

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

**ANÁLISE EMPÍRICA DE MACIÇOS ROCHOSOS
PARA ROCHAS COM FINS ORNAMENTAIS**

ALEXANDRE JOSÉ BURIL DE MACÊDO

Campina Grande / PB
1998

ALEXANDRE JOSÉ BURIL DE MACÊDO

**ANÁLISE EMPÍRICA DE MACIÇOS ROCHOSOS PARA ROCHAS COM FINS
ORNAMENTAIS**

Dissertação submetida à Banca Examinadora
do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de
Minas da Universidade Federal da Paraíba,
como requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Engenharia de Minas.

Área de Concentração: Lavra de Minas

Orientador: Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima

Campina Grande / PB
1998



M141a Macêdo, Alexandre José Buril de.
Análise empírica de maciços rochosos para rochas com fins ornamentais / Alexandre José Buril de Macêdo. - Campina Grande, 1998.
217 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1998.
"Orientação : Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima".
Referências.

1. Rochas Ornamentais. 2. Pesquisa Geológica. 3. Geologia Estrutural. 4. Dissertação - Engenharia de Minas. I. Lima, Aarão de Andrade. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 622.35(043)

ALEXANDRE JOSÉ BURIL DE MACÉDO

**ANÁLISE EMPÍRICA DE MACIÇOS PARA ROCHAS COM FINS
ORNAMENTAIS**

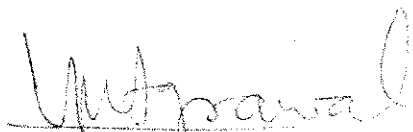
Dissertação defendida e aprovada em 17 de Setembro de 1998



Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima – Orientador
Universidade Federal da Paraíba



Prof. Dr. José Lins Rolim Filho
Universidade Federal de Pernambuco



Prof. Dr. Vishwambhar Nath Agrawal
Universidade Federal da Paraíba

À minha esposa, Elizabete Cristina e aos meus filhos Cristiano, Alessandra e Ricardo, que, além de acreditarem e me incentivarem, souberam, com paciência e perspicácia, compreender diversos momentos de silêncio eloqüente e de frases vazias.

AGRADECIMENTOS

Registre-se o apoio e dedicação de todos os professores que participaram de minha formação, notadamente de meu orientador acadêmico, Prof. Aarão de Andrade Lima.

Agradeço, em especial, ao apoio e dedicação de minha esposa, Elizabete, que sempre me incentivou a perseverar pelos meandros dos caminhos que se apresentaram.

Aos amigos Josenita Ramos de Araújo e Adalberto Monteiro Filho, sempre presentes, que me apoiaram em diversas oportunidades em que se fizeram necessárias.

Agradeço também aos meus Amigos Frederico Hrdlicka e Ademir Matheus, pelo encorajamento e compreensão, respectivamente, ao longo dos últimos três anos.

À Universidade Federal da Paraíba, notadamente ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, que me acolheu e permitiu a realização deste trabalho.

Às Secretárias Maria do Carmelo de M. Coutinho e Maria Eleonora M. Coutinho, que contribuíram em diversos procedimentos administrativos no decorrer do curso.

À CAPES pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
SUMÁRIO	vi
LISTA DE SIGLAS UTILIZADAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
LISTA DE FIGURAS APRESENTADAS	xviii
LISTA DE FOTOS APRESENTADAS	xxiii
LISTA DE TABELAS APRESENTADAS	xxv
RESUMO	xxviii
ABSTRACT	xxix
CAPÍTULO 1	
ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS	
1.1- Introdução	1
1.2- Questões Motivacionais	3
1.3- Objetivos	4
1.4- Justificativa	4
1.5- Estrutura do Trabalho	5

CAPÍTULO 2**ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS DE ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS**

2.1-	Tipos de Rochas	7
	2.1.1- Rochas Ígneas	9
	2.1.1.1- Classificação de Rochas Ígneas	10
	2.1.1.2- Classificação Mineralógica	12
	2.1.2- Rochas Sedimentares	12
	2.1.2.1- Tipos de sedimentos	13
	2.1.2.2- Tamanho de partículas	13
	2.1.2.3- Forma de partícula	14
	2.1.2.4- Rochas sedimentares clásticas	16
	2.1.2.5- Estruturas sedimentares clásticas	16
	2.1.2.6- Rochas sedimentares químicas	17
	2.1.2.7- Rochas sedimentares orgânicas ou biogênicas	18
	2.1.2.8- Minerais em sedimentos	18
	2.1.3- Rochas Metamórficas	20
	2.1.3.1- Classificação de rochas metamórficas	20
2.2-	Geomorfologia Aplicada às Rochas para Fins Ornamentais	23
	2.2.1- Relevos Típicos de Rochas Cristalinas	24
	2.2.2- Relação Relevo e Clima	26
	2.2.3- Comportamento de Corpo Granítico Frente à Erosão	27
2.3-	Associações Geológicas e Regiões Brasileiras Prospectáveis em Rochas para Fins Ornamentais	29

CAPÍTULO 3

PESQUISA, EXPLOTAÇÃO E COMÉRCIO DE ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS

3.1-	Rochas para Fins Ornamentais: Conceitos	38
3.2-	Produção e Aplicação	39
3.3-	Principais Parâmetros	41
3.4-	Aspectos Econômicos	45
3.5-	Rochas para Fins Ornamentais e o Nordeste	46
3.6-	Mercado Internacional	48
3.7-	Brasil e Comércio Exterior	50
3.8-	Aspectos Institucionais	53
3.9-	Fatores de Análise para uma Escavação	55
3.10-	Metodologias Atuais de Pesquisa de Rochas para Fins Ornamentais	60
3.11-	Metodologias de Lavra	68
3.12-	Tecnologias de Exploração	72
3.13-	Tecnologias de Exploração de Granitos e Mármore	74
	3.13.1-Exploração por Escorregamento	74
	3.13.2- Desmonte com Explosivo	75
	3.13.3- Perfuração Contínua	76
	3.13.4- Fraturamento com Aparelhagem Mecânica ou Hidráulica	77
	3.13.5- Corte com Fio Helicoidal	78
	3.13.6- Corte com Fio Diamantado	81
	3.13.7- Corte com Maçarico	84
	3.13.8- Jato D'água	85

3.13.9- Corte com Disco Diamantado	87
3.14- Aplicação de Tecnologia Mista	89

CAPÍTULO 4

TENSÕES NO MACIÇO: ESTIMATIVA E MEDIÇÕES *IN SITU*

4.1-	Estimativa: Introdução	91
4.2-	Variação de Tensões <i>In Situ</i> com a Profundidade	94
4.3-	Modelo de Resistência de Rocha Intacta	96
4.4-	Efeito das Estruturas da Rocha	100
	4.4.1- Efeito da Anisotropia	101
	4.4.2- Efeito de Estratificação	104
	4.4.3- Efeito da Heterogeneidade e de Estruturas Geológicas	105
	4.4.4- Efeito da Topografia	107
	4.4.4.1- Vales e montanhas simétricas sujeitas apenas à gravidade	108
	4.4.4.1.1- Comportamento de tensões em elevações	111
	4.4.4.1.2- Comportamento de tensões em vales	112
	4.4.4.1.3- Efeito do mergulho e grau de anisotropia	113
	4.4.4.1.4- Efeitos da geometria e do relevo	114
	4.4.5- Efeitos da Erosão	114
4.5-	Tensões Tectônicas e Residuais	115
	4.5.1- Tensões Tectônicas	115
	4.5.2- Tensões Residuais	116
4.6-	Estimativa de Existência de Tensões Elevadas	118

4.6.1-	Tensões Horizontais Elevadas	118
4.6.2-	Estimativa de Orientação de Tensão	122
4.7-	Métodos de Medição de Tensões <i>In Situ</i>	123
4.7.1-	Medição de Tensões: Introdução	123
4.7.2-	Métodos de Alívio	125
4.7.2.1-	Métodos de Alívio de Superfície	126
4.7.2.2-	Métodos de Alívio de Furos de Sonda (Recorte)	127
4.7.2.3-	Método de Alívio de Maciço Rochoso	130
4.7.3-	Métodos do Macaco Hidráulico	130
4.7.4-	Métodos Hidráulicos	132
4.7.5-	Método de Recuperação de Deformação	132
4.7.6-	Método de Ruptura de Furos	133
4.7.7-	Outros Métodos	134
4.7.7.1-	Análise de Dados de Falha de Empurrão	134
4.7.7.2-	Mecanismos Focais de Terremotos	134
4.7.7.3-	Métodos Indiretos	135
4.7.8-	Efeito de Escala	135
4.7.9-	Incertezas Quanto ao Melhor Método	136

CAPÍTULO 5

O PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO

5.1-	Resistência, Deformabilidade e Classificação Geomecânica	138
5.2-	A Classificação de Maciços Rochosos	141
5.3-	Os Processos de Classificação	142

5.3.1-	Classificação de Terzaghi	144
5.3.2-	Classificação de Lauffer	144
5.3.3-	Classificação de Deere	145
5.3.4-	Classificação de Wickhan Et Al.	146
5.3.5-	Classificação de Bieniawski	146
5.3.5.1-	Classificação de Laubscher	155
5.3.5.2-	Classificação de Romana	156
5.3.6-	Classificação de Barton et al.	157
5.4-	Estimativa Conjunta de Classificação de Maciços Rochosos e seu Comportamento, Segundo Bieniawski, Laubscher, Romana e Barton	162
5.5-	Correlações e Aplicações do Critério de Ruptura de Hoek-Brown	164
5.6-	Estimativa das Equações do Maciço Rochoso	172

CAPÍTULO 6

OBSERVAÇÕES E PROCEDIMENTOS EM ÁREAS DE ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS

6.1-	Introdução	175
6.2-	Serra da Meruoca - Ceará	176
6.3-	Lagoa D'Anta - Rio Grande do Norte	180
6.4-	Cacerengo - Paraíba	184
6.5-	Batólito de Pocinhos - Paraíba	185
6.6-	Migmatito de Santa Luzia - Paraíba	186
6.7-	Metasedimento de Pedra Branca - Ceará	187

6.8-	Granito da Serra da Barriga - Ceará	188
6.9-	Migmatito de Caracará - Ceará	189

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	190
---	------------

BIBLIOGRAFIA	193
---------------------	------------

APÊNDICE - REGISTRO REGISTROS DE ALGUMAS OBSERVAÇÕES EM ÁREAS VISITADAS	207
--	------------

LISTA DE SIGLAS UTILIZADAS

PB	Paraíba
M.I.A.	Departamento de Geologia Aplicada da Universidade de Istambul
ASTM	American Society for Testing of Materials
PND	Plano Nacional de Desenvolvimento
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
ISRM	International Society for Rock Mechanics
GPR	Ground-Penetrating Radar
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DIN	Deutsche Industrie Normen
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
EE	Exploração por escorregamento
DE	Desmonte a explosivo
PC	Perfuração contínua
PS	Perfuração seqüenciada
PP	Perfuração coplanar e paralela
SP	Cunhas mecânicas ou manuais, sem perfuração
FH	Fio helicoidal
FD	Fio diamantado
SC	Serra a corrente
DD	Disco dentado
CM	Corte a maçarico
JA	Corte com água
AF	Corte com abrasivo ou fio com disco diamantado
URL	Underground Research Laboratories

HTPF	Hydraulic Test on Pre-existing Fracture
ASR	Anelastic Strain Recovery
DSCA	Differential Strain Curve Analysis
NATM	New Australian Tunneling Method
TBM	Tunnel Boring Machine
RSR	Rock Stress Rating
RMR	Rock Mass Rating

LISTA DE SÍMBOLOS

$z_0, z, \Delta z$	Profundidade inicial, de um ponto e espessura de camada de rocha
σ_v	Tensão vertical
γ	Peso específico da rocha
ρ	Densidade da rocha
$\sigma_H, \sigma_h, \sigma_{\text{médio}}$	Tensão horizontal maior, menor e média
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensão principal máxima, média e mínima
$K, K_h, K_H,$ K_x, K_y, K_0	Taxa de tensão
ν, ν'	Relação de Poisson no plano e normal
S_0	Coesão interna; resistência ao cisalhamento
$\phi, \phi_r, \phi_i, \phi^*$	Ângulo de atrito interno, residual, instantâneo, instantâneo
C_0, C_0^*	Resistência compressiva; coesão
$(\sigma_1 - \sigma_3)_c$	Resistência diferencial máxima
σ_3'	Tensão de confinamento efetiva
σ_n	Tensão normal
τ	Tensão de cisalhamento; resistência ao cisalhamento
τ_m	Tensão média de cisalhamento
δ	Ângulo de orientação da junta
E, E'	Módulos de elasticidade no plano (Young) e normal
E'	Módulo de deformação
G'	Módulo de rigidez na normal ao plano
G^*, G	Módulo de rigidez do maciço rochoso e do material intacto
k_n	Módulo de rigidez normal
V_m	Fechamento máximo de uma junta
x, y, z	Sistema de coordenadas globais

n, s, t	Sistema de coordenadas de um plano
ψ	Ângulo de mergulho de um plano relativo às coordenadas globais
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	Deformações normais
ε_t	Deformação constante no tempo
γ_{xy}	Deformação de cisalhamento
h_i	Espessura da i-ésima camada
Φ_i	Relação de altura da i-ésima camada ou da amostra e sua dimensão
L	Dimensão da amostra; comprimento de fraturas
σ_i, σ_{av}	Tensão média
N	Número de elementos justapostos; densidade linear de fraturas
w_i	Largura do i-ésimo elemento
B	Altura de uma elevação
$ b $	Profundidade de um vale
β	Ângulo de direção
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$	Tensões induzidas
σ_{xy}	
σ_{xx}^{∞}	Tensões tectônicas num espaço semi-infinito
η	Função tempo
T	Escala de tempo
σ_r, σ_z	Tensões radial e axial
k_1, k_2 e k_0	Constantes da rocha
S_t	Resistência à tração da rocha
S	Espaçamento de fraturas

α_t, α_j	Ângulos de mergulho do talude (ou da frente) e da junta
$F_i (i = 1,4)$	Fatores de correção de Romana
RMR	Escore de classificação de Bieniawski
RQD	Índice de qualidade de Deere
J_n	Número de família de juntas
J_r	Índice de rugosidade de uma junta
J_a	Grau de alteração ou preenchimento de uma junta
J_w	Índice de presença de água
SRF	Condição de tensão
Q	Escore de classificação de Barton
J_v	Índice volumétrico de Palström
F	Frequência de fraturas
W	Grau de alteração da rocha
σ_c, σ_{cs}	Resistência à compressão simples e do espécime
r e R	Dureza de Schmidt
m	Parâmetro de fraturamento do maciço dos blocos no critério de Hoek-Brown
S	Parâmetro de engastamento dos blocos no critério de Hoek-Brown
σ_t	Resistência à tração uniaxial
I_s	Índice de carga pontual
σ_n	Tensão normal normalizada
τ_n	Tensão de cisalhamento normalizada
σ_{3trans}	Tensão de transição junta-fratura
σ	Tensão normal
T_0^*	Resistência à tração
C_0	Resistência coesiva; intercepção coesiva

LISTA DE FIGURAS APRESENTADAS

Figura 2.1	Ciclo das rochas	9
Figura 2.2	Formas de ocorrência de rochas ígneas	10
Figura 2.3	Classificação mineralógica de rochas ígneas	12
Figura 2.4	Formas de partículas de sedimentos	15
Figura 2.5	Modelo de esfericidade e arredondamento de partículas sedimentares	15
Figura 2.6	Representação de tipos de acamamento de sedimentos	17
Figura 2.7	Modelo de sedimentos inconsolidado e cimentado	19
Figura 2.8	Exemplificação de textura de rochas metamórficas, com destaque a um modelo de rocha com minerais fortemente orientados	21
Figura 2.9	Representação de relevos típicos, de acordo com a gênese das rochas de base	25
Figura 2.10	Comportamento do relevo de acordo com o clima	27
Figura 2.11	Representação de corpo aflorante de granito e suas irregularidades próximas à superfície propiciando processos de intemperismo	28
Figura 2.12	Áreas de atuação de ciclos termotectônicos sobre a plataforma brasileira	32
Figura 2.13	Áreas de exposição do embasamento cristalino brasileiro	33
Figura 2.14	Áreas de coberturas brasileiras	34
Figura 2.15	Áreas potenciais de mármore no Brasil	35
Figura 2.16	Áreas prospectivas para rochas graníticas do Brasil	37
Figura 3.1	Estrutura da cadeia de produção de rochas ornamentais	39
Figura 3.2	Modelo de análise de estabilidade de área	64
Figura 3.3	Interpretação de eventos observados em um perfil de Iragna	65

