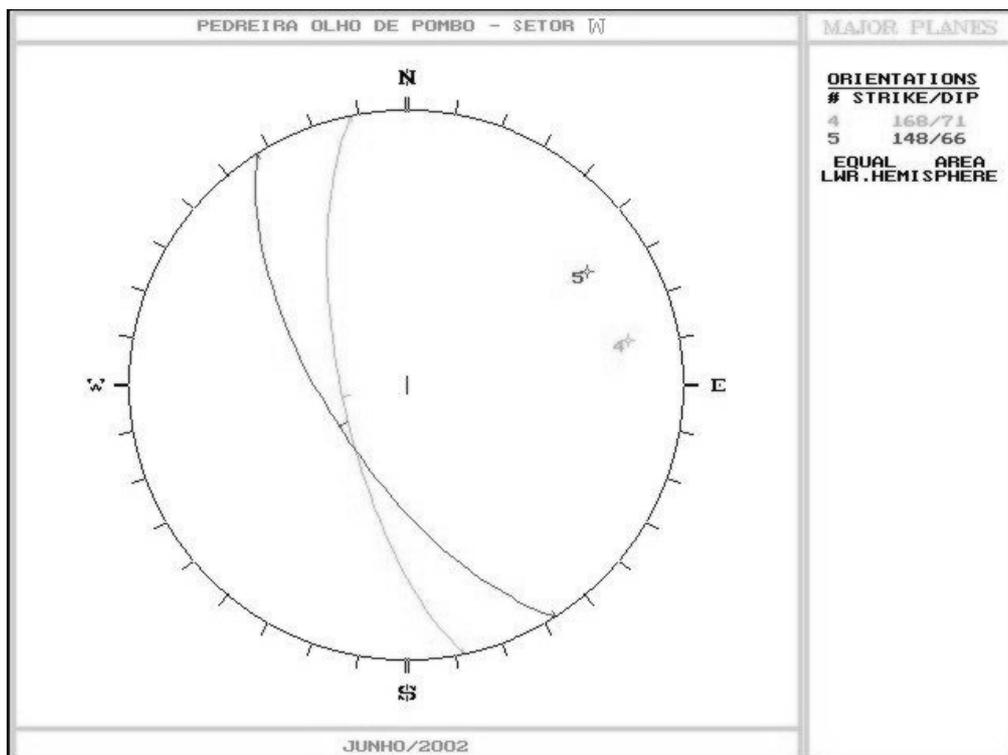
Projeção Estereográfica 06- Orientação dos vetores do talude de corte e das discontinuidades encontradas no setor NW do maciço da pedreira Olho de Pombo (3- família NW/01 e 5- talude de corte).



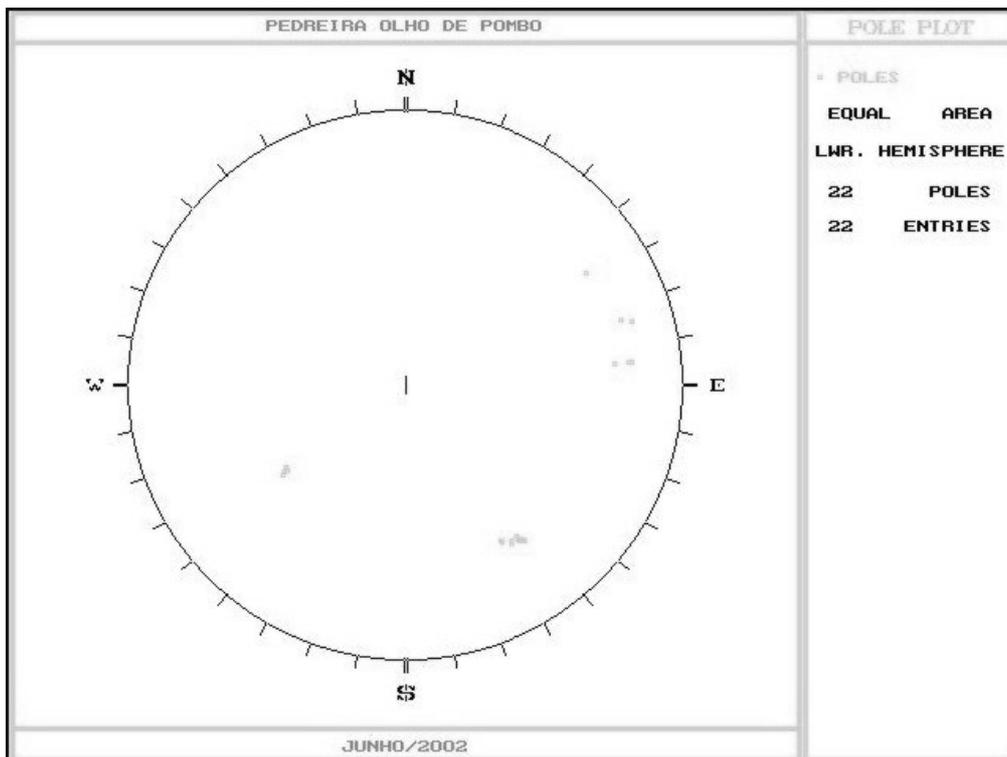
Projeção Estereográfica 07- Distribuição dos pólos das discontinuidades presente no setor W do maciço da pedreira Olho de Pombo. Observa-se também o pólo do talude de corte do mesmo (acima à direita do círculo).