	Quarry.	
Figura 3.4	Imagem tridimensional, realçando os planos A, B e C	65
Figura 3.5	Interpretação das reflexões verticais e de fraturas sub-horizontais	66
Figura 3.6	Vista tridimensional da superfície do terreno e dos planos de fraturas sub-horizontais e semi-verticais	66
Figura 3.7	Esquema de bancada baixa, destacando-se diferentes direções de orientação das frentes	69
Figura 3.8	Esquema de orientação de bancada baixa, com uma direção de orientação	70
Figura 3.9	Esquema de exploração utilizando grandes bancadas	70
Figura 3.10	Esquema de exploração com bancadas altas	71
Figura 4.1	Representação de tensões verticais de acordo com a profundidade (à esquerda) e variação da taxa de tensão horizontal versus vertical (direita)	95
Figura 4.2	Esquema de falha normal.	98
Figura 4.3	Modelo de falha normal.	98
Figura 4.4	Representação de falha de rejeito direcional.	98
Figura 4.5	Modelo de identificação de falha de rejeito direcional.	99
Figura 4.6	Falha inversa ou de empurrão.	99
Figura 4.7	Modelo de apresentação de falha de empurrão	99
Figura 4.8	Maciço rochoso com fratura regular sujeito a um estado de tensão de eixo simétrico σ_1 e σ_3	100
Figura 4.9	Esquema de maciço anisotrópico com camadas inclinadas e paralelas ao plano P, submetido à gravidade	103
Figura 4.10	Representação de bloco de rocha granítica, para análise de deformações, Stephansson, Ljunggren e Jin.	106

	Deslocamentos de tensões atuantes num modelo de	
Figura 4.11	elementos distintos com três blocos, segundo Stephansson, Ljunggren e Jin	106
	Perfil topográfico de um maciço de topografia complexa	
Figura 4.12	sujeito à gravidade (sem cargas superficiais) e com restrições e deslocamentos	107
Figura 4.13	Esquema de elevação simétrica de altura b	108
Figura 4.14	Representação de vale simétrico de profundidade $ b $	109
Figura 4.15	Trajetórias de contorno de tensão em uma elevação	110
Figura 4.16	Trajetórias de contorno de tensão num vale	110
Figura 4.17	Contorno de $\sigma_1 / \rho.g. b $	110
Figura 4.18	Contorno de $\sigma_2 / \rho.g. b $ numa elevação	111
Figura 4.19	Contorno de $\sigma_1 / \rho.g. b $ num vale	112
Figura 4.20	Contorno de $\sigma_2 / \rho.g. b $ num vale	112
Figura 4.21	Forças responsáveis por tensões tectônicas, Zoback et al.	116
Figura 4.22	Três tipos de testemunhos recuperados	119
	Exemplos típicos de testemunhos recuperados em forma de	
Figura 4.23	discos com diâmetros de 115 mm (a); discos de 54 mm (b); e, anéis de 75 e 115 mm de diâmetro (c)	119
	Comparação entre o estado de tensão medido em três furos	
Figura 4.24	de sonda e baseado no critério de Obert-Stephenson, onde a componente radial de tensão é calculada da relação $\sigma_r = (\sigma_x + \sigma_y) / 2$.	121
	Comparação entre o estado de tensão medido em três furos	
Figura 4.25	de sonda e baseado no critério teórico de Sugawara et al., que é normalizado pela resistência à tração	121
	Croquis representativo de uma seção de rocha e seus pontos	
Figura 4.26	de instrumentação (dimensões estão em metro)	127

Figura 4.27	Modelo de desenvolvimento do método de recorte	128
Figura 4.28	Padrão de procedimento de acordo com a análise de alívio de deformações	129
Figura 4.29	Modelo de macaco hidráulico utilizado por Merrill, 1964	131
Figura 4.30	Representação do desenvolvimento progressivo do processo de fechamento de um furo de sonda	133
Figura 4.31	Variação de módulo de elasticidade encontrada ao longo de 5 metros de uma sondagem em rocha granítica	136
Figura 4.32	Variações aleatórias de medidas de tensões principais ao longo de um furo de sonda de ± 22 m, feito em condições uniformes de um leptito	137
Figura 5.1	Diagrama de Mohr	140
Figura 5.2	Escore de rocha intacta, relativo à resistência do material	149
Figura 5.3	Índice de acordo com o espaçamento da principal família de fraturas	150
Figura 5.4	Definição do escore relativo ao RQD	152
Figura 5.5	Escore de espaçamentos, segundo Laubscher	155
Figura 5.6	Representação de índice de rugosidade, através de perfis de paredes de juntas	159
Figura 5.7	Aplicação do critério de Hoek-Brown, segundo Barton	164
Figura 5.8	Relação dos parâmetros m e s , relativos ao RMR correspondente	167
Figura 5.9	Parâmetros de resistência, calculados e medidos, de acordo com o escore do maciço	167
Figura 5.10	Diagrama de Mohr onde tem-se a representação gráfica das condições de tensão para a rocha intacta	169
Figura 5.11	Representação gráfica da relação entre as tensões principais associadas ao processo de ruptura da rocha	169

Figura 5.12	Representação das equações empíricas de deformação	172
Figura 5.13	Correlação entre módulos de deformação, baseados em escores RMR e Q	173
Figura 6.1	Mapa topográfico da Serra da Meruoca	177
Figura 6.2	Croquis esquemático do afloramento de Lagoa D'Anta	181
Figura 6.3	Perfis esquemáticos do corpo posicionando as lineações da rocha e o desenvolvimento das fraturas pré-existentes e induzida pelo alívio de tensões	181
Figura 6.4	Mapa geológico-estrutural da área de Lagoa D'Anta	182

LISTA DE FOTOS APRESENTADAS

Foto 3.1	Vista geral de lavras, em meia encosta, efetuadas em níveis múltiplos de extração	79
Foto 3.2	Detalhe de duas bancadas altas, onde, além do desmonte primário é destacado o serviço de desbaste de blocos	79
Foto 3.3	Vista de poço para instalação de desvio de fio helicoidal e (roldana fixa), tendo ao fundo água para resfriamento e distribuição da polpa de granalha	80
Foto 3.4	Praça de trabalho com conjugação de métodos de perfuração contínua com fio helicoidal	80
Foto 3.5	Execução de corte em maciço, destacando-se a alimentação de água para resfriamento do fio	82
Foto 3.6	Corte executado, destacando-se as superfícies dos planos vertical e horizontal cortados a fio diamantado	83
Foto 3.7	Conjugação de técnicas: fio diamantado + perfuração contínua	83
Foto 3.8	Uso de talha-blocos e cunha pneumática de desmonte, além de desbaste de bloco semi-acabado.	84
Apêndice A-1	Lavra do Granito Verde Meruoca	207
Apêndice A-2	Lavra de matacão – Granito Meruoca Clássico	208
Apêndice A-3	Lavra de campo de matacões (Verde Ventura)	208
Apêndice A-4	Registro do principal problema da lavra de matacões	209
Apêndice A-5	Propagação de fratura (Lagoa D'Anta)	210
Apêndice A-6	Parte de serviço de tentativa de horizontalizar as praças	210
Apêndice A-7	Matacões como indicadores de sistema de juntas	211
Apêndice A-8	Fratura de alívio em um matacão	211
Apêndice A-9	Corte conchoidal em rocha isotrópica (Pocinhos)	212

Apêndice A-10	Feições auxiliares na orientação do planejamento da lavra	212
Apêndice A-11	Inclusões dispersas em afloramento de migmatito (Santa Luzia)	213
Apêndice A-12	Aspecto de xenólito em face de corte	213
Apêndice A-13	Feição ondulada por interseção de planos de veio de muscovita e superfície	214
Apêndice A-14	Corte evidenciando veios pegmatíticos, feição de superfície e resquício de plano de fratura de alívio	214
Apêndice A-15	Superfície suave de matacão que está sendo lavrado (Serra da Barriga)	215
Apêndice A-16	Formação de repé por deficiência operacional e superfície de alívio	215
Apêndice A-17	Destaque a bolsões de paleossoma e sistemas de descontinuidades em migmatito (Caracará)	216
Apêndice A-18	Evidencia-se fraturas, veios de feldspato e solo típico de migmatito	216
Apêndice A-19	Corte efetuado com maçarico e direções dos planos de partição	217

RESUMO

Com a abertura comercial ocorrida em 1990 houve possibilidade de importação de equipamentos e insumos que influenciaram o grande salto qualitativo que o setor de rochas ornamentais realizou, visando consolidar a participação do País no mercado internacional

O Nordeste, principalmente na região do semi-árido dispõe de uma vasta exposição do embasamento cristalino, apresentando um grande potencial de produção. Apesar dos progressos conseguidos, e de se dispor de mais de uma centena de produtos catalogados para exportação, o seu desempenho tem declinado, passando, no ano de 1996, de quinto para sétimo lugar na carteira de comercialização internacional, tendo sido suplantado por Portugal e África do Sul. Nosso trabalho objetiva sugerir uma conduta técnica para análise empírica de maciços rochosos voltados ao setor de pedras de revestimento, analisando-se seus aspectos genéricos, podendo servir de base para um sistema de exploração mais racional para a atividade, através de três vertentes de características: geologia regional e geomorfologia; composição mineral e petrografia; e, geotecnia do maciço rochoso.

A metodologia consistiu no levantamento bibliográfico e de observações de campo. Com isto, conseguiu-se: definir a situação atual do setor produtivo de blocos brutos no País; abordar princípios sobre estimativa e medição de tensões *in situ*; avaliar processos de classificação de maciços para fins de rochas ornamentais; e observar feições referentes aos aspectos geológico e sobre o campo de tensões em oito áreas visitadas.

Ficou definido que dados bibliográficos sobre geologia estrutural, execução de análises petrográficas em amostras orientadas, análise de feições topográficas, bem como técnicas de análise de testemunhos de sondagem, devem ser utilizadas já na fase inicial de prospecção, com vistas ao planejamento da exploração.

Também conseguiu-se identificar que os sistemas de classificação devem ser aplicados com a devida ressalva ao índice RQD (quase sempre igual a 100 para rochas ornamentais), o que não invalida a aplicação do critério de ruptura de Hoek e Brown, para fazer estimativa do campo de tensão *in situ* que o maciço pode suportar; afora a utilidade do escore de espaçamento de Laubscher sobre a estimativa do tamanho médio dos blocos desde a fase inicial do projeto.

As conclusões incluem algumas recomendações de ordem prática que podem ser aplicadas para pesquisa geológica de diferentes tipos genéticos de granitos de uso ornamental.

ABSTRACT

The liberalization of international trade which was implemented by the Brazilian government in 1990 made possible to import sophisticated equipment for the ornamental stones industry. That fact had a positive influence helping the country to become an important player in the international market of the ornamental stone economic sector.

The Northeast region, mainly in its dry portion, has a large exposure of crystalline pre Cambrian rock, which has great potential for production of dimension stone granitic rocks. At present, important progress has been achieved in the ornamental rock industrial sector, and there are more than a hundred different types of rocks of commercial value for exporting already cataloged. In spite of that, the overall performance of Brazil in the international market has decreased to seventh in rank, having the country been surpassed by Portugal and South Africa.

This research has the objective of suggesting technical procedures for the empirical analysis of rock masses suited for the extraction of covering stones. Generic aspects are treated in the search of more rational quarrying methods, with emphasis in the following characteristics: regional geology and geomorphology; mineral and petrographic aspects; and geotechnical characterization of the rock mass.

The methodology adopted consisted in bibliographic survey and field observations. It has been possible to define the present situation of the sector of rock blocks from the commercial and economic points of view; principles and techniques for estimating in situ stresses; evaluation of methods for rock mass classification oriented to ornamental rock; observation of geologic aspects and state of stresses at eight quarries.

In order to prepare quarrying plans it has been concluded that the following sources of information should be used during the early stages of prospecting: analysis of previous works about the structural geology of the region; petrographic study in oriented rocks; analysis of topographic characteristics of the area; and analysis of rock cores.

It has also been observed that rock mass classification systems oriented to dimension stones should use RQD index with caution, since it is generally equal to 100 in that case, and that Hoek-Brown failure criteria is useful in establishing the maximum limit of stress that the rock mass can withstand. The usefulness of Laubsher classification system in estimating the mean size of blocks is highlighted.

The final conclusions include recommendations of practical procedures, which may be adopted for geologic exploration of dimension stone granitic rocks, according to their different genetic types.

CAPÍTULO 1

ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS

1.1- Introdução

✓ Rochas para fins ornamentais, ou de revestimento, são todos os materiais que respondem ao polimento e lustro, podendo pertencer geneticamente às rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares, sendo utilizadas em revestimentos de pisos e fachadas, arte funerária e obras de arte.

Seus principais atributos são a aparência, resistências, durabilidade e trabalhabilidade, que devem ser definidos na fase de avaliação do depósito, ou pesquisa mineral. ^{Durabilidade} Esta consiste em quantificar e qualificar o material existente, através de mapeamento geológico preliminar; detalhamento geológico e estrutural do corpo; amostragens para ensaios laboratoriais e posterior campanha de sondagem para verificar o comportamento geotécnico e a homogeneidade do material em profundidade.

De acordo com Diehl et al. (1996) o modelo de análise de uma ocorrência de rocha para uso ornamental, seguido internacionalmente, consiste em se definir os planos de partição do maciço rochoso; a textura e estrutura da rocha e seus parâmetros estéticos em termos de cor e brilho.

No Brasil o dispositivo institucional de "guia de utilização", existente no Regulamento do Código de Mineração, tem possibilitado que as empresas atuantes no setor iniciem o processo de extração (e comercialização) nas fases iniciais do processo administrativo. Este fato tem catalisado a prática de lavras completamente empíricas, sem conhecimento dos parâmetros litológicos e geoestruturais. As empresas melhor estruturadas e participantes do comércio exterior tem desenvolvido um trabalho mais próximo dos procedimentos internacionais, conforme citado anteriormente.

Contudo, para conceituar completamente uma rocha para uso ornamental, necessita-se de informações conjuntas quanto a:

1. Aspecto estético – definir sua cor (e variações), desenho, transparência, homogeneidade e brilho.
2. Caracterização mínero-petrográfica – analisar, em amostra de mão e em escala de afloramento, o tamanho dos grãos cristalinos, a composição mineralógica, a presença de minerais deletérios, a textura da rocha e estrutura do maciço, e as condições de alteração dos cristais.
3. Características físicas da rocha – analisar as resistências à compressão, flexão e ao desgaste por abrasão, definir seus índices físicos e realizar testes de dilatação térmica e alterabilidade.
4. Características geológicas – definir o tipo de rocha, seu modo de ocorrência, modelo do sistema de descontinuidades, as condições de estabilidade locais e o estado de tensão *in situ*.
5. Conceituação da lavra – planejar os planos de corte e recuperação da mina, além de dimensionar os equipamentos, praças, bota-fora, etc.
6. Características mercadológicas – analisar a infra-estrutura disponível, o mercado alvo, a existência de materiais similares, definir o custo de extração e o limite de preço de comercialização.

Sendo assim, existe uma lacuna entre a metodologia aplicada e as exigências para se conceituar uma rocha para uso ornamental, desde a fase preliminar de detalhamento de uma ocorrência. Esta lacuna pode ser preenchida futuramente por um critério que aborde, de forma conjunta, todos os parâmetros envolvidos, servindo-se também de base para comparar diferentes opções de empreendimentos do setor: um sistema de classificação de maciços rochosos para rochas para fins ornamentais.

1.2- Questões Motivacionais

Nossa atuação, a partir de 1981, em consultoria de projetos e obras permitiu-nos uma visão sobre o estágio de desenvolvimento tecnológico das explorações e acompanhar a aplicação de técnicas de corte contínuo, mais precisamente o uso do fio diamantado, inicialmente para mármore e a seguir para rochas graníticas.

O Brasil tem um importante papel no cenário internacional de rochas para fins ornamentais, mas sua participação está muito aquém de seu vasto potencial, haja visto que no início dos anos 90 o País já dispunha de mais de 150 materiais diferentes catalogados para exportação.

✓ Por outro lado, em todo País, principalmente em regiões de dobramentos, existem exposições de faixas antigas do embasamento cristalino, faixas de reativação plataformal e bacias intracratônicas onde ocorrem os denominados granitos movimentados (gnaisse-migmatitos), granitos negros e mármore, respectivamente, que apresentam, a grosso modo, um intenso fraturamento devido aos eventos tectônicos que se sucederam à sua formação.

No Nordeste, excetuando-se a área de cobertura sedimentar fanerozóica, que recobre os Estados do Maranhão e Piauí, nos outros, do Ceará até a Bahia, existem extensas áreas de exposição do embasamento cristalino que apresentam enorme potencialidade em produzir rochas para fins ornamentais, com reflexos e impactos positivos para a zona semi-árida que tem regime de chuvas em período curto e bem definido, o que para algumas atividades antrópicas é um problema, passa a ser mais um atrativo para a atividade de mineração a céu aberto.