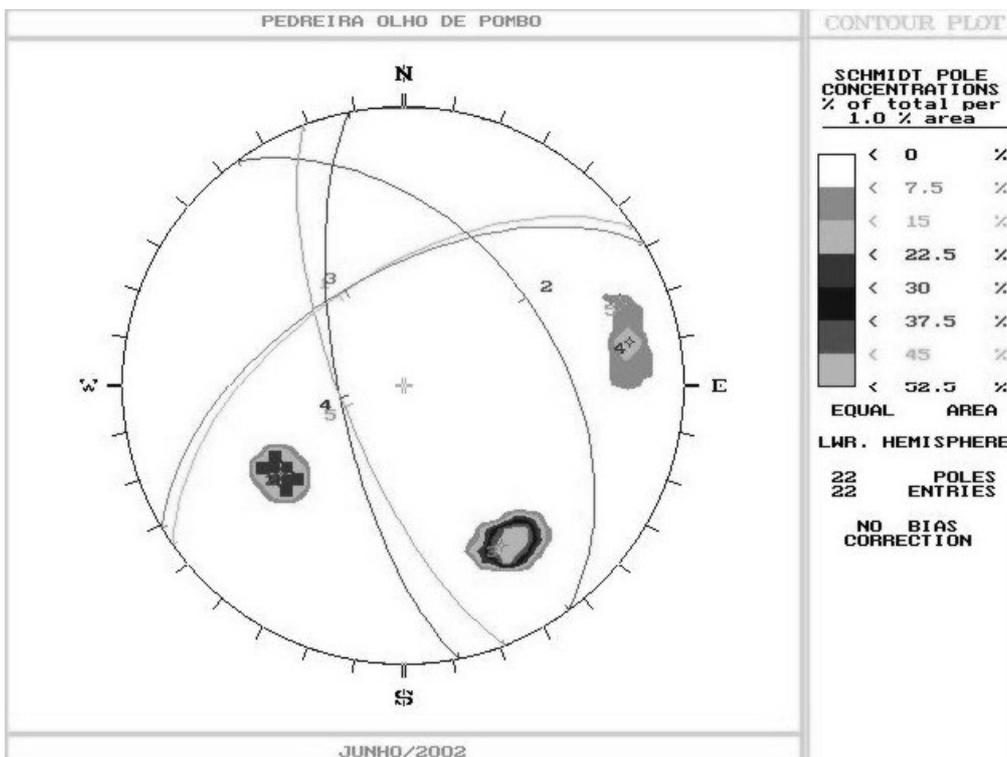
Projeção Estereográfica 08- Concentração dos pólos das descontinuidades encontradas no setor W do maciço da pedreira Olho de Pombo (4- família W/01 e 5- talude de corte).



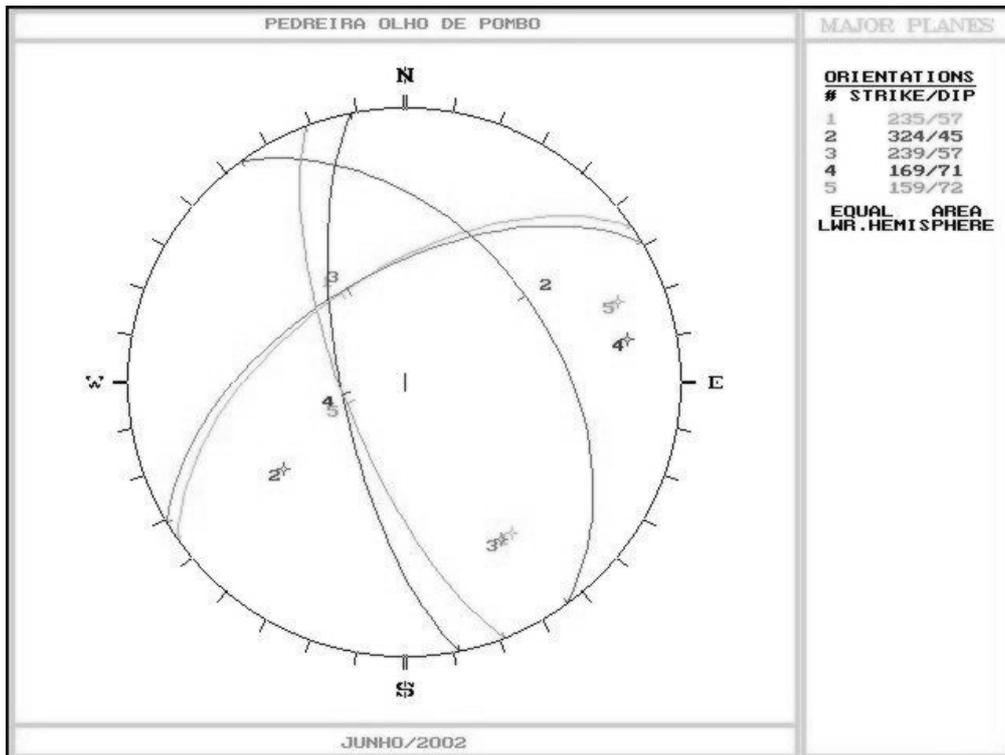
Projeção Estereográfica 09- Orientação dos vetores do talude de corte e das descontinuidades encontradas no setor W do maciço da pedreira Olho de Pombo (4- família W/01 e 5- talude de corte).



Projeção Estereográfica 10- Distribuição de todos os pólos das discontinuidades presente no maciço da pedra Olho de Pombo (famílias N/01, N/02, NW/01 e W/01). Observa-se novamente o pólo do talude de corte do mesmo (isolado acima à direita do círculo).

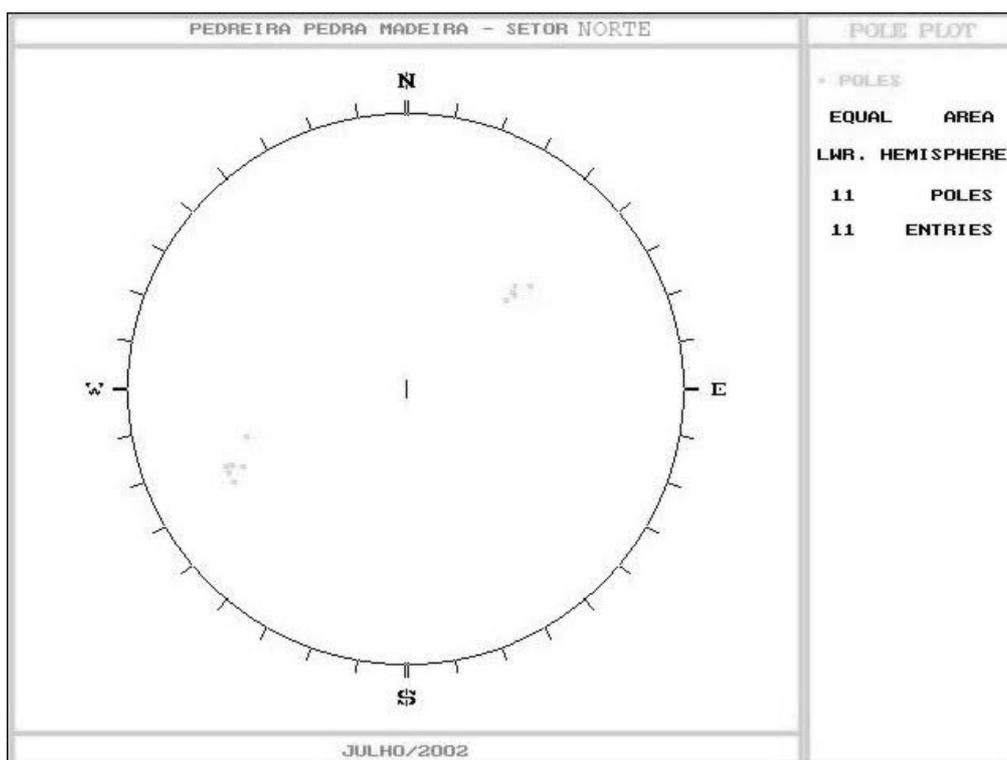


Projeção Estereográfica 11- Concentração dos pólos das discontinuidades encontradas no maciço da pedra Olho de Pombo (1- família N/01, 2- família N/02, 3- família NW/01, 4- família W/01 e 5- talude de corte).

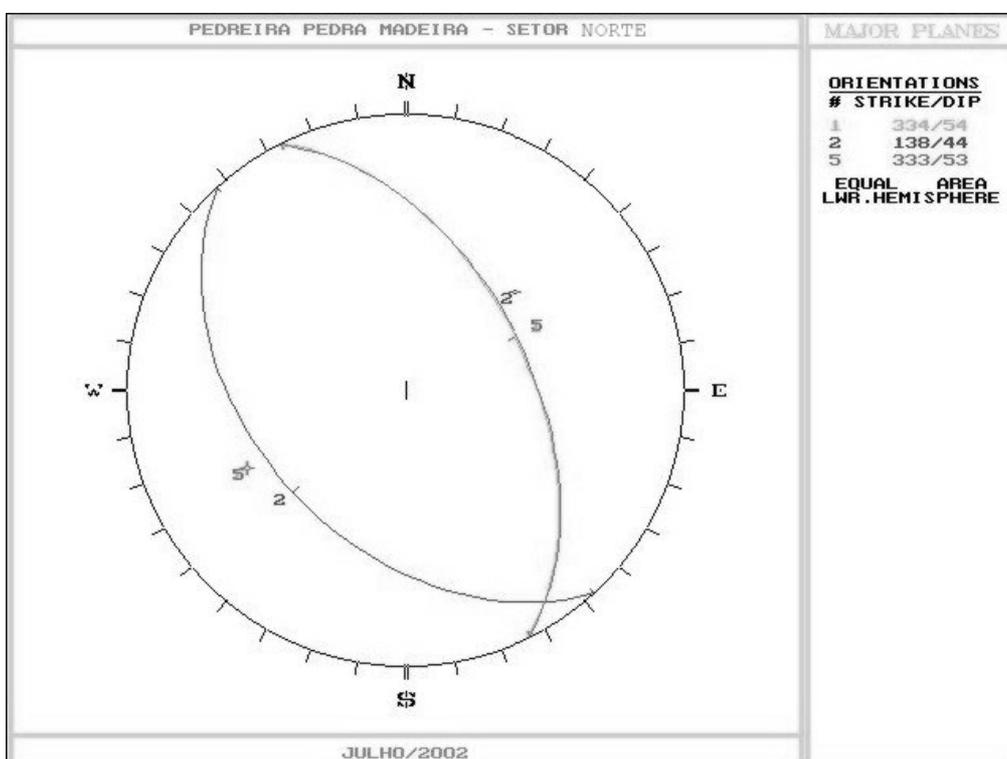


Projeção Estereográfica 12- Orientação dos vetores do talude de corte e das discontinuidades encontradas no maciço da pedreira Olho de Pombo (1- família N/01, 2- família N/02, 3- família NW/01, 4- família W/01 e 5- talude de corte).

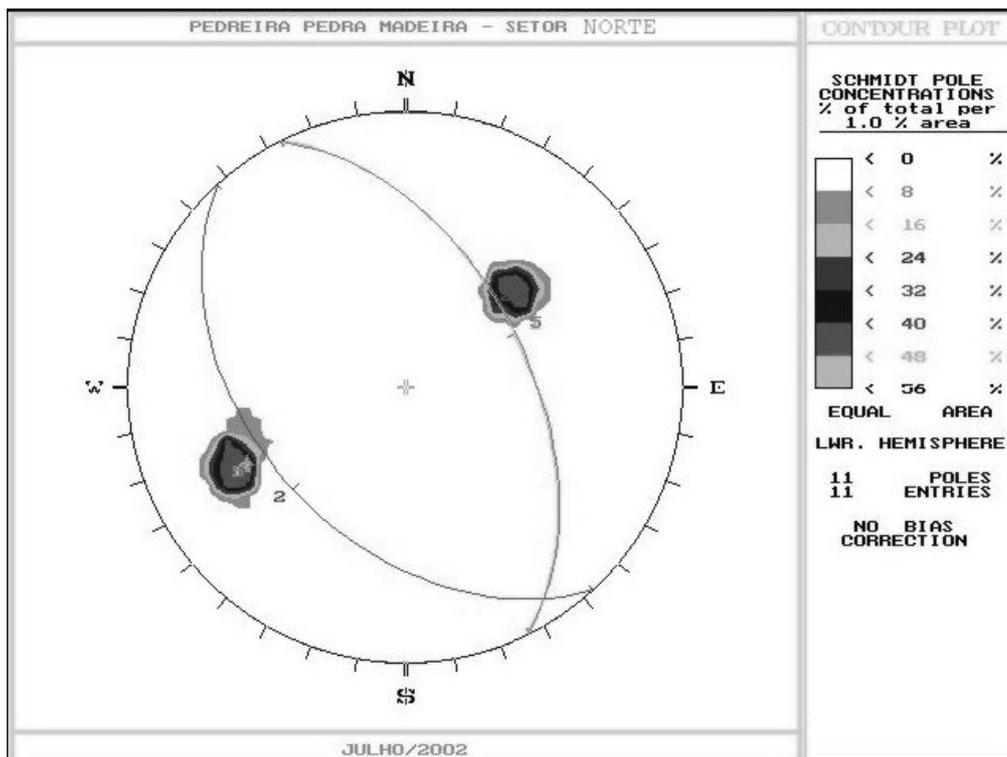
Continuação do Anexo A1 (pedreira Pedra Madeira)