Há uma carência técnica de adaptabilidade de tecnologia externa às rochas nacionais, o que só pode ser saneado, ou minimizado, com a evolução de processos tecnológicos elaborados com base nas condições locais.

1.3- Objetivos

O objetivo principal do trabalho é sugerir uma conduta técnica para análise empírica de maciços rochosos para aplicação em rochas para fins ornamentais. Trata-se de um instrumento, que agrupa dados e observações aplicáveis nas fases de prospecção, pesquisa, desenvolvimento e lavra, através de elementos de análises mineralógica, petrográfica, geomorfológica e geológica.

Secundariamente, sua aplicação desde a fase de prospecção permite uma visão mais objetiva dos resultados de estudos e levantamentos, convergindo à otimização de investimentos necessários em base mais técnica e menos empírica.

1.4- Justificativa

No Brasil não há formação de mão-de-obra própria e divulgação de metodologias específicas para pesquisa e exploração de pedras naturais, apesar de seu potencial. Prospecção, pesquisa e desenvolvimento, quando realizados, são efetuados em conformidade com os modelos aplicáveis às análises de não-metálicos, resultando em trabalhos inconsistentes e que não abordam pontos de destaque à atividade: a classificação dos materiais em conformidade com as exigências técnicas e mercadológicas.

Todavia, as particularidades da lavra de rochas para fins ornamentais, relativas ao índice de qualidade da rocha, resistências físico-mecânicas dos materiais, índices físicos e comportamento estrutural do maciço rochoso inviabilizam a utilização direta dos modelos de análises existentes.

1.5- Estrutura do Trabalho

Como o estudo necessita abordar aspectos gerais e geotécnicos de maciços rochosos que se destinam a produzir rochas com fins ornamentais, estruturou-se o trabalho em sete capítulos:

- Capítulo 1 – ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS - faz a apresentação geral do trabalho, através de uma abordagem concisa sobre sua justificativa, objetivos e metodologia aplicadas.
- Capítulo 2 – ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS DE ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS – consubstancia informações preliminares indispensáveis à realização de prospecção de jazimentos de rochas para fins ornamentais, com ênfase aos granitos e mármore.
- Capítulo 3 – PESQUISA, EXPLOTAÇÃO E COMÉRCIO DE ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS - traz uma apresentação geral do setor, consistindo de aspectos mercadológicos; institucionais; metodologias de pesquisa e lavra; e tecnologias de exploração.
- Capítulo 4 – TENSÕES NO MACIÇO: ESTIMATIVA E MEDIÇÕES *IN SITU* – inicia com a abordagem dos reflexos das tensões sobre as estruturas da rocha; classifica os tipos de tensões e apresenta formas de se estimar a existência de tensões elevadas; seguidos de uma compilação dos métodos de medição de tensões, com ênfase aos aplicáveis a afloramentos de rochas.
- Capítulo 5 – O PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS – faz uma apresentação cronológica dos sistemas de classificação de maciços rochosos, fazendo menção aos principais critérios em uso, e com destaque aos pontos que não estão de acordo com a lavra de rochas para fins ornamentais, abordando também um modelo de estimativa do estado de tensão, a partir da classificação de Bieniawski.

- Capítulo 6 – PROCEDIMENTOS EM ÁREAS DE ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS – traz uma análise sobre algumas atividades em áreas do Ceará (Serra da Meruoca, Serra da Pedra Branca, Serra do Barriga e Caracará), Rio Grande do Norte (Lagoa D'Anta) e Paraíba (Serra do Cacerengo, Pocinhos e Santa Luzia).
- Capítulo 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS – apresenta as conclusões resultantes das pesquisas realizadas e algumas sugestões sobre futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2-

ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOMORFOLÓGICOS DE ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS

Com a finalidade de abordar-se uma metodologia de procedimentos que o técnico deve proceder para analisar uma rocha para uso ornamental, apresentam-se alguns conceitos e conhecimentos que servem de base nas fases de prospecção e avaliação de um corpo rochoso, através de informações geológicas e geomorfológicas específicas.

2.1- Tipos de Rochas

Rocha é um conjunto de minerais em seu estado natural, que pode se apresentar consolidado ou inconsolidado, sendo caracterizada pela sua gênese, constituintes minerais, propriedades físicas, químicas e geomecânicas.

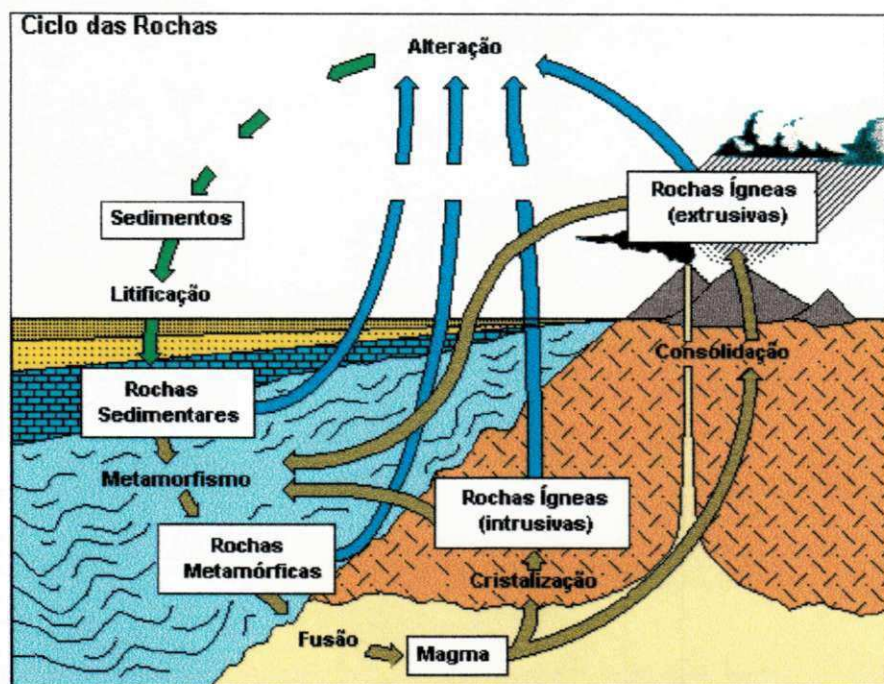
Existem três principais grupos de rochas: ígneas, sedimentares e metamórficas:

- Rochas Ígneas – geradas pela fusão e cristalização de um agregado de materiais denominado magma, englobando substâncias nas fases sólida, líquida e gasosa, que quando atinge a superfície resulta em rochas ígneas extrusivas e quando resfria em profundidade no interior da terra são denominadas de rochas ígneas intrusivas. Se estas rochas formam grandes corpos denominam-se de plútons ou batólitos.
- Rochas Sedimentares – são formadas em camadas depositadas através de vento, água e gelo, que constituem os principais agentes de processos de erosão. As camadas são compactadas e cimentadas, ou seja, litificadas.

- Rochas Metamórficas – são aquelas formadas a partir de rochas preexistentes, através da ação de pressão, temperatura e dos fluidos existentes no interior da terra. Os minerais são deformados, às vezes alterados e se recristalizam sob condições específicas de temperatura e pressão, formando uma outra rocha que pode apresentar a mesma composição da original, mas com características e propriedades diferentes.

Estes grupos de rochas fazem parte do denominado "ciclo da rocha" (Figura 2.1):

1. O magma, constituído de uma mistura de silicatos permanece em estado semi-fluido devido às elevadas temperaturas proporcionadas pelos materiais radioativos e pressão reinantes no interior da crosta.
2. A cristalização do magma forma corpos de rochas ígneas intrusivas ou extrusivas.
3. Alteração é o processo de quebra de rochas da superfície por ação de agentes de erosão. O vento, água e gelo também são agentes de transporte de partículas de rocha em suspensão e solução.
4. A deposição em que as partículas suspensas e/ou em solução formam camadas de sedimentos. As camadas subjacentes são compactadas e cimentadas, formando as rochas sedimentares (processo denominado de litificação).
5. O metamorfismo é um processo de sub-superfície que incide sobre rochas sedimentares ou ígneas, através de seus agentes: temperatura, pressão e fluidos.
6. Quando as rochas metamórficas entram em contato com o magma, tornam a fundir e fazer parte constituinte deste, reiniciando um ciclo de milhões de anos.



(Fonte: Pipkin, B. W. - 1997)

Figura 2.1- Ciclo das rochas

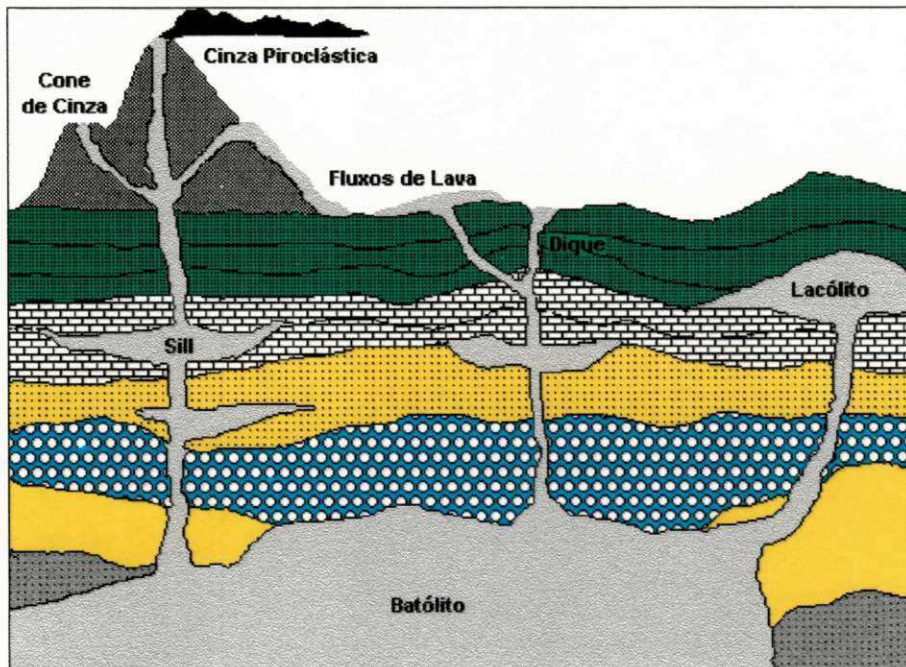
2.1.1- Rochas Ígneas

Tanto as rochas ígneas intrusivas como as extrusivas podem se apresentar sob diversas formas, conforme descrição abaixo e ilustrado na Figura 2.2:

De acordo com a posição do corpo rochosos tem-se:

- Rochas Intrusivas:
 - diques – corpos verticais ou fortemente inclinadas;
 - sills – capa da rocha magmática se apresenta horizontalizada;
 - lacólito – quando a lapa da rocha é horizontalizada (forma de cogumelo);
 - batólito – grandes corpos cristalinos.

- Rochas Extrusivas:
 - cone de cinzas – elevação resultante da acumulação de cinza vulcânica;
 - cinza piroclástica – material que expelido e que compõe uma nuvem de fragmentos;
 - fluxo de lava, ou derrame – material que flui formando caudais de lava.



(Fonte: Pipkin, B. W. - 1997)

Figura 2.2- Formas de ocorrência de rochas ígneas

2.1.1.1- Classificação de rochas ígneas

As rochas ígneas são classificadas segundo três fatores distintos (Pipkin, 1997): forma de ocorrência (Tabela 2.1); textura e tamanho do grão (Tabela 2.2); conteúdo de sílica e composição mineral (Tabela 2.3).

Tabela 2.1- Forma de Ocorrência

Forma de Ocorrência	Descrição
Intrusiva	Usualmente apresenta grãos médios a grandes, devido ao resfriamento lento. Tipicamente leucocrática.
Extrusiva	Podem apresentar textura vítrea ou grãos finos, devido ao rápido resfriamento. Tipicamente melanocrática.

Tabela 2.2- Textura e Tamanho do Grão

Textura	Tamanho do grão
Vítrea	Não há presença de cristais
Afanítica	Grãos finos, cristais < 2 mm
Fanerítica	Grãos grandes, cristais > 2 mm
Pegmatítica	Grãos muito grandes, cristais > 10 mm
Porfírica	Alguns cristais grandes (fenocristais) dentro de uma matriz fina
Vesicular	Presença de vazios criados por gases
Amigdaloidal	Quando os vazios criados por gases encontram-se preenchidos

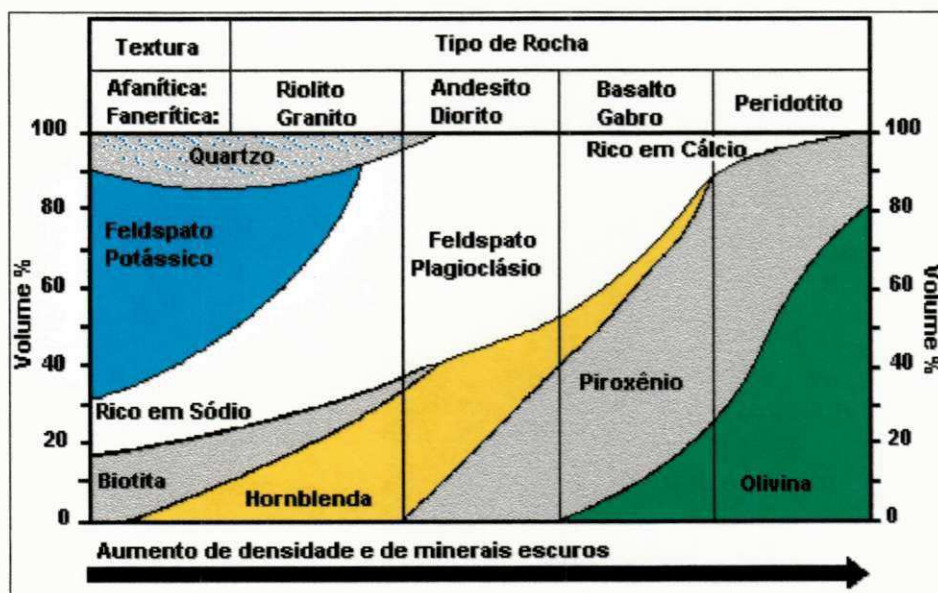
Tabela 2.3- Conteúdo de Sílica e Composição Mineral (em peso)

Conteúdo de Sílica	Composição Mineral
Rochas Ácidas	Ricas em sílica, > 65%, compostas principalmente de minerais claros ou félsicos (quartzo, feldspatos, etc.).
Rochas Intermediárias	A sílica varia de 50 a 65%, compostas principalmente por plagioclásio, pouco quartzo e alguns minerais máficos.
Rochas Básicas	Pobre em sílica (<50%), contém presença significativa de minerais máficos ou minerais ferromagnesianos (olivinas, piroxênios, anfibólios, micas).

2.1.1.2- Classificação mineralógica

A nomenclatura usual para se designar os nomes das rochas está baseada na textura e mineralogia de sua composição. Do ponto de vista de acidez (da mais ácida à mais básica), as rochas intrusivas são: granito, diorito e gabro. Seus similares extrusivos são riolito, andesito e basalto, respectivamente.

Os nomes restantes são aplicados às rochas ultrabásicas, com pouquíssima sílica: peridotito (25 a 80% de olivina), piroxenito (rico em piroxênio) e anortosito (rico em feldspato plagioclásio), Figura 2.3.



(Fonte: Pipkin, B. W. - 1997)

Figura 2.3- Classificação mineralógica de rochas ígneas

2.1.2- Rochas Sedimentares

Este grupo de rochas são identificadas e classificadas segundo o tipo de sedimento que lhe deu origem; tamanho, forma e composição mineralógica de partículas constituintes, condição de compactação e, porosidade e estágio de cimentação. Elas são produto de intemperismo e erosão que quebram rochas preexistentes através de processos físicos e químicos.

As características de um sedimento são determinadas pela intensidade do intemperismo e a distância de transporte.

Para nossa finalidade as informações conduzem a trazer os necessários instrumentos a identificação de arenitos, ardósias, travertinos e calcários.

2.1.2.1- Tipos de sedimentos

Os sedimentos são subdivididos em três tipos, de acordo com a sua origem:

- Clásticos, ou detríticos: compreendem de partículas de tamanhos variados, mantidas em suspensão pelos agentes de transporte.
- Químicos, ou sedimentos precipitados: são transportados em solução aquosa.
- Orgânicos, ou sedimentos biogênicos: são aqueles que são precipitados ou acumulados por agentes biológicos (alguns organismos promovem a precipitação da calcita para formar as margas calcáreas).

2.1.2.2- Tamanho de partículas

O tamanho de partículas é um fator determinante e está correlacionado com algumas propriedades físicas importantes da rocha: resistência, permeabilidade, densidade, etc. Também determina o nome do tipo de rocha sedimentar para os clásticos, Tabela 2.4.