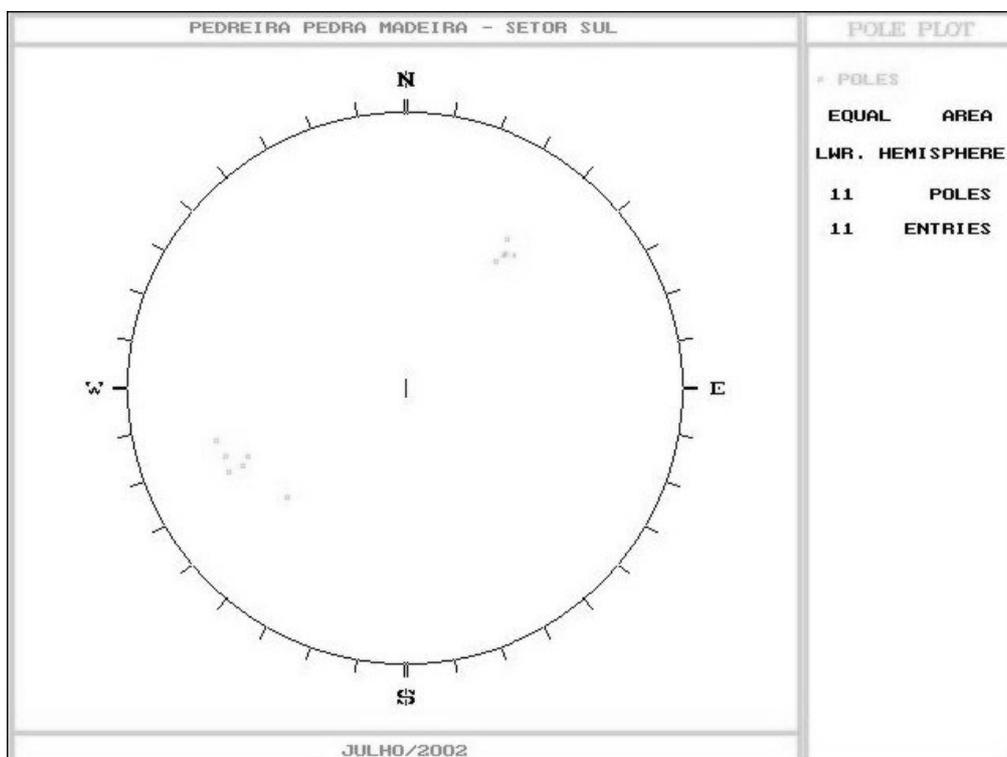
Projeção Estereográfica 13- Distribuição dos pólos das descontinuidades presente no maciço da pedra Pedra Madeira (famílias N/01 - foliação e N/02). Observa-se o pólo do talude de corte do mesmo (isolado à esquerda do grande círculo).



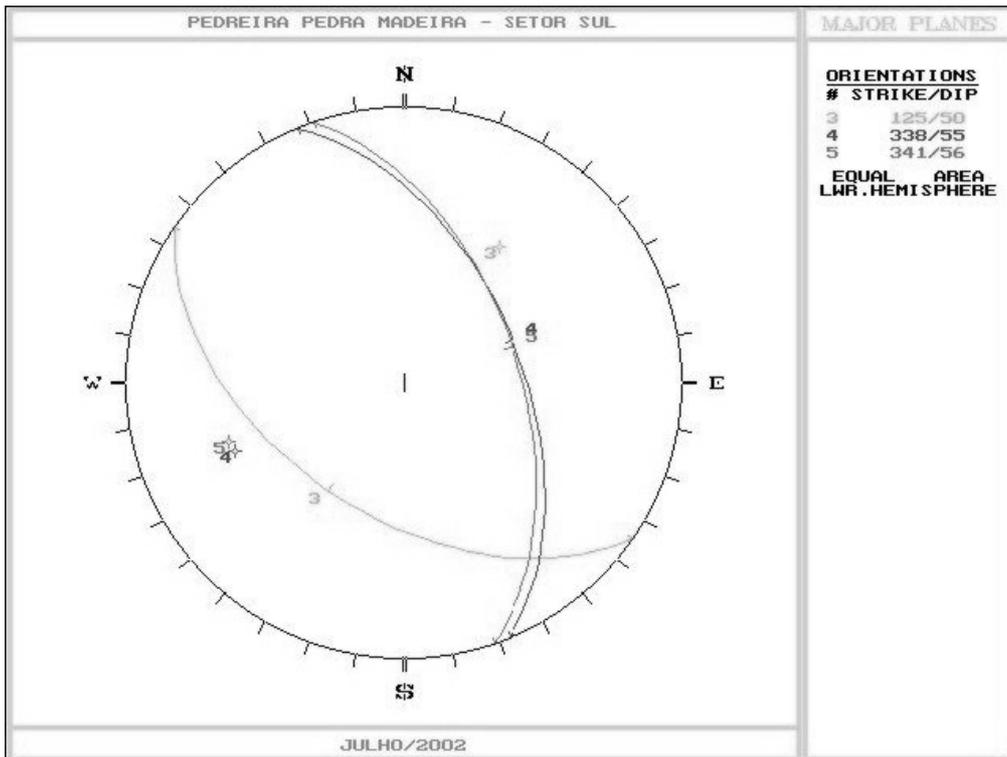
Projeção Estereográfica 14- Orientação dos vetores do talude de corte e das descontinuidades encontradas no maciço da pedra Pedra Madeira (1- família N/01 – foliação praticamente coincidente com o talude, 2- família N/02 e 5- talude de corte).