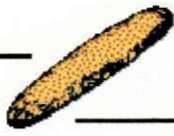






Tabela 2.4- Classificação de Rochas Conforme Diâmetro de Grãos, Segundo Pipkin, B. W. - 1997.

Diâmetro de Partículas (mm)	Nome	Tipo de Rocha Clástica
> 256	Matacão	Conglomerado muito grande
64 – 256	Seixos	Conglomerado grosseiro
2 – 64	Cascalho	conglomerado
0,6 – 2	areia grossa	arenito grosseiro
0,2 – 0,6	areia média	arenito médio
0,06 – 0,2	areia fina	arenito fino
0,002 – 0,06	silte	siltito
< 0,002	argila	argilito

2.1.2.3- Forma da partícula

É uma propriedade importante para os sedimentos detríticos, pois as formas iniciais das partículas dizem respeito aos aspectos mineralógicos da rocha intemperizada: as micas resultam em sedimentos placosos; os feldspatos apresentam formas tabulares; o quartzo tende a formatos regulares e angulosos. Partículas de formas elipsoidais, cilíndricas e esféricas são geradas por processos de abrasão, devido ao transporte.












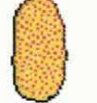
Com o aumento das distâncias de transporte, as partículas são trituradas e arredondadas, sendo a água no estado líquido o meio de transporte mais efetivo na geração de grãos arredondados ou mesmo esféricos. O gelo é um agente de transporte que tem como características cobrir grandes distâncias inferindo pouca ou nenhuma abrasão durante o processo, Figura 2.4.

Térmo	Forma
Cilíndrico	
Discoidal	
Esférico	
Tabular	
Elipsoidal	
Comum	
Irregular	

(Fonte: Pipkin, B. W. - 1997)

Figura 2.4- Formas de partículas de sedimentos

A resistência mecânica do meio granular resulta do atrito entre as partículas. Em geral, partículas angulares e com baixa esfericidade tendem a gerar mais atrito que as partículas arredondadas. Por outro lado, partículas arredondadas ou esféricas propiciam a geração de sedimentos mais densos, sendo qualificadas conforme esboço na Figura 2.5.

	Esfericidade			Arredondamento		
Alta Esfericidade						
Baixa Esfericidade						
	Muito Angular	Angular	Sub-Angular	Sub-Arredondado	Arredondado	Bem Arredondado

(Fonte: Pipkin, B. W. - 1997)

Figura 2.5- Modelo de esfericidade e arredondamento de partículas sedimentares.

2.1.2.4- Rochas sedimentares clásticas

São classificadas de acordo com o tamanho dos grãos das partículas ou clastos, que são cimentados na formação da rocha, Tabela 2.5.

Tabela 2.5- Classificação de Rochas Sedimentares Segundo Tipo e Descrição de Sedimentos, Pipkin, B. W. - 1997.

Sedimento	Descrição	Nome da Rocha
Cascalho	fragmentos de rocha arredondados	Conglomerado
Cascalho	fragmentos de rocha angulares	Brecha
Areia	quartzo é o mineral predominante, com grãos visíveis, camadas geralmente espessas, estrutura deposicional comum é acamamento cruzado	Arenito
Areia	arenito com mais de 25% de grãos de feldspatos	Arcóseo
Silte	predomina o quartzo, grãos dificilmente visíveis, arenoso identificável ao tato.	Siltito
Argila	camadas com espessuras maiores que 1 cm, presença de lama fina, sem partículas discerníveis, composta predominantemente de minerais argilosos e quartzo finíssimo	Ardósia
Argila	argilito laminado, físsil, planos de separação entre camadas	Folhelho

A resistência do material cimentante imprime uma característica importante a estas rochas sedimentares: arenitos quartzosos bem cimentados podem ter boa resistência mecânica, enquanto os friáveis são rochas frágeis. Siltitos, ardósias e folhelos são geralmente rochas frágeis devido à predominância de minerais placosos que imprimem pouca resistência ao atrito.

2.1.2.5- Estruturas sedimentares clásticas

Os sedimentos clásticos podem apresentar uma variedade de estruturas de camadas dependendo do ambiente de sua deposição, Figura 2.6.

2.1.2.7- Rochas sedimentares orgânicas ou biogênicas

Tem sua gênese a partir de processos biológicos, podendo ser resultante da acumulação clástica de esqueletos de animais (alguns calcários, diatomitos), precipitados catalisados biologicamente (algumas rochas que contêm ferro), acumulações de detritos de plantas (carvões), ou produtos de alteração de organismos silicosos (sílex), Tabela 2.7.

Tabela 2.7- Descrição de Algumas Rochas Sedimentares Biogênicas, Segundo Pipkin, B. W. -1997.

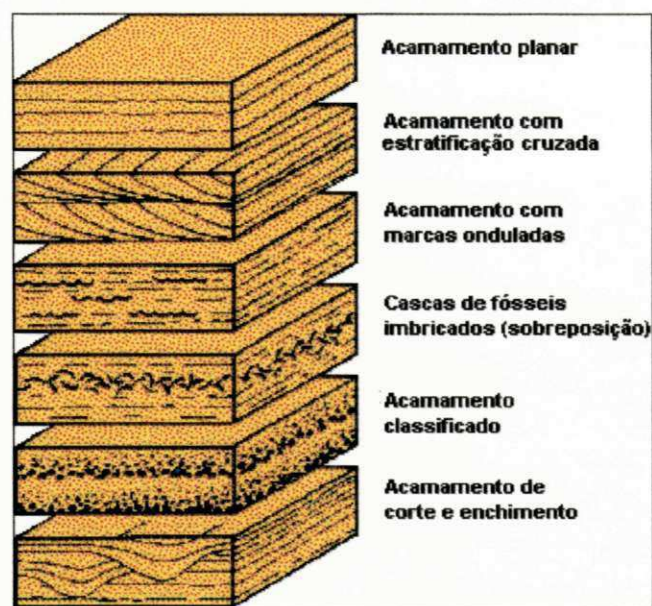
Textura	Composição	Nome da Rocha
Clástica	Fragmentos clásticos de conchas. Cor esbranquiçada.	Calcário
Clástica	Conchas microscópicas de cocolitos (bactéria esférica – coccus).	Giz
Alterada	Organismos silicosos microscópicos, sílica recristalizada.	Sílex
Clástica	Restos de plantas consolidadas.	Carvão

2.1.2.8- Minerais em sedimentos

Existem três importantes rochas sedimentares, em termos de volume de ocorrência: argilito, arenito e calcário. Estas rochas possuem em comum um conjunto de cinco a seis minerais constituintes, Tabela 2.8.

Tabela 2.8- Composição Mineralógica de Argilito, Arenito e Calcário, Segundo Pipkin, B. W. -1997.

Mineral	Argilito (%)	Arenito (%)	Calcário (%)
quartzo	32	70	4
feldspato	18	8	2
argilo-minerais	34	9	1
calcita e dolomita	8	11	93
óxidos de ferro	5	1	-
outros	3	1	-



(Fonte: Pipkin, B. W. - 1997)

Figura 2.6- Representação de tipos de acamamento de sedimentos

2.1.2.6- Rochas sedimentares químicas

São classificadas de acordo com os minerais predominantes que são precipitados de soluções para formar a rocha e sua estrutura, Tabela 2.6.

Tabela 2.6- Lista de Sedimentos Químicos Mais Comuns, Pipkin, B. W. -1997.

Textura	Composição	Nome da Rocha
Clástica	Fragmentos e cimento de calcita. Cores branca, cinza ou azulada. Reage fortemente com HCl diluído.	Calcário
Clástica	Oólitos calcíticos arredondados e cimento calcítico. Pode ser dolomitizado.	Calcário Oolítico
Clástica	Fragmentos e cimento calcíticos com presença significativa de carbonato magnésio. Reage com HCl diluído.	Calcário Dolomítico
Clástica	Carbonato geralmente transformado para dolomita. Cores predominantes são o amarelo e o róseo. Reage fracamente com HCl diluído.	Dolomita ou Dolomito
Cristalina	Halita, cristais cúbicos inter cruzados	Rocha Salina
Cristalina	Halita com silvita, inter cruzamento de cristais cúbicos. Algumas vezes contém cristais laranja a vermelho de carnalita.	Potassa
Cristalina	Gipso tem comumente cristais prismáticos ou fibrosos, apresentando cores branco ou cinza claro	Gipsita

Calcita, quartzo e óxidos de ferro são os principais componentes da matriz cimentante que aglutinam as rochas sedimentares. A presença dos óxidos de ferro, em pequenas quantidades, podem ser responsáveis pelas colorações vermelha, laranja e verde. Rochas de granulometria fina, como ardósias e folhelhos usualmente apresentam cores cinza escuro a preto. Folhelhos negros podem conter significativos teores de carbono orgânico.

2.1.2.9- Porosidade e cimento

Uma das propriedades mais importante dos sedimentos, com grandes implicações, em termos econômicos e de engenharia, é a sua capacidade de reter (porosidade) e transmitir (permeabilidade) fluidos. Quando de sua deposição os sedimentos apresentam extrema porosidade, devido ao grande número de vazios entre os grãos (poros).

A cimentação tende a reduzir o volume de poros (porosidade) e sua intercomunicação (permeabilidade). Como mostrado no esquema da Figura 2.7, a calcita, sílica e óxido de ferro são os cimentos mais comuns em sedimentos.

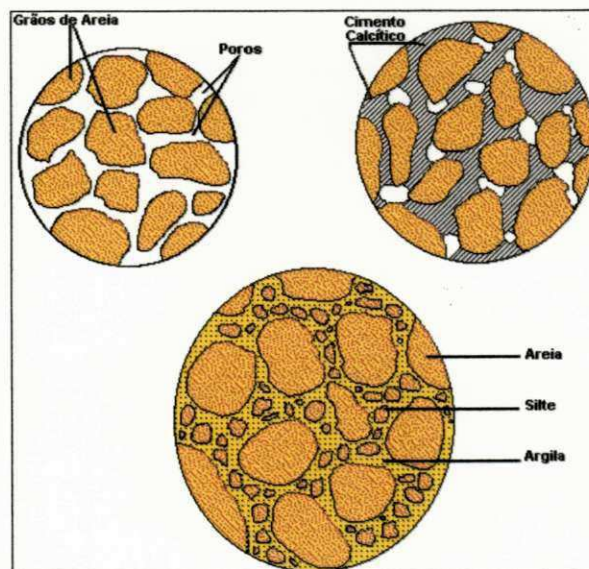


Figura 2.7- Modelo de sedimentos inconsolidado e cimentado, segundo Pipkin, B. W. - 1997.

2.1.3- Rochas Metamórficas

As rochas metamórficas são geradas pela variação de mineralogia, textura, ou estrutura de rochas originais em estado sólido, sejam ígnea, sedimentar ou outra metamórfica, através da ação individual, ou conjunta, dos elementos de metamorfismo (pressão e temperatura).

A textura diz respeito às feições macroscópicas (olho desarmado) ou microscópica, enquanto estrutura é reservada às feições associadas com a clivagem e maiores feições relacionadas à deformação.

O limite inferior de temperatura de metamorfismo é 150° C e o superior é a temperatura de fusão da rocha quando a mesma passa a fazer parte do magma.

O tipo de rocha metamórfica é determinado pela "rocha-original" e pelas condições reinantes de pressão e temperatura. Em geral o processo resulta em: desenvolvimento de novos minerais; deformação e rotação de grãos; recristalização de minerais na forma de grãos maiores; geração de rochas com direções preferenciais de resistências.

Relativamente às rochas para fins ornamentais, neste grupo estão incluídas as rochas gnáissicas, migmatíticas, os mármore calcítico e dolomítico e os quartzitos

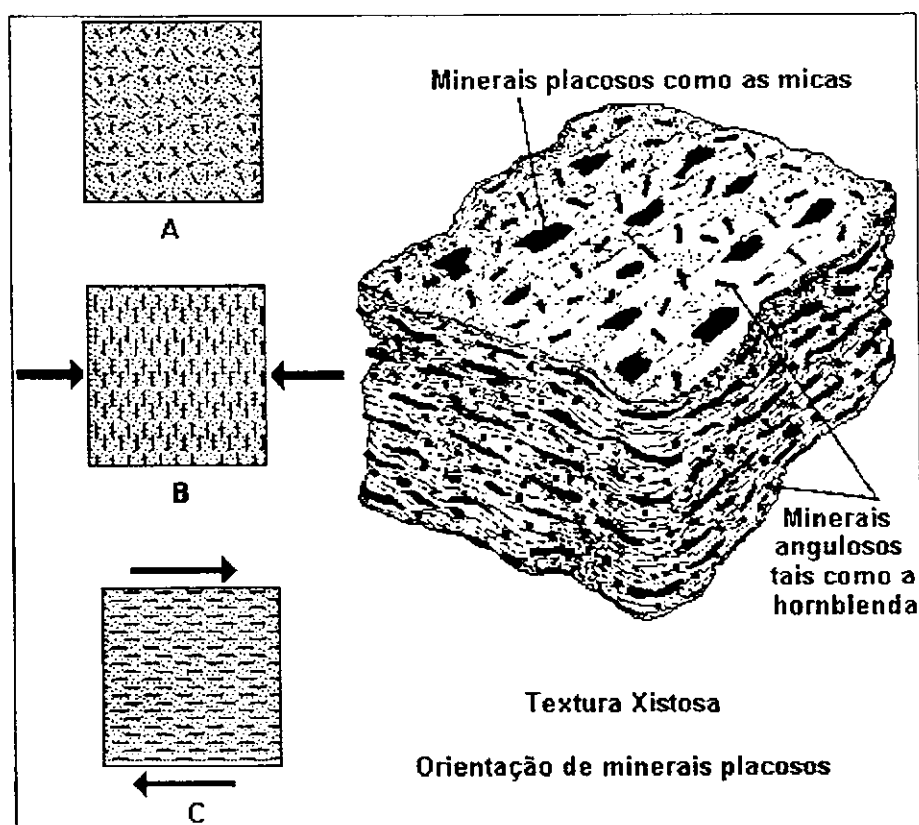
2.1.3.1- Classificação de rochas metamórficas

As rochas metamórficas podem ser classificadas segundo sua textura e estrutura, que é determinada pelas condições de metamorfismo:

- Não foliadas, onde a textura resultante não apresenta orientação mineral: desenvolve-se quando as rochas são compostas principalmente por um tipo de mineral, calcita ou quartzo, por exemplo, sendo relacionado a condições de metamorfismo de baixo grau (baixas pressão e temperatura), ou

metamorfismo de contato. As características estruturais destes minerais são ditas de desenvolvimento equidimensional porque ocorrem, ou tem oportunidade de ocorrer em todas as direções, resultando em uma rocha metamórfica com feições planares; ou,

- Folhadas, em que os minerais estão fortemente orientados e / ou apresentando bandejamento. Alguns minerais como as micas e a clorita desenvolvem-se e se posicionam na direção da tensão mínima, conferindo à rocha uma orientação planar, ou foliada, destes minerais Figura 2.8. São típicas do metamorfismo regional.



(Fonte: Pipkin, B. W., 1997)

Figura 2.8- Exemplificação de textura de rochas metamórficas, com destaque a um modelo de rocha com minerais fortemente orientados. Em A, vê-se a textura não foliada (minerais dispersos); B mostra minerais orientados segundo a normal de esforço compressivo (σ_1); e, em C há orientação no sentido do cisalhamento.

Segue-se uma seqüência limitada de nomes de rochas metamórficas mais comuns, Tabela 2.9.

Tabela 2.9- Descrição de Algumas Rochas Metamórficas Mais Comuns, Segundo Bernard W. Pipkin, 1997.

Nome	Textura	Rocha Fonte	Características
Ardósia	Foliada	Folhelhos e argilas	Foliação muito fina e excelente clivagem (planos naturais de desdobramento), produzindo superfícies macias e lustrosas. Granulometria afanítica. Metamorfismo de baixo grau.
Xisto	Foliada	Rochas de grãos finos	Rocha finamente foliada, apresenta planos de clivagem moderadamente bons. Granulometria fanerítica fina a média e os minerais micáceos apresentam-se dobrados ou ondulados, em geral. Metamorfismo regional.
Gnaisse	Foliada	Rochas de grãos grossos	Foliada grosseiramente ou bandeamento de minerais claros e escuros ou camadas de minerais alinhados. Apresenta granulometria fanerítica variável (fina a grosseira).
Anfibolito	Foliada a Não foliada	Rochas de grãos grossos	Os grãos variam de médio a grande e sua composição é variável mas tem como minerais essenciais anfibólio e plagiocásio. Geralmente apresentam quartzo fino e minerais micácios
Quartzito	Não foliada	Arenitos	Rocha que apresenta: granulometria fina a média; entrelaçamento de grãos de quartzo fundidos; pouca ou nenhuma porosidade.
Mármore	Não foliada	Calcários	Cristais de calcita, em geral com grãos de tamanho fino a médio e apresentando entrelaçamentos. Tem, em geral, pouca ou nenhuma porosidade.