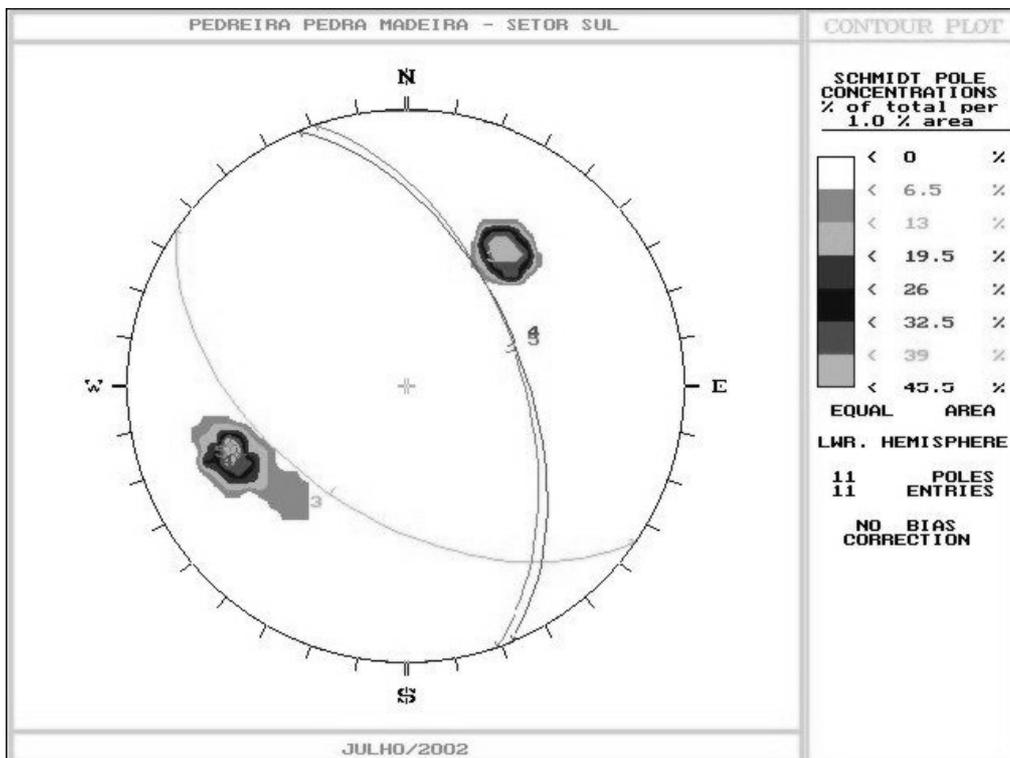
Projeção Estereográfica 15- Concentração dos pólos das discontinuidades encontradas no maciço da pedra Pedra Madeira (1- família N/01 – foliação praticamente coincidente com o talude, 2- família N/02 e 5- talude de corte).



Projeção Estereográfica 16- Distribuição dos pólos das discontinuidades presente no maciço da pedra Pedra Madeira, setor Sul (famílias S/03 e S/02 - foliação). Observa-se o pólo do talude de corte do mesmo (isolado à esquerda do grande círculo).

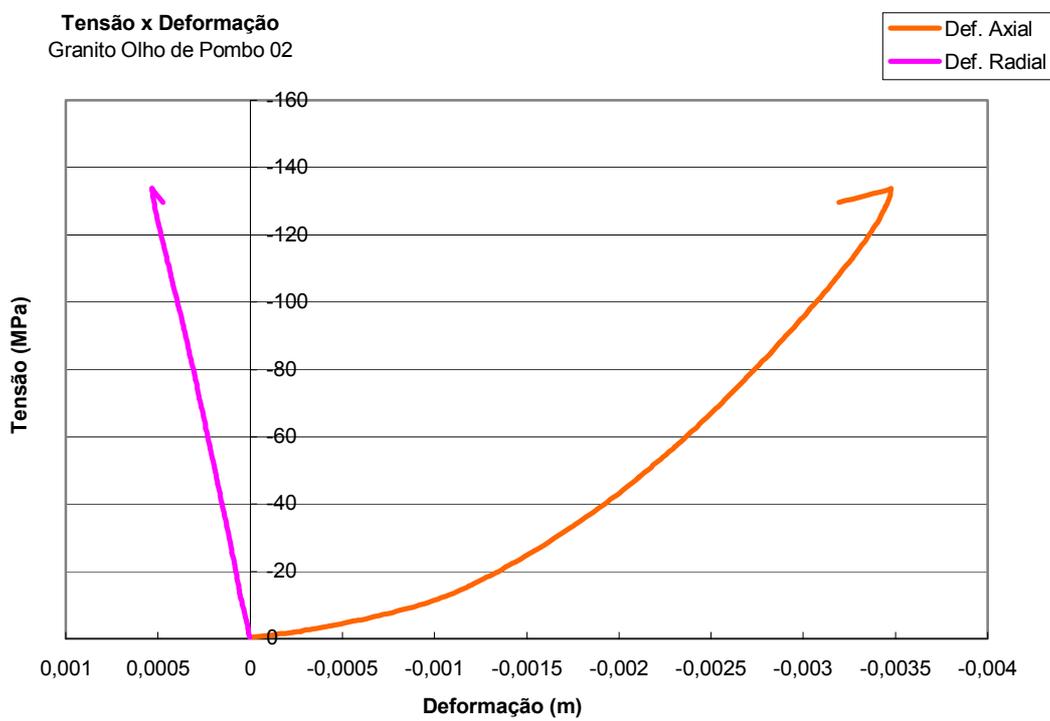
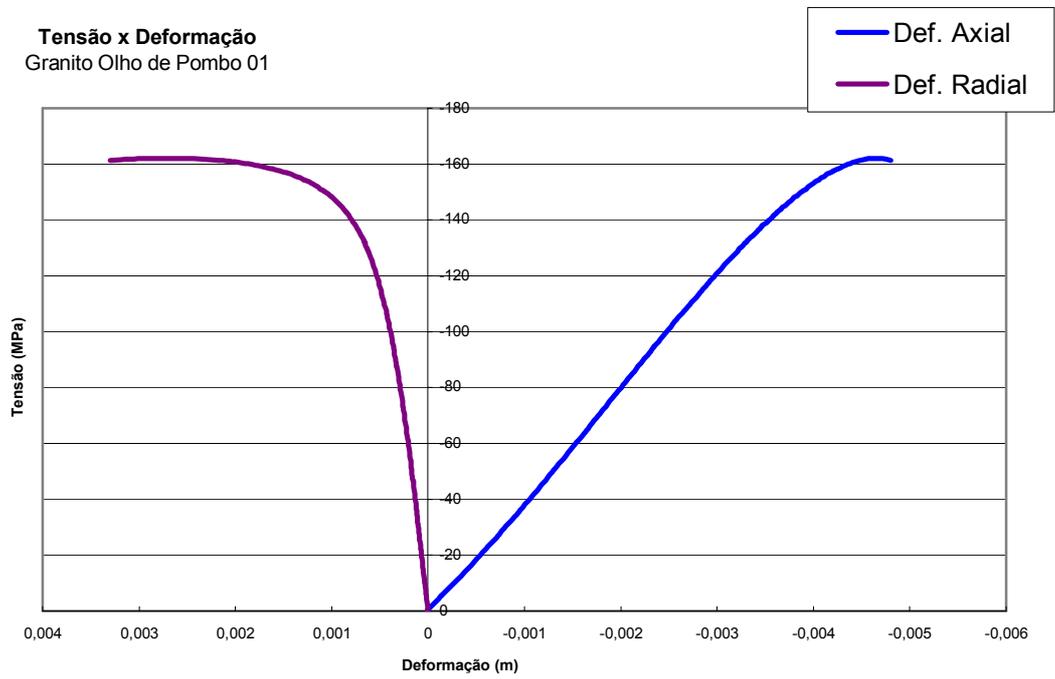