2.2- Geomorfologia Aplicada às Rochas para Fins Ornamentais

Principalmente durante os trabalhos de prospecção pode-se utilizar de informações relativas às feições do relevo que apresentam características específicas para cada tipo de rocha, de acordo com o clima da região em estudo.

De forma genérica os alvos prospectivos fazem parte de maciços Pré-Cambrianos, que são porções da crosta correspondentes ao embasamento de antigos dobramentos que foram soerguidos, durante a fase geossinclinal, e arrasados pela denudação, na fase seguinte de estabilização.

Estas rochas podem se apresentar sob as mais variadas formas, de acordo com sua gênese e forma de ocorrência:

a- Rochas intrusivas – representadas por:

- batólitos bem delimitados;
- granitos de anatexia: quando as rochas encaixantes são injetadas por magma granítico, sendo alteradas por processos de granitização, e ocorrendo em maciços de bordas difusas (difícil diferenciação entre o corpo e suas encaixantes); uma de suas características é seu caráter de deformação, devido a intrusões pegmatíticas e ao extenso falhamento, próprio de zonas de falhamento intenso;
- filões emitidos pelos batólitos.

b- Rochas metamórficas – provenientes de metamorfismo regional ou de contato.

c- Vulcânicas – apresentando textura de efusão, ou projeção, em forma de derrames, interestratificações (lacólitos ou sills).

2.2.1- Relevos Típicos de Rochas Cristalinas

A principal diferenciação dos dois grandes grupos de rochas para fins ornamentais, silicáticas e carbonáticas, se faz através do tipo de estrutura que se analisa: as rochas cristalinas são encontradas em regiões do embasamento antigo e em faixas de dobramentos, e as outras nas bacias interiores e marginais, que evoluíram em ambiente marinho, podendo ter sofrido posterior dobramento e que se caracterizam por situarem-se em extensas regiões planas.

Em relação ao manto de intemperismo é definido que as rochas de granulometria fina resistem melhor à decomposição do que as de grãos grosseiros. Os pórfiros de matriz afanítica resistem muito à desagregação, todavia são sujeitos à esfoliação, devido a rede de diáclases. Já os pórfiros macrogranulares e os ricos em biotita são facilmente alteráveis: os granitos pórfiros resistem menos que os aplitos e se decompõem em arena granítica, principalmente na ausência de biotita (granulitos).

Sobre as rochas de composição granítica, há de se diferenciar entre as ígneas cristalinas e as metamórficas:

a- Ígneas cristalinas – tratam-se de rochas impermeáveis; rígidas, mas fissuradas e diaclasadas; e de composição mineral heterogênea, que lhes confere características específicas:

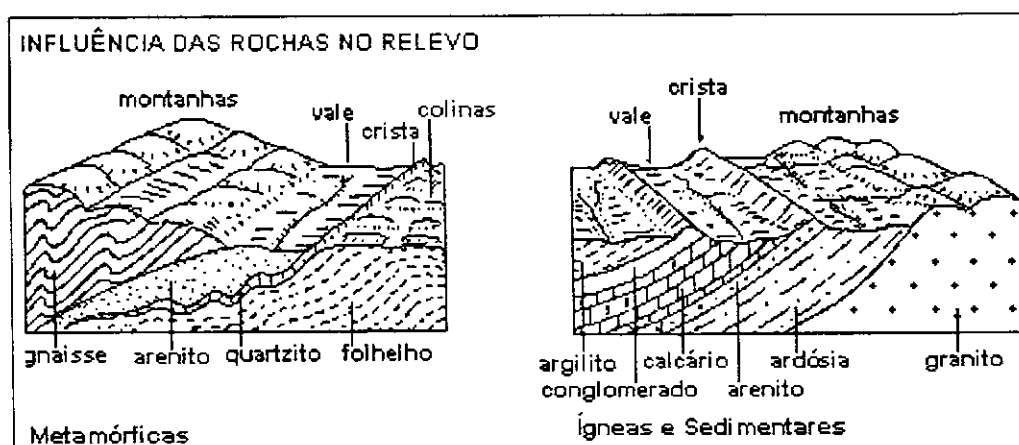
- impermeabilidade – drenagem dendrítica facilitando o escoamento superficial;
- fissuramento e diáclases – juntamente com o solo residual permeável propiciam a infiltração e ressurgência de águas, com abundantes fontes, e orientam a rede de drenagem e conseqüente decomposição dos elementos solúveis da rocha, restando núcleos compactos (matacões).
- heterogeneidade – gera formas peculiares a cada zona morfoclimática específica, de acordo com o tipo de intemperismo: mecânico e/ou químico.

b- Metamórficas cristalinas – sua resistência aos processos de erosão são relacionadas ao grau e tipo de metamorfismo que a rocha sofreu, e à sua composição química e xistosidade.

Em regiões destas rochas os picos e as cristas mais elevadas são mantidas por quartzitos. Estes diferenciam-se dos arenitos por apresentarem fraturas que seccionam os cristais de quartzo: o fraturamento nos arenitos se faz em torno dos grãos, que permanecem intactos.

Os micaxistos dão relevos monoclinais, devido à sua xistosidade, que dispõe as vertentes segundo o mergulho das camadas.

Os gnaisses raramente dão relevos monoclinais porque os planos de xistosidade são menos pronunciados. O relevo é mais semelhante ao dos granitos. Seus solos são mais argilosos que arenosos e o escoamento difuso é mais forte, Figura 2.9.



(Fonte: Penteadó, M. M., 1978)

Figura 2.9- Representação de relevos típicos, de acordo com a gênese das rochas de base.

2.2.2- Relação Relevo e Clima

Há relação entre a morfologia da superfície e o clima que predomina na região, ou seja, rochas iguais submetidas a condições climáticas diferentes geram feições de relevo diversas.

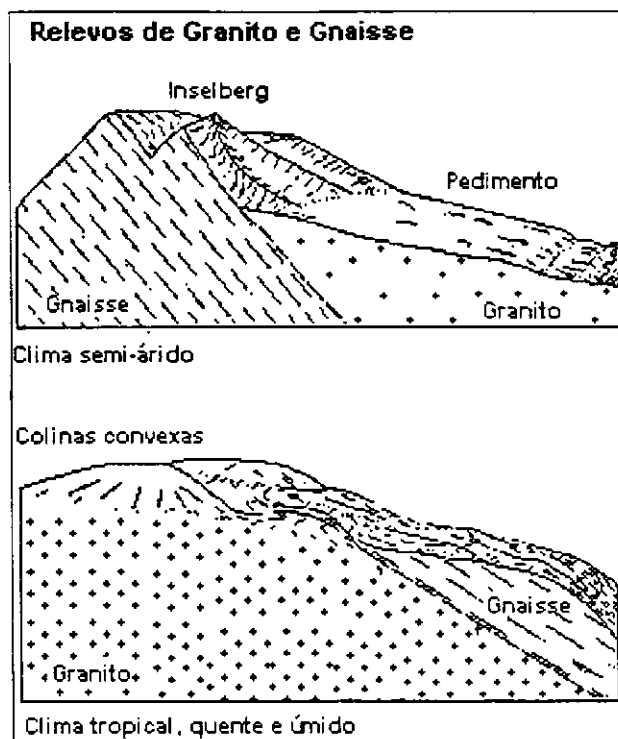
As rochas gnáissicas onde o metamorfismo e a recristalização ocorreram em planos paralelos, apresentam maior resistência ao conjunto, em condições de baixa umidade. Se o intemperismo químico é fraco, o mecânico é incompetente para causar alterações e estas rochas se apresentam como saliências topográficas. Todavia, em climas intertropicais a alteração é mais acelerada devido à percolação de água em sua estrutura xistosa.

Sobre as rochas granitóides predominam erosão linear e decomposição em matacões e elementos muito finos, tendo comportamento típico de relevo de acordo com o clima, Tabela 2.10.

Tabela 2.10- Granitóides: Clima Local versus Características de Relevo, Segundo Pentead, M. M., 1978)

Clima	Características do Relevo
Temperado	<ul style="list-style-type: none">- relevo conservado em saliência;- incisão mais acentuada dos talvegues;- crista convexa e base côncava que apresenta acumulação de material das encostas;- rede de drenagem ramificada devido à impermeabilidade da rocha: os vales são atulhados de seixos e areias.
Secos e Úmidos (alternadamente)	<ul style="list-style-type: none">- erosão mecânica mais pronunciada paralela a processo químico de alteração de constituintes minerais geram porção deprimida e vale (inversões de relevo).
Úmido (permanentemente)	<ul style="list-style-type: none">- predomina a ação química, mas o próprio capeamento protege a rocha contra os processos mecânicos, resultando em saliências topográficas
Seco	<ul style="list-style-type: none">- planícies arenosas;- cristas rebaixadas;- vertentes côncavas e recobertas de blocos, lascas e matacões;- vales alargados;- escoamento difuso.
Quente e Úmido	<ul style="list-style-type: none">- relevos salientes;- relevos isolados de vertentes íngremes e lisas.

A Figura 2.10 traz um modelo de relevo de rochas granítica e gnáissica em climas comuns no Brasil: seco e úmido, alternadamente (semi-árido) e quente e úmido (tropical).



(Fonte: Penteadó, M. M., 1978)

Figura 2.10- Comportamento do relevo de acordo com o clima.

2.2.3- Comportamento de Corpo Granítico Frente à Erosão

A Figura 2.11 representa um corpo aflorante de granito, submetido a processos de intemperismo físico (variação de temperatura ambiente), químico (ação de água) e mecânicos (relaxação de tensões residuais).

Ensaio laboratoriais demonstram que a alternância de temperatura não é suficiente para provocar a desagregação da rocha.

Contudo, a alternância de condição de umidade causa intemperismo bem mais eficaz:

- durante a estação úmida, a hidratação diferencial dos minerais componentes da rocha provoca o aumento de volume de minerais micáceos e dissolução de feldspatos, permitindo o aparecimento de vazios gerando redução da coesão primária;
- na estação seca, a desidratação de elementos hidratados e em fase de dissolução ocasionam a redução do volume e precipitação de materiais pulverulentos facilmente transportados;
- os grãos de quartzo são carregados pelas chuvas e formam a arena granítica.

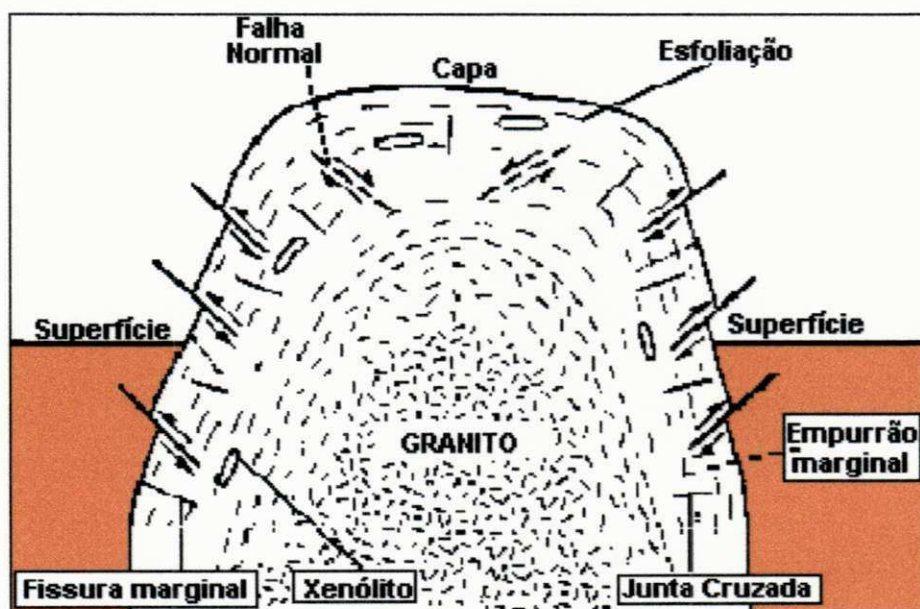


Figura 2.11- Representação de corpo aflorante de granito e suas irregularidades próximas à superfície propiciando processos de intemperismo, segundo Bernard W. Pipkin, 1997.

Todavia a tensão residual é o mecanismo interno que melhor explica o processo de formação de lajes que se desprendem de maciços graníticos durante a estação seca: o relaxamento de tensões determina o aumento de volumes próximos à superfície dos batólitos, desagregando “escamas” em forma de laje. Este processo progride segundo planos paralelos e é denominado exfoliação esferoidal.

2.3- Associações Geológicas e Regiões Brasileiras Prospectáveis em Rochas para Fins Ornamentais

De acordo com parâmetros geológico, estratigráfico, cronológico e geotectônico, a que foi submetida durante sua consolidação, a evolução da plataforma brasileira permite diferenciar 10 unidades distintas, denominadas de províncias estruturais, subdivididas em dois grupos: elementos de embasamento (Tabela 2.11) e de cobertura (Tabela 2.12).

Tabela 2.11- Elementos do Embasamento Cristalino do Brasil, Segundo Brito Neves, B. B., 1978, Notas de Aulas).

Tipo	Identificação
Cráton (ou núcleos cratônicos), são áreas que se comportam como estáveis desde 1800 Ma (Pré-Cambriano Superior – PCS)	<ul style="list-style-type: none"> - Amazônico; - São Luís; - São Francisco; e, - Rio de La Plata.
Regiões de dobramentos do PCS, onde se formaram vários sulcos geossinclinais intermitentes com maciços medianos	<ul style="list-style-type: none"> - Sudeste (ou Mantiqueira); e, - Nordeste (ou Borborema).
Maciços medianos, áreas relativamente estáveis que separam zonas geossinclinais mas que foram atingidas pelo desenvolvimento destas	<ul style="list-style-type: none"> - Central de Goiás; - de Guaxupé; - Joinville e Pelotas da Região de Dobramentos Sudeste.
Faixas de dobramentos do PCS, foi um único sulco geossinclinal (as duas últimas fazem parte da região de dobramentos do Nordeste Oriental).	<ul style="list-style-type: none"> - Brasília; - Paraguai-Araguaia; - Araçuaí; - Sergipana; e - Médio Coreau

Tabela 2.12- Elementos de Coberturas do Brasil, Segundo Brito Neves, B. B., 1978, Notas de Aulas).