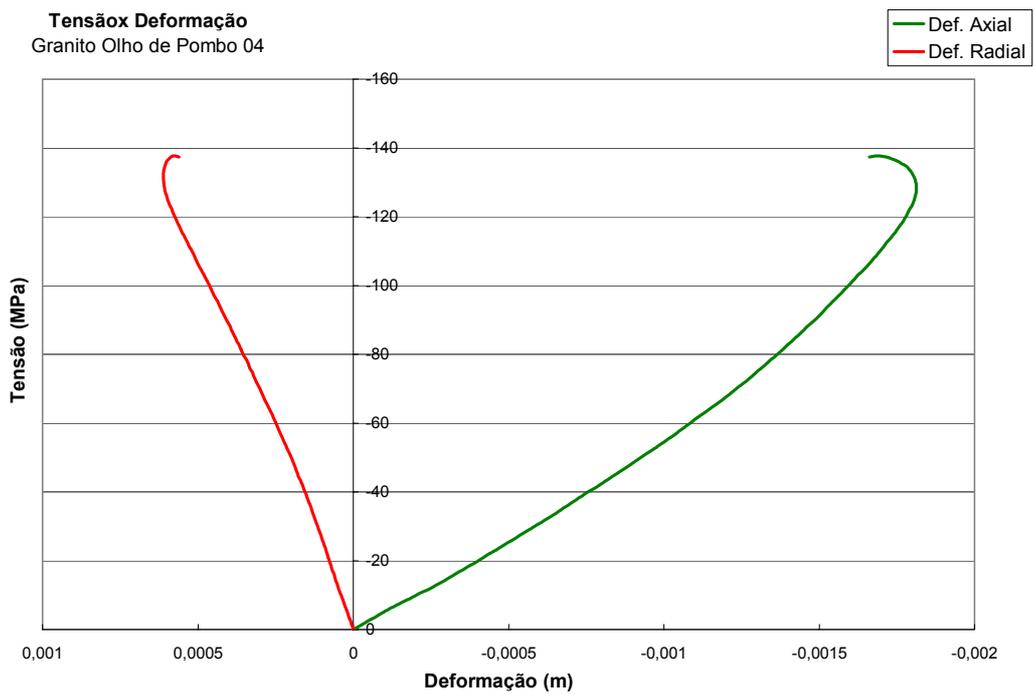
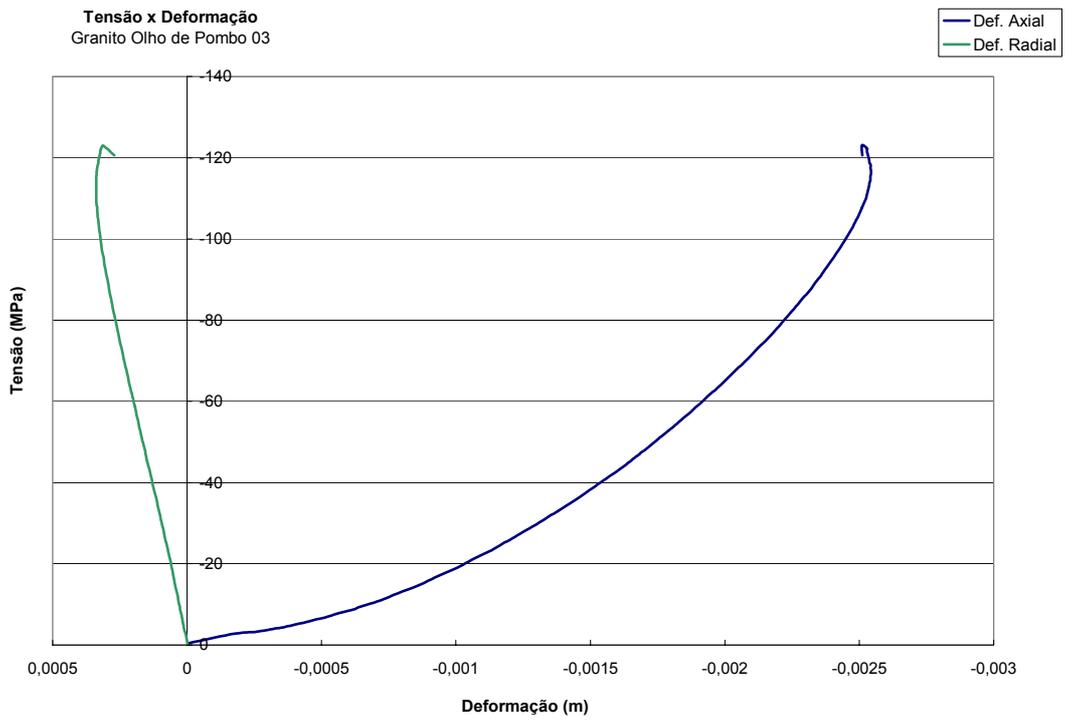
Projeção Estereográfica 17- Orientação dos vetores do talude de corte e das descontinuidades encontradas no maciço da pedra Pedra Madeira (3- família S/03, 4- família S/04 – foliação praticamente coincidente com o talude e 5- talude de corte).



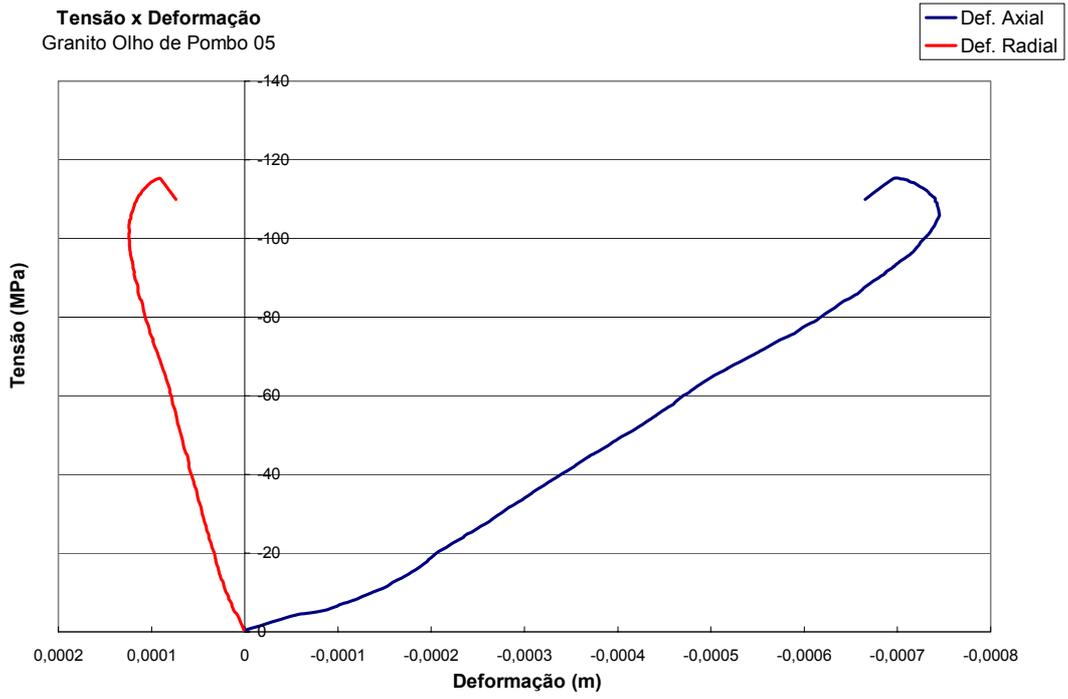
Projeção Estereográfica 18- Concentração dos pólos das descontinuidades encontradas no maciço da pedra Pedra Madeira (3- família S/03, 4- família S/04 de foliação praticamente coincidente com o talude e 5- talude de corte).