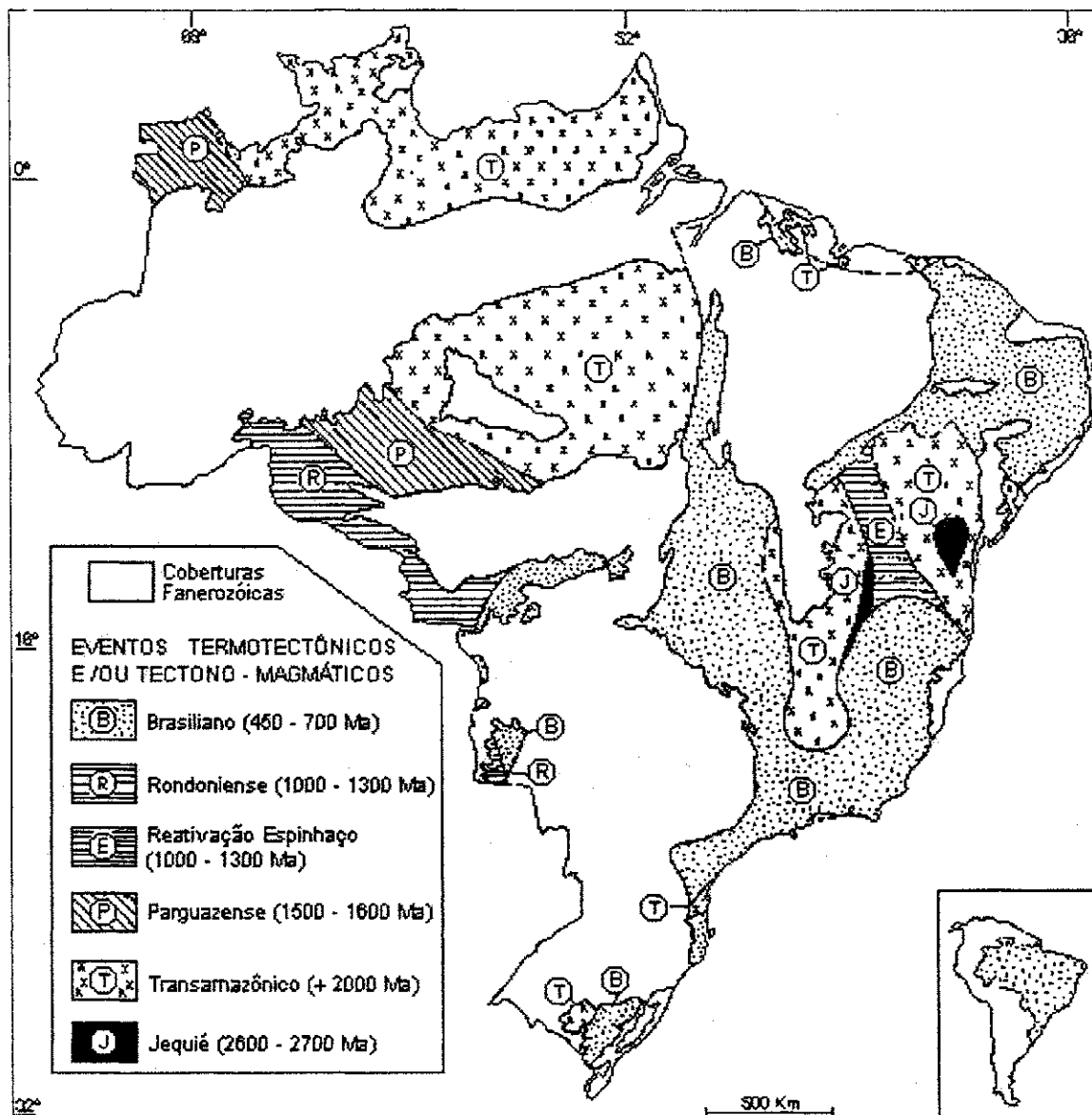
Tipo	Evento	Identificação
Dobradas	Produtos de reativação de núcleos cratônicos	<ul style="list-style-type: none"> - Paraense, Madeirense e Rondoniense; do Cráton Amazônico; - Espinhaço e Chapada Diamantina; do Cráton de São Francisco.
	Depósitos singeossinclinais das faixas e regiões de dobramentos	<ul style="list-style-type: none"> - Grupo Bambuí; - Grupo Rio Pardo; e, - Grupo Alto Paraguai.
	Depósitos molássicos, pós-geossinclinais, do Eo-Paleozóico ou Cambro-Ordoviciano	<ul style="list-style-type: none"> - Nordeste: Jaibaras; Cacocí; Iara; Juá e Estância; e, - Sudeste: Eleotério; Castro-Pirai, Guaratubinha; Camarinha; Itajaí; Campo Alegre; Maricá; Bom Jardim e Camaquã
Não dobradas, ou Fanerozóicas	Sinéclises Paleozóicas, ou Bacias Intracratônicas, que se caracterizam por se apresentarem plataformas, sinformais de abaixamentos ovalados, e possuem escala continental	<ul style="list-style-type: none"> - Bacia Amazônica (2.400.000 Km²), subdividida nas bacias do Acre; Baixo, Médio e Alto Amazonas; e Graben de Limoeiro; - Bacia do Parnaíba (700.000 a 800.000 Km²), composta pelas bacias Araticum-Tianguá; Gilbuês-Tianguá; e Tianguá-Nordeste. - Bacia do Paraná (1.600.000 Km², sendo 1.000.000 Km² no Brasil), sendo formada pelas bacias do Paraná, propriamente dita; do Chaco e Rio Blanco.

(continuação da Tabela 2.12)

Não dobradas, ou Fanerozóicas	Fossas Interiores Paleo-Mesozóicas (grabens, semi-grabens, rifts), se caracterizam por apresentarem dimensões reduzidas, em relação às sinéclises	<ul style="list-style-type: none"> - Bacia de Tacutu, situado no extremo norte; - Bacia do Médio Jaguaribe: Iguatú; Lima Campos; Malhada Vermelha, Icó e outras; - Bacia do Araripe: Chapada do Araripe e São José do Belmonte; - Bacia de Mirandiba; - Recôncavo-Tucano-Jatobá, composta pelas bacias do Recôncavo Norte; Tucano Sul; Tucano Centro; Tucano Norte e Jatobá.
	Bacias Costeiras e de Margem Continental que se caracterizam por apresentarem diferenças estruturais, crono-estratigráficas e de eventos tectônicos a que foram submetidas devido ao processo de derivação de continentes, podendo ser divididas em dois grupos: as do Atlântico Norte e Atlântico Sul	<ul style="list-style-type: none"> - Bacias do Atlântico Norte: Cassiporé; Mexiana-Limoeiro; Soliópolis-Vizeu-Bragança; São Luís; Barreirinhas; Piauí Norte; Ceará; e Potiguar. - Bacias do Atlântico Sul: Sergipe - Alagoas; Recôncavo Sul; Jequitinhonha; Camuruxatiba - Abrolhos; Campos; Santos - Rio de Janeiro; e Pelotas.
	Fossas Interiores Terciárias (onde quase todas são feições de linhas estruturais terciárias)	<ul style="list-style-type: none"> - Itaboraí; - Taubaté-Resende; - São Paulo; e, - Curitiba.
	Coberturas Tabuliformes	<ul style="list-style-type: none"> - Planície Aluvionar (Amazonas, Bananal, Xingu e Tapajós); - Planalto dos Parecís; - Chapadão de Urucuaia; e, - depósitos correlatos.

Relativamente às rochas para fins ornamentais (de composição silicática, carbonática e quartzítica), quando se analisa as localizações das suas áreas de produção consegue-se identificar ambientes e feições geológicas que são propícias para ocorrência de determinados materiais.

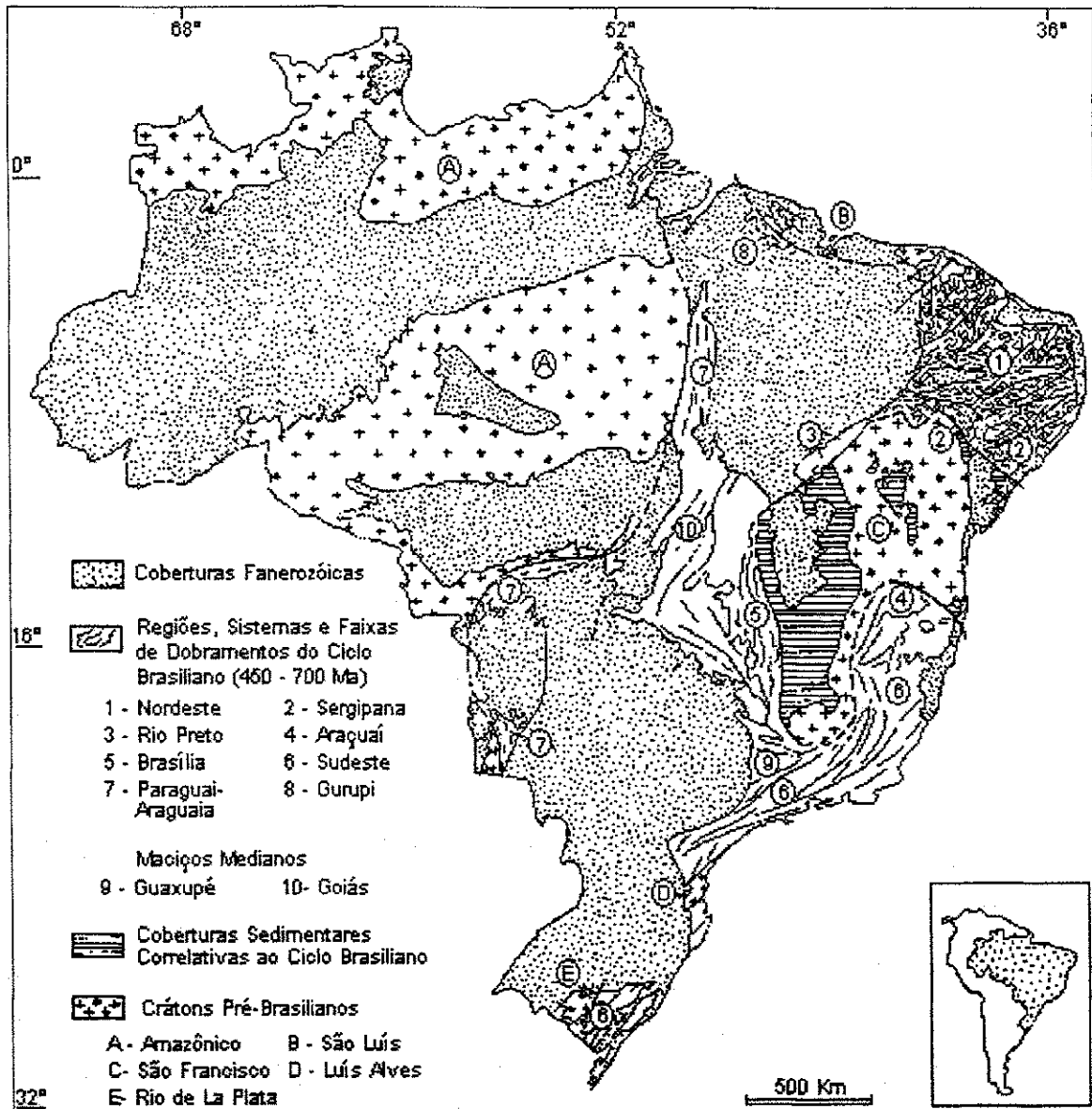
Todavia, antes de se estender sobre a afirmativa anterior, merece menção que os ciclos tectono-magmáticos Jequé, Transamazônico e, principalmente, o Brasiliano, foram períodos em que ocorreram diversas intrusões de rochas graníticas, e rejuvenescimento de áreas plataformais, sendo o último indicado como ciclo guia para análise preliminar, tendo em vista que atuou em toda extensão do País, conforme se vê na Figura 2.12.



(Fonte: Schobbenhaus, C. - 1991)

Figura 2.12- Áreas de atuação dos ciclos termotectônicos sobre a plataforma brasileira.

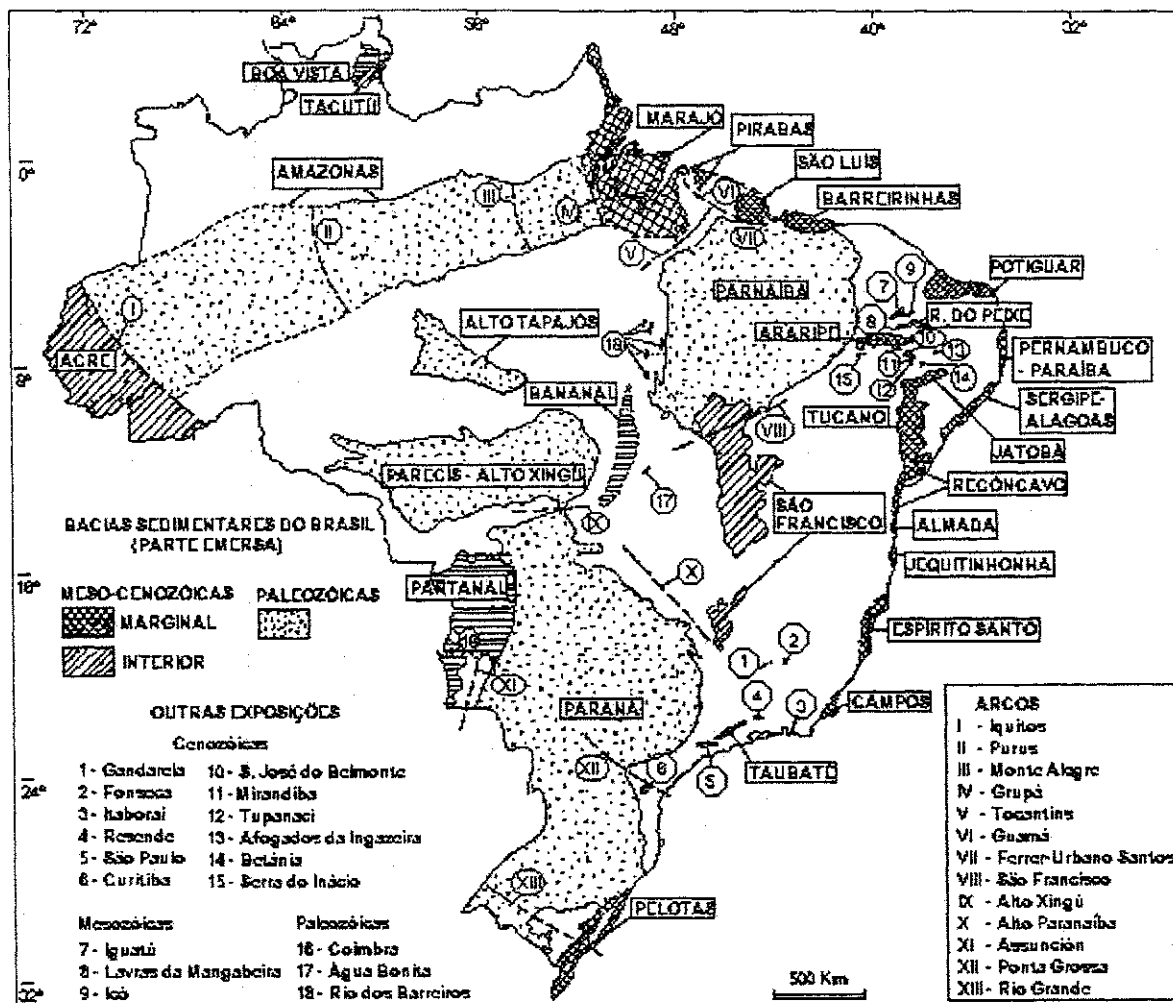
A plataforma brasileira expõe, em cerca de 50% de sua área, rochas do embasamento cristalino, Figura 2.13.



(Fonte: Schobbenhaus, C. - 1991)

Figura 2.13 – Áreas de exposição do embasamento cristalino brasileiro

Por outro lado, a Figura 2.14 apresenta as áreas de exposição das coberturas brasileiras.



(Fonte: Schobbenhaus, C. - 1991)

Figura 2.14- Áreas de coberturas brasileiras

Dentro da terminologia do setor, na prospecção dos mármore, caso se almeje materiais homogêneos deve-se investigar as bacias marginais com seqüência marinha de sedimentos. No caso de materiais movimentados, os alvos são as faixas e sistemas de dobramentos marginais e as bacias interiores e periféricas às zonas que sofreram magmatismo pós sedimentação, Figura 2.15.

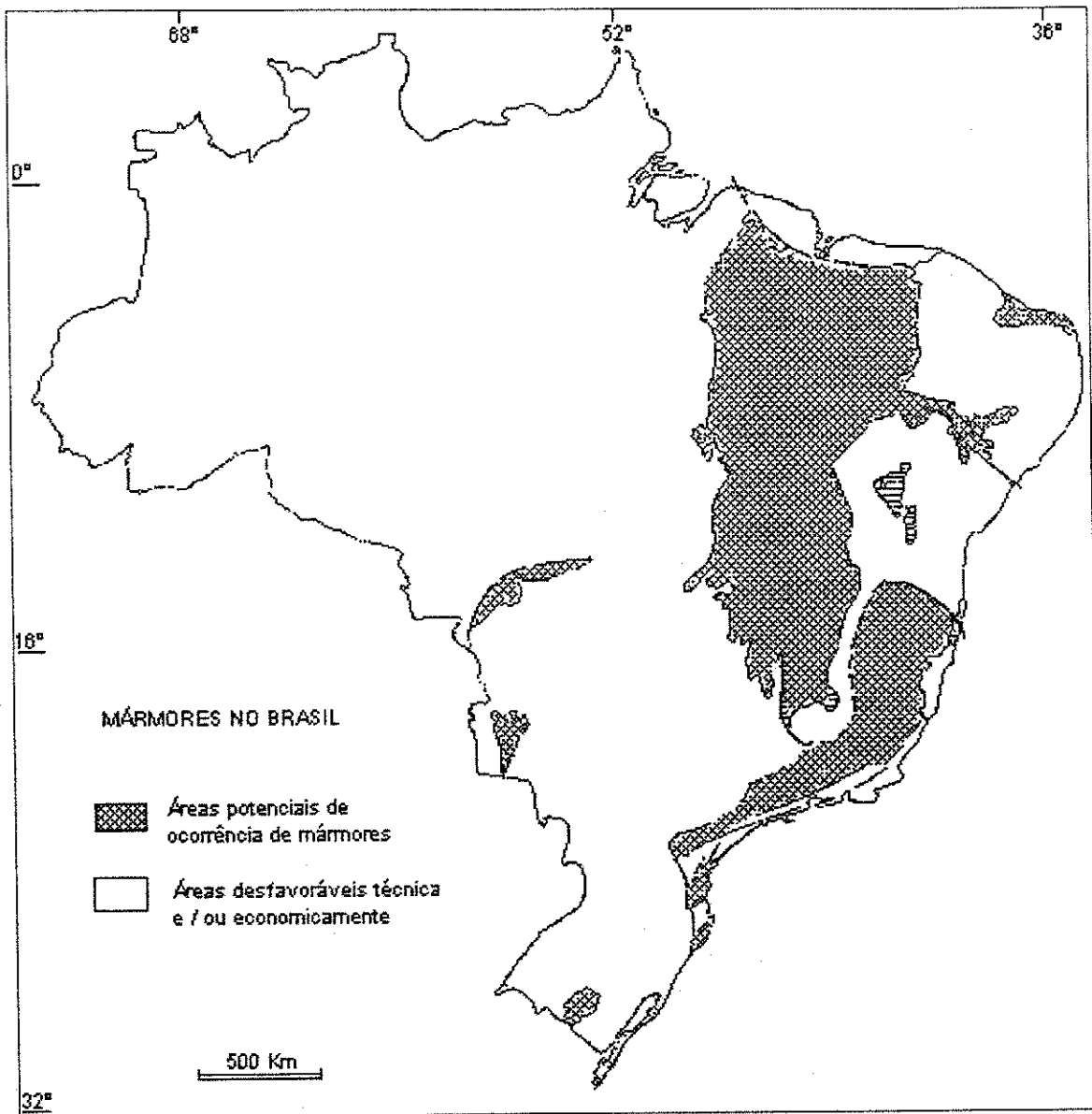


Figura 2.15- Áreas potenciais de mármore no Brasil

Os quartzitos se encontram em bacias intracratônicas que apresentam manifestações de vulcanismo.

A localização de "granitos" pode obedecer às associações constantes na Tabela 2.13.

Tabela 2.13- Relação de Ambientes Propícios a Granitos Ornamentais

Tipo	Descrição	Ambiente
Homogêneos	Corpos intrusivos elípticos ou arredondados	- Áreas do embasamento de idade brasileira (Proterozóico Superior / Paleozóico Inferior).
Movimentados	Rochas gnáissico-migmatíticas	- Faixas antigas do embasamento que foram remobilizadas por ciclos tectônicos. - Próximo a grandes batólitos onde existem falhas que seccionam unidades mais antigas.
Escuros	Rochas granito-gnáissicas	- Regiões marginais de faixas de dobramentos. - Intrusões de corpos e complexos plutônicos.
Negros (absolutos)	Rochas dioríticas de textura vulcânica a sub-vulcânica	- Próximo a zonas de enxames de diques em faixas de reativação plataformal. - Bacias intracratônicas que sofreram intrusões em forma de sills e derrames.

A Figura 2.16 assinala os alvos potenciais para prospecção de rochas graníticas, dentro do contexto de rochas para fins ornamentais.

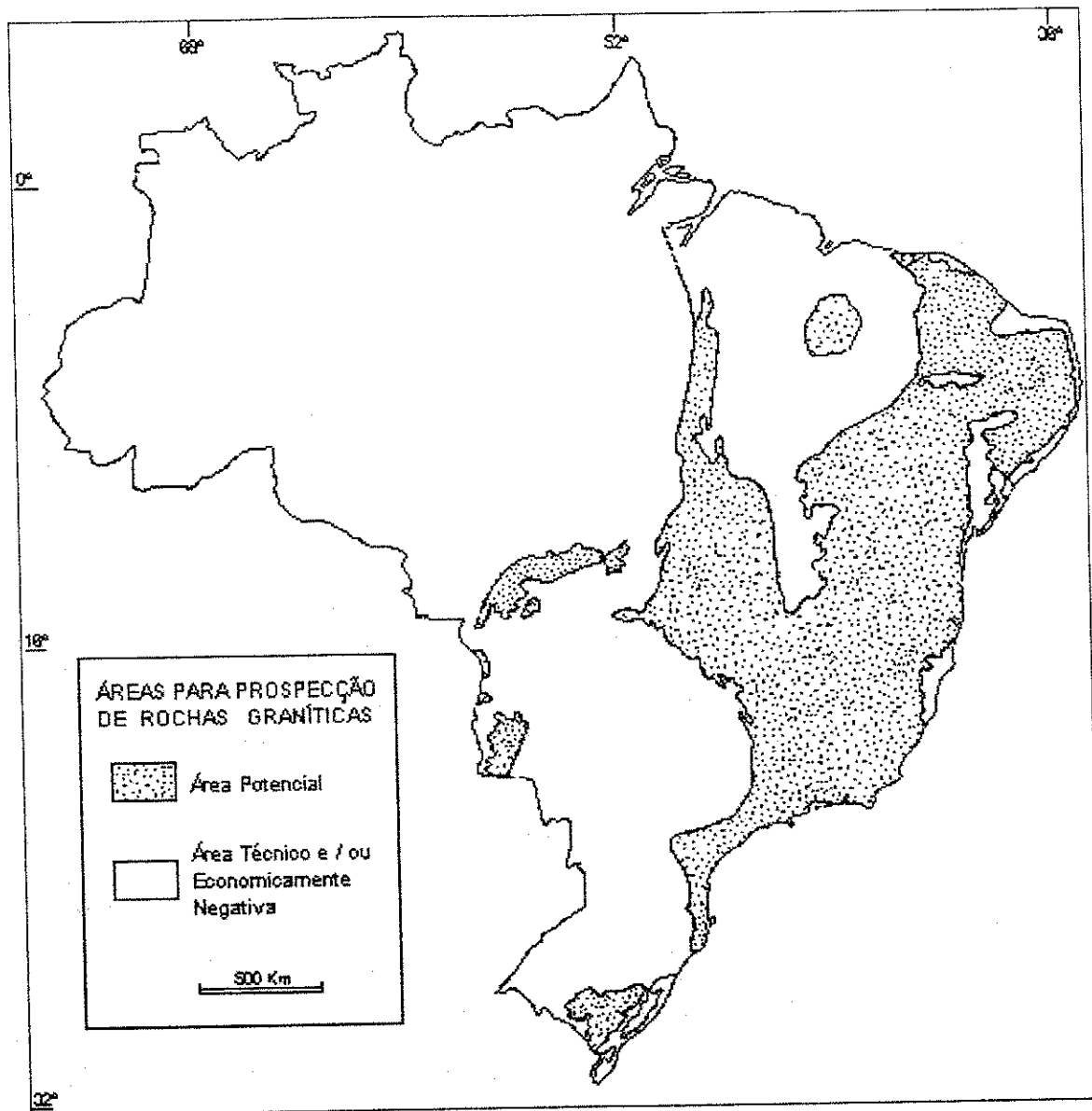


Figura 2.16- Áreas prospectivas para rochas graníticas do Brasil.

CAPÍTULO 3

PESQUISA, EXPLOTAÇÃO E COMÉRCIO DE ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS

3.1- Rochas Para Fins Ornamentais: Conceitos

Os bens minerais tem uma importância decisiva no processo de desenvolvimento, através do fornecimento de recursos necessários aos sistemas produtivos, mesmo em se tratando de regiões desenvolvidas. Todavia, os reflexos são mais evidentes nas fases iniciais do desenvolvimento. Com a evolução natural deste processo, há uma redução da participação relativa da produção mineral primária, na formação do produto da economia, ocorrendo, em contrapartida, um aumento da importância dos minerais industriais. Aumond, 1997, sugere que a maturidade industrial de um país é atingida quando o valor de produção mineral de não-metálicos supera a produção dos metálicos.

As pedras naturais têm aplicações em diversos ramos da indústria e do comércio, sendo enquadradas macro-economicamente em dois setores principais, com diferenciação básica a partir da amplitude de seu mercado, a saber (Gonçalves, 1996):

- a) Ornamentais – ou de revestimento (também denominadas de pedras naturais, rochas lapídeas, dimensionais e de materiais de cantaria) diz-se dos mármore e rochas calcárias, granitos e rochas silicáticas, e materiais xistosos (ardósias e quartzitos) que respondem ao polimento e lustro, e que podem ser absorvidos no comércio internacional;
- b) Industriais - calcários, granitos e basaltos para aplicação na construção civil, com comércio de amplitude local e/ou regional.

3.2- Produção e Aplicação

A cadeia de produção principal de materiais ornamentais é composta por empresas que segmentam as diversas etapas do ciclo produtivo, podendo ser representada pela Figura 3.1.



Figura 3.1- Estrutura da cadeia de produção de rochas para fins ornamentais.

Por sua vez, as relações constantes da Figura 3.1 estão submetidas a fatores de desempenho, tais como capacitação empresarial e gerencial, qualidade de máquinas, equipamentos e insumos, mão-de-obra especializada, infra-estrutura de escoamento, e custos de frete marítimo.

Como a aplicação, em termos de volume comercializado, destacam-se os agregados da construção civil, materiais para revestimentos de pisos e fachadas, pisos e calçamento, arte funerária, e obras de arte.

O mercado de rochas para fins ornamentais pode ser subdividido em dois grupos principais:

- indústria de construção e revestimento (com 80% de participação), e,
- mercado de monumentos e peças mortuárias (20% restante).

A competição internacional tem direcionado muitos produtores de material bruto (blocos, placas) a procurar alternativas de processo produtivo através de pesquisas básicas da geologia dos depósitos, de tecnologias próprias de exploração e preparação de materiais comercializáveis.

A introdução das tecnologias de corte contínuo (fio e serra diamantados, e jato d'água) causou um impacto sobre a capacidade de produção, em termos de incremento da quantidade e da qualidade de produtos dirigidos ao

comércio, principalmente internacional, devido ao seu elevado custo operacional (comparativamente a outras técnicas).

Para comparar as tecnologias de aplicação em determinado jazimento, o valor econômico utilizado para analisar o desempenho dos possíveis métodos de extração, não deve levar em consideração apenas os custos específicos de corte, mas precisam estar inclusas as etapas subsequentes à lavra, indo até a comercialização dos blocos, e aos custos ambientais.

A competitividade da indústria mineira, considerados os aspectos de globalização da economia e formação de blocos econômicos, torna-se complexa, sendo necessários, para manutenção e ampliação da capacidade do mercado produtor os seguintes pré-requisitos:

- jazidas : existência de jazidas de padrão internacional;
- exploração : lavras praticadas a custos operacionais baixos;
- mão-de-obra/equipamentos: uso de capacitação tecnológica de alto nível;
- comércio : modelo eficiente;
- propaganda e marketing : difusão de produtos, e,
- relações públicas : assistência técnica ao consumidor final.

Quanto ao planejamento de técnicas de exploração de material ornamental, o processo atual consiste em quatro fases de evolução, conforme Tabela 3.1.

Relativamente ao uso de pedras naturais em fachadas tem ocorrido o incremento de sua aplicação devido a sua maior durabilidade (comparativamente aos revestimentos convencionais) e efeito estético. A escolha dos materiais devem levar em consideração as características da rocha, dos componentes de fixação, da argamassa de assentamento e do selante utilizado.

Tabela 3.1 - Fase Atual da Evolução do Planejamento de Rochas para Fins Ornamentais.

Fase	Denominação	Descrição
I	Prospecção e Exploração (corte de uma área de 0,5 m ² em afloramento para definição de cor, tipo de rocha, textura)	<ul style="list-style-type: none"> - Amostragem; - Avaliação de Potencial Comercial; - Mapeamento Geológico Preliminar; - Detalhamento Geológico e Topográfico; - Avaliação Econômica e Ambiental; - Execução de Campanha de Sondagem.
II	Projetos e Estimativas	<ul style="list-style-type: none"> - Definição de Reservas e Recuperação da Lavra
III	Teste de Materiais (corte de blocos com dimensões compatíveis com as exigências da indústria)	<ul style="list-style-type: none"> - Definição de Planos de Corte Naturais; - Relação de Recuperação da Lavra; - Análise da Qualidade do Produto; - Valor Comercial.
IV	Método de Mineração	<ul style="list-style-type: none"> - Definição de Parâmetros: mineralogia, planos naturais de partição e propriedades físicas da rocha.

Por outro lado, os métodos de produção modernos tem permitido economia da construção quando se utiliza de diferentes tipos de rocha, não apenas em função do próprio custo mas também pela facilidade de sua utilização.

3.3- Principais Parâmetros

↘ Aparência, resistências e durabilidade são os principais atributos de uma rocha para uso ornamental, que exigem testes e ensaios padronizados. Mesmo sendo a aparência um fator meramente estético, devem ser verificadas e analisadas variações de textura, brilho e cor do material.

↘ A durabilidade, ou vida útil de uma rocha para uso ornamental, é a capacidade do material em apresentar e manter suas características de resistência ao desgaste e aparência, relativamente às condições de uso e

manuseio, analisadas a partir de uma série de testes de cristalização, coeficiente de saturação e porosidade, ou seja, deve ser determinada em termos de constantes físicas.

Principalmente para os produtos destinados a regiões que possuem invernos rigorosos deve-se realizar o teste de cristalização, que consiste em submeter-se amostras a congelamentos sucessivos, através da determinação da redução em peso de uma amostra após 15 ciclos de ataque de uma solução de sulfato de sódio, seguido de secagem em ambiente úmido.

O resultado do teste de imersão ácida (solução com a 20 e 40% de concentração de H_2SO_4) - intemperismo acelerado - deve ser analisado juntamente com o estudo petrográfico. A principal dificuldade repousa sobre o fator tempo, pois os processos de intemperismos naturais são mais lentos que os testes artificiais. Por exemplo, a cristalização induzida do sal nos poros de uma rocha através de ciclos de choque, secagem, e aquecimento em uma solução é presumível duplicar a ação destrutiva do congelamento e de variações de temperaturas do intemperismo natural.

Quanto aos parâmetros físicos e características, que permitem a avaliação e comparação entre materiais, existem diversas classificações usuais de acordo com seu tipo e qualidade:

a) para os "mármore", que comercialmente é toda rocha calcária (sedimentar ou metamórfica) que pode ser polida, utiliza-se a nomenclatura do Departamento de Geologia Aplicada da Universidade de Istambul, conforme qualidade e tipo (M.I.A.):

a.1) Critérios: 1) tamanho dos cristais; 2) grau de resistência ao intemperismo; 3) anisotropia mecânica; 4) abrasão; 5) impregnação de cores em amostras.

a.2) Propriedades e aspectos, de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Classificação de Mármore, Segundo Propriedades

GRUPO	PROPRIEDADES
A	Mármore e rochas com qualidades uniformes para esculturas, etc.
B	Mármore e rochas com características similares às do Grupo A, mas com menor trabalhabilidade, ocasionalmente com defeitos naturais que exigem preenchimento.
C	Mármore e rochas com variação aleatórias de qualidade, características geológicas irregulares, vazios e faixas de separação comuns (o comércio destes materiais utiliza adesivos para o preenchimento de vazios, buscando corrigir as variações naturais).
D	Mármore e rochas similares às do Grupo C, sujeitas aos mesmos métodos de manufatura e acabamento, mas com maiores proporções de falhas naturais e variações na trabalhabilidade.

Fonte: M.I.A.

a.3) Tamanho dos Cristais: Tabela 3.3

Tabela 3.3- Classificação de Mármore, Segundo Tamanho de Cristais

CLASSE CRISTALINA	TAMANHO DOS CRISTAIS (em μm)
Muito fino	< 50
Fino	50 a 100
Médio	100 a 1000
Grosseiro	> 3.000

Fonte: M.I.A.

b) para os "granitos", qualquer rocha de composição silicática que permite o polimento e que possa ser utilizada como material de revestimento, são consideradas propriedades físicas e mecânicas, de acordo com a A.S.T.M (C 615), Tabela 3.4.

Tabela 3.4- Classificação Tecnológica de Rochas Graníticas

ENSAIO	RESULTADO
Absorção de água (máximo)	0,4 %
Massa específica aparente (mínima)	2.560 Kg/m ³
Compressão uniaxial (mínima)	130 MPa
Flexão (mínima)	10,34 MPa

Fonte: A.S.T.M

Estudo realizado em 155 amostras de rochas silicáticas brasileiras, Frazão et al. (1996), com base em testes padronizados pelas normas ASTM e ABNT, utilizadas como rochas para fins ornamentais (75 granitos, 35 gnaisses, 10 charnockitos, 8 granodioritos, 4 dioritos, 4 sienitos, 4 monzonitos, 3 diabásios, 2 albititos, 2 anfibolitos, 2 basaltos, 2 noritos, 1 gabro, 1 piroxenito, 1 tonalito e 1 monzodiorito), considerando-se um nível de confiança de 95%, sugerem especificações que serão consideradas neste trabalho e que não diferem da Norma ASTM C 615, Tabela 3.5.

Tabela 3.5- Valores de Especificações ASTM e de Testes em Rochas Brasileiras.