**A2: Gráficos Tensão x Deformação obtidos nos ensaios de compressão uniaxial com monitoramento das deformações.**

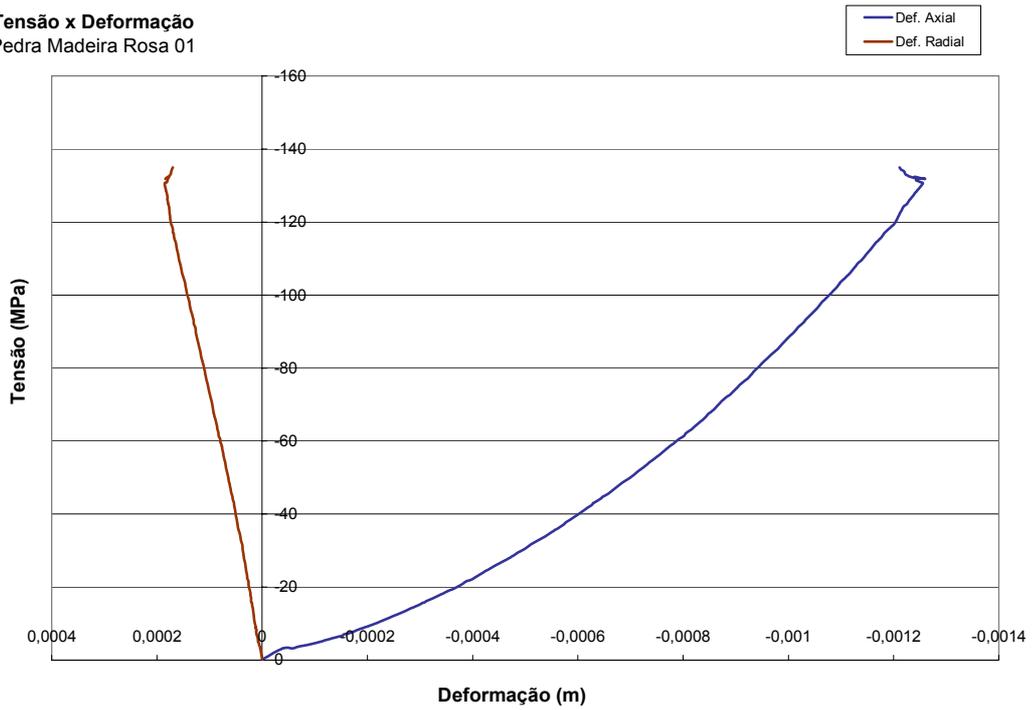




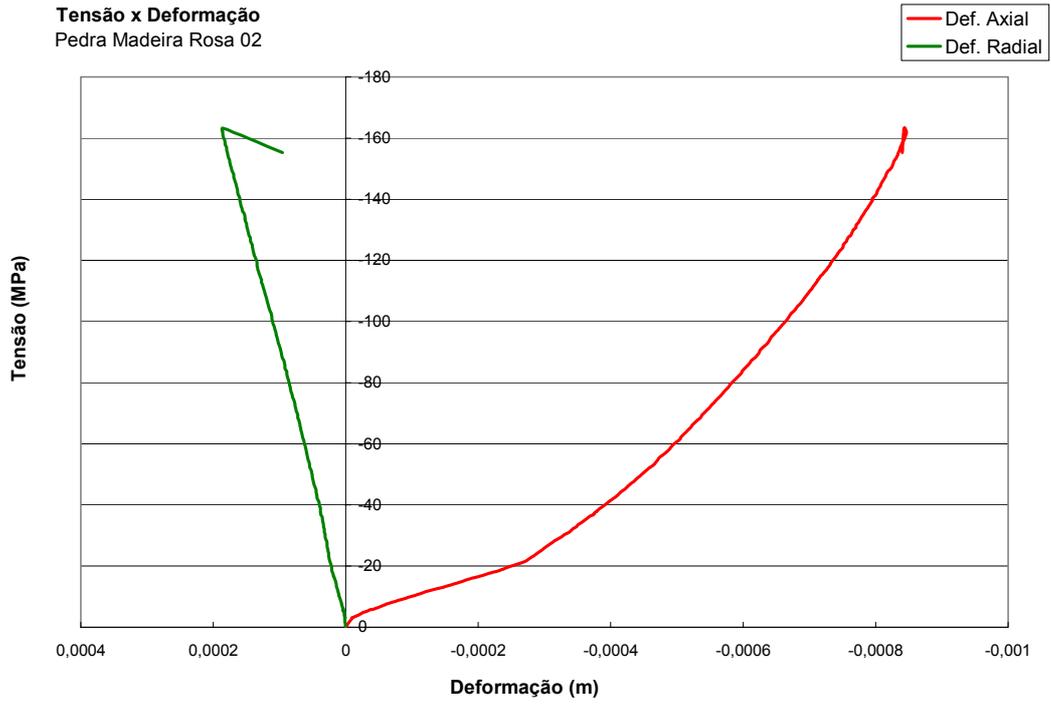
**Tensão x Deformação**  
Granito Olho de Pombo 05



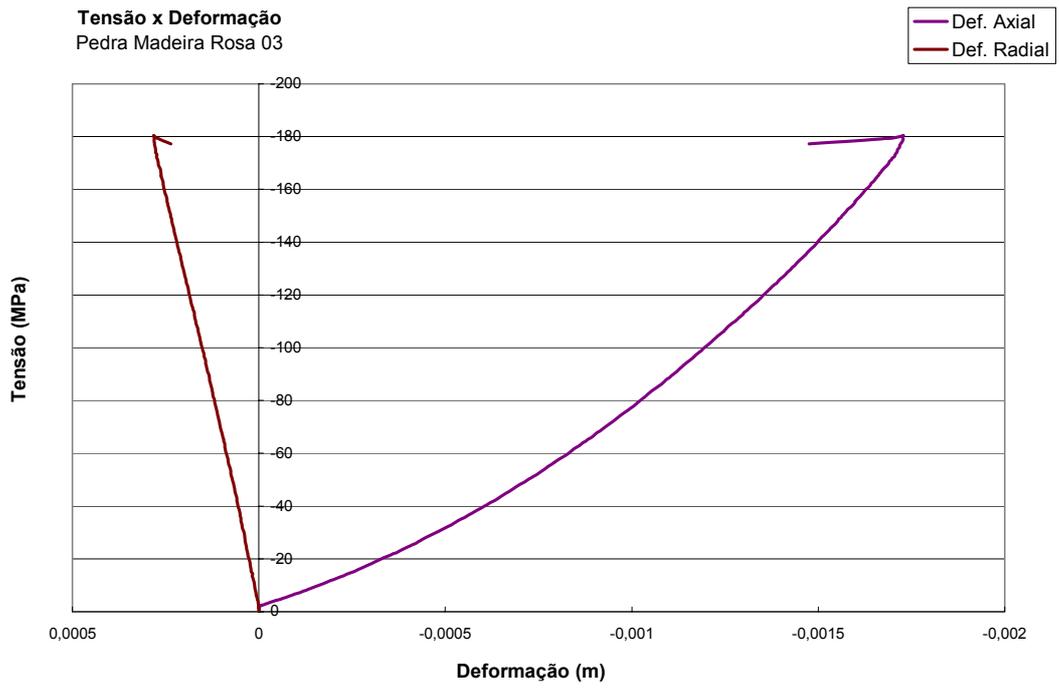
**Tensão x Deformação**  
Pedra Madeira Rosa 01



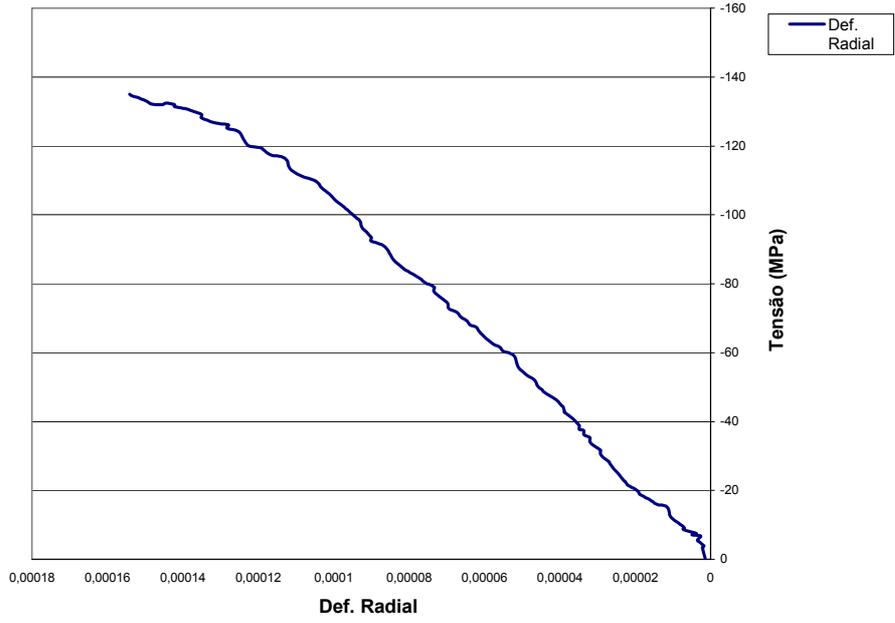
**Tensão x Deformação**  
Pedra Madeira Rosa 02



**Tensão x Deformação**  
Pedra Madeira Rosa 03



Tensão x Deformação  
Pedra Madeira Rosa 04



Tensão x Deformação  
Pedra Madeira Rosa 05