Propriedades	ASTM C-615	Resultados Brasileiros		Valor Adotado
		Classe	Freq.(%)	
Massa específica aparente (Kg/m ³)	≥ 2.560	2.550 / 2.600	99,4	≥ 2.550
Porosidade aparente (%)	n. e.	0,8 / 1,0	91,1	≤ 1,0
Absorção d'água (%)	≤ 0,4	0,3 / 0,4	93,3	≤ 0,4
Velocidade propagação de ondas (m/s)	n. e.	4.000 / 4.500	96,1	≥ 4.000
Dilatação térmica lin. (10 ⁻³ mm/m °C)	n. e.	11 / 12	93,1	≤ 12
Desgaste Amsler (mm)	n. e.	0,8 / 1,0	90,4	≤ 1,0
Compressão simples (MPa)	≥ 130	100 / 125	97,5	≥ 100
Resistência à Flexão (MPa)	≥ 10,34	10 / 15	96,2	≥ 10,00
Módulo deformabilidade estático (GPa)	n. e.	30 / 40	94,7	≥ 30
Impacto de corpo duro (m)	n. e.	0,3 / 0,4	97,2	≥ 0,3

Nota: n. e. = não especificado.

3.4- Aspectos Econômicos

O modelo de política industrial adotado desde a época do primeiro e segundo PND - Plano Nacional de Desenvolvimento - 1971 a 1979, privilegiou a substituição de importações, como forma de solidificar o parque nacional. A proteção ao mercado interno, através de instrumentos de restrições tributárias, administrativas e cambiais, impostas às importações, catalisou a viabilização de empreendimentos dissociados dos padrões internacionais de competitividade, Vale, E. (1997).

De acordo com Calaes, G. (1997), no decênio compreendido entre 1968 e 1978 o setor de rochas para fins ornamentais, desde a extração até o beneficiamento, promoveu um ciclo de investigações geológicas visando a busca de novos materiais para atendimento do mercado. Neste período o Brasil, de forma modesta, iniciou a sua participação no mercado internacional de materiais processados (chapas e produtos acabados).

Com o fim da política protecionista e paternalista, e a implementação de um novo papel do Estado, apesar do crescimento observado neste setor, ainda existe uma relativa instabilidade técnica, econômica e financeira. Parte das empresas do setor continua a negligenciar os investimentos em pesquisa mineral, desde a fase de exploração até o desenvolvimento das jazidas.

Segundo trabalho de Caranassios et alli, 1993, os granitos brasileiros estão presentes nos principais centros consumidores, sendo conhecidos e apreciados no mercado mundial pela sua variedade de cores e de padrão (no início dos anos 90 encontravam-se catalogados mais de 150 tipos diferentes de rochas graníticas, como produto para exportação).

A indústria vem realizando investimentos de expansão e modernização em tecnologias e equipamentos de produção nas diferentes etapas do processo produtivo. Em números aproximados, o país conta com cerca de 300 mineradoras, que incorporam uma estrutura de oferta anual na ordem de 600.000 m³ de blocos de granitos e mármore. Na fase de desdobramento e produtos

acabados, o setor tem capacidade anual instalada para produzir cerca de 25.000.000 m² e 15.000.000 m², respectivamente, a partir de 250 serrarias (3.400 teares) e 6.000 marmorarias (Calaes, op. Cit.).

O mercado doméstico apresenta um baixo consumo *per capita*, relativamente a seu potencial e ao consumo de outros países, com uma demanda anual de 13 a 15.000.000 m² de produtos acabados – 5% do consumo mundial, completamente associada ao desempenho da indústria de construção civil (Calaes, op. Cit.).

No ano de 1990, o investimento em máquinas para a indústria brasileira girou em torno de U\$ 15 milhões, sendo distribuído, de acordo com a etapa do processo produtivo, em: extração (20%); corte (50%); acabamento (30%).

Com base em projeções de mercado, a Divisão de Economia Mineral do DNPM, divulgou, em 1997, a projeção do consumo aparente de granitos e mármore para o ano de 2010, que deve atingir valores da ordem de 13,3 milhões de toneladas no mercado nacional e mais 2,5 milhões de toneladas para o mercado externo.

3.5- Rochas Para Fins Ornamentais e o Nordeste

Segundo a Divisão de Economia Mineral do DNPM, o Nordeste apresenta um total de 187 áreas requeridas para rochas de uso ornamental (em fase de pesquisa ou lavra), distribuídos entre oito estados (Tabela 3.6).

Tabela 3.6- Distribuição de Áreas de Rochas Para Fins Ornamentais no Nordeste

Estado	Áreas Tituladas	Participação (%)
Bahia	79	42,25
Paraíba	35	18,72
Ceará	27	14,44
Rio Grande do Norte	21	11,23
Pernambuco	17	9,09
Piauí	03	1,60
Sergipe	03	1,60
Alagoas	02	1,07
Total	187	100,00

Fonte- DNPM (1997), consulta via Webmaster DNPM

Para esta organização industrial predomina o sistema de formação de preços típico de concorrência monopolística, tendo em vista a possibilidade de trabalhar-se com materiais de padrões exóticos e em ocorrência restrita a determinada região (caso do Granito Sucuru, Azul Bahia, Preto Tijuca, etc.).

O modelo organizacional mais adotado, entre as pequenas e médias empresas de mineração que atuam no setor, concentra a administração de atividades nas mãos de pessoas não técnicas, que, em regra geral não demonstram interesse por inovação tecnológica e por investimentos no conhecimento dos jazimentos. Em vista disso, registra-se perda de eficiência e geração de produtos fora de padrão do mercado, contribuindo para a ocorrência de descontrole de custos seguido do aumento do próprio risco inerente ao setor, e tornando elevado o insucesso de empreendimentos.

Um outro fator a ser realçado é que a competitividade do mercado exige a adoção de tecnologia específica para cada jazimento, seleção dos equipamentos envolvidos na lavra, e especialização da mão-de-obra que deve ser

aplicada, não sendo compatível com modelos de auto-isolamento e centralização de responsabilidades por pessoal não qualificado tecnicamente.

A demanda apresenta comportamento com tendência nitidamente elástica.

Convém mencionar que, o advento de novas tecnologias que reduzem os custos de aplicação e que permitiu o deslocamento da curva de transformação do produto, sinaliza para o potencial de se alterar a elasticidade da demanda de rochas como substitutas de materiais cerâmicos de revestimento (com maior qualidade, de forma geral), a partir da divulgação sobre a qualidade e preços de produtos disponíveis no mercado.

3.6- Mercado Internacional

Durante o ano de 1995, o comércio mundial destes materiais contabilizou fluxos de moeda que totalizaram US\$ 3,9 bilhões em produção de materiais brutos, US\$ 14,5 bilhões gastos em consumo de produtos acabados e, US\$ 5,9 bilhões envolvidos em exportações.

O comportamento da economia mundial (em ciclo de desenvolvimento) aliado às novas tecnologias de corte de rocha, incrementaram a demanda, bem como transformações no quadro da oferta, resultando no surgimento de novos polos produtores.

A internacionalização e incremento do comércio dos materiais ornamentais foi possível graças ao progresso do sistema de transporte marítimo, para o comércio de blocos em bruto, em conjugação com o desenvolvimento da tecnologia de *container*, no caso de produtos acabados.

Em termos de comércio internacional de pedras naturais, a Tabela 3.7 destaca a liderança do denominado bloco europeu, graças ao desempenho deste setor industrial na Itália, principal exportador e importador mundial.

Tabela 3.7 - Comércio Internacional de Materiais Ornamentais – Exportadores (em 1.000 t)

Bloco	1989		1990		1991		1992		1993		1994		1995	
	Quant	%	Quant	%	Quant	%	Quant	%	Quant	%	Quant	%	Quant	%
Europeu	4213	52,3	4273	50,2	4236	46,9	4368	44,3	4536	43,0	5139	42,7	6853	43,9
Itália	2280	28,3	2203	25,9	2218	24,5	2295	23,2	2547	24,3	2892	24,0	3391	21,8
Espanha	683	8,5	732	8,6	660	7,3	690	7,0	690	6,6	896	7,5	1514	9,7
Portugal	408	5,1	450	5,3	496	5,5	486	4,9	385	3,7	434	3,6	954	6,1
Grécia	217	2,7	202	2,4	214	2,4	254	2,8	269	2,6	283	2,4	189	1,2
Finlândia	228	2,8	242	2,8	233	2,6	249	2,6	269	2,6	306	2,5	287	1,8
Alemanha	153	1,9	173	2,0	190	2,1	215	2,2	221	2,1	192	1,6	332	2,1
França	244	3,0	271	3,2	225	2,5	179	1,8	155	1,5	136	1,1	186	1,2
Asiático	1500	18,7	1592	18,9	1880	20,7	2323	23,5	2879	27,5	3360	25,5	3944	25,4
China	493	6,1	498	6,0	755	8,3	1156	11,7	1571	15,0	1821	14,3	2393	15,4
Índia	478	6,0	630	7,4	692	7,6	788	8,0	983	9,4	1142	8,9	1335	8,6
Coreia Sul	529	6,6	464	5,5	433	4,8	379	3,8	325	3,1	297	2,3	216	1,4
Sul-americano	428	5,3	452	5,3	468	5,2	535	5,4	595	5,7	627	4,9	687	4,4
Brasil	428	5,3	452	5,3	468	5,2	535	5,4	595	5,7	627	4,9	687	4,4
Africano	590	7,3	610	7,2	650	7,2	604	6,1	545	5,2	520	4,1	708	4,6
África do Sul	590	7,3	610	7,2	650	7,2	604	6,1	545	5,2	520	4,1	708	4,6
Médio Oriente	49	0,6	116	1,4	218	2,4	271	2,7	435	4,2	210	1,6	257	1,7
Turquia	49	0,6	116	1,4	218	2,4	271	2,7	435	4,2	210	1,6	257	1,7
Norte-americano	75	0,9	84	1,0	138	1,5	170	1,8	210	2,0	261	2,0	137	0,9
EUA	75	0,9	84	1,0	138	1,5	170	1,8	210	2,0	292	2,4	137	0,9
Diversos	1510	19,0	1742	20,4	1777	19,5	1916	19,5	1593	15,3	3076	24,3	2987	19,2
Outros	1510	19,0	1742	20,4	1777	19,5	1916	19,5	1593	15,3	3076	24,3	2987	19,2
Total	8032	100	8495	100	9053	100,0	9888	100	10492	100	12775	100	15573	100

Fonte: Mercado Internacional de Rochas para fins ornamentais, 1997 - Vol. 4 - p. 40

3.7- Brasil e Comércio Exterior

Inserindo-se dentro do cenário mundial, no período de 1989 a 1995, o Brasil deteve as posições de mercado indicadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Ranking do Brasil no Mercado Mundial, Período 1989 a 1995

Item de Comércio	Posição no Mercado (1989-1995)
- Exportação de Granitos, em blocos	4º.
- Exportação de Mármores, em bruto	7º.
- Fornecedor de Produtos Acabados	11º.

Em relação a oferta mundial, o País participou no mercado em 1995 conforme dados da Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Participação do Brasil na Oferta Mundial, Ano-base 1995

Item da Oferta	Participação no Mercado (%)
- Produção Mundial	5
- Exportação de Granito, em blocos	9
- Exportação de Mármores, em bruto	1
- Exportador de Produtos Acabados	1

Conforme divulgado pelo DNPM, 1996, no ano de 1995 o movimento da balança comercial nacional apresenta importações de 31.085,2 toneladas (com 146 empresas autorizadas a importar) e exportações de 664,7 mil toneladas (180 razões sociais atuando), de acordo com a Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Balança Comercial Brasileira de Rochas Para Fins Ornamentais, em 1995

Produto	Importação 31.085,2 t (%)	Exportação 664.700 t (%)
Granito, em bruto	1,9	90,6
Mármores/Travertino, em bruto	14,0	2,2
Rochas Processadas	84,1	7,2

Para o produtor nacional, a competição de produtos brasileiros torna-se difícil, se não forem utilizados critérios tecnológicos para controle de custos e redução do chamado custo-Brasil, pois, historicamente, tem sido demonstrada uma relação de preços entre material estrangeiro e nacional na ordem de 2,3 : 1,0 (exportações totais), conforme preços médios dos resultados de 1995, Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Relação Entre Preços dos Mercados Interno e Externo, em 1995

Item	Preços Externos (US\$/t)	Brasil (US\$/t)	Relação
- Exportações Totais	464,59	199,71	2,33 : 1,00
- Materiais Processados	900,02	653,24	1,38 : 1,00

Fonte: Arcoverde, W.L., 1997

A análise do comércio exterior (1995) demonstra também, de maneira geral, a diferença entre os preços dos produtos de importação e exportação, conforme Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Relação de Preços na Balança Comercial Brasileira, em 1995

Item	Importação (US\$/t)	Exportação (US\$/t)	Relação
- Totais	538,27	199,71	2,69 : 1,00
- Bens Primários	537,86	146,13	3,68 : 1,00
- Semi-manufaturados	-	394,70	-
- Manufaturados	538,51	653,32	1,00 : 1,21

Analisando-se a evolução da balança comercial relativamente aos mármoreos vê-se que, após o processo de flexibilização das importações, a partir do ano de 1990, o país passou a ter saldos comerciais cada vez menores, alterando seu comportamento de mercado superavitário para deficitário. O déficit comercial atingido desde 1994 tende a aumentar, haja visto que não há saturação do mercado.

Até a “abertura dos portos” existia um mercado onde a oferta, em termos de quantidade e qualidade de produtos era limitada (sem investimentos em lavra e produção), em função da demanda reprimida. Como consequência natural da lei de oferta e demanda, os preços atingiam níveis mais elevados do que os praticados no mercado internacional. Os produtos nacionais advinham, principalmente, dos Estados do Espírito Santo, Bahia e Minas Gerais, e materiais mais exclusivos eram provenientes dos Estados do Paraná e Piauí (mármore brancos), segundo Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Projeção da Balança de Mármore, Até o Ano 2010 (em t)

Ano	1996	1998	2000	2002	2004	2010
Déficit	18.182	27.272	36.363	45.455	54.545	81.818

Fonte: Rossi Jr., B., 1997

Como tendência de evolução do mercado nacional, sua expansão e fortalecimento está condicionada a fatores estruturais, como:

- aplicação de avanços tecnológicos - eficiência e eficácia; otimização da cadeia produtiva, desde a pesquisa até a aplicação de produtos;
- mudanças nas relações de interação existente entre os componentes da oferta e da demanda;
- crescimento e redistribuição de renda.

Posto isto, apesar do desenvolvimento do setor, para que a indústria nacional consolide-se em condições de plena competitividade com o mercado mundial, a disponibilidade de máquinas de última geração representa o primeiro passo, pois são de fundamental importância as seguintes ações:

- transferência e aplicação de conhecimento técnico e científico dos problemas de caracterização geológica;
- escolha de tecnologia racional adequada;
- formação de pessoal em todos os níveis do processo de produção e comércio;

- valorização e transformação dos materiais;
- organização ótima do ciclo produtivo;
- garantia de qualidade; e,
- política comercial eficaz e atuante.

3.8- Aspectos Institucionais

De acordo com o Código de Mineração do Brasil, a atividade de mineração está subordinada à União Federal, através do DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral (ao qual compete a administração dos recursos minerais do País), associado a outros dispositivos legais de competência de municípios e estados federativos, afora a legislação ambiental em vigor no País, possivelmente existente em todas as três esferas da administração pública.

No caso de rochas para fins ornamentais o processo é realizado em duas fases distintas, de acordo com o estágio de atividade:

- regime de autorização de pesquisa: na fase inicial e de análise do jazimento, até seu reconhecimento como massa individualizada de substância mineral ou fóssil com valor econômico;
- regime de concessão: subsequente à fase anterior, quando outorgada a portaria ministerial que permite operacionalizar a lavra do jazimento identificado.

O requerimento de pesquisa fica adstrito a uma área máxima de 50 ha (cinquenta hectares), inexistindo limite quanto ao número de requerimentos solicitados.

A fase de autorização de pesquisa tem prazo entre um a três anos de trabalhos de campo, laboratórios e escritórios, com renovação a critério do

DNPM, para o desenvolvimento de estudos de qualificação, quantificação e determinação de viabilidade econômica de uma ocorrência mineral.

A autorização de pesquisa é um título transferível, podendo ser concedido a pessoas físicas (brasileiros ou estrangeiros naturalizados) , ou empresas instaladas e legalmente habilitadas a atuar no País.

Na fase de requerimento de concessão de lavra apenas as pessoas jurídicas podem se habilitar a exercê-la, sendo que a área pleiteada para lavra é condicionada àquela cujo relatório de pesquisa foi aprovado, não havendo restrições quanto ao número de concessões outorgadas a uma mesma empresa, nem prazo previsto para expiração do título de lavra.

Há um dispositivo legal, denominado de Guia de Utilização, que foi criado na década de quarenta, tratando-se de uma autorização temporária que visa permitir, durante a fase de pesquisa, a retirada e comercialização de materiais para testes e reduzir os investimentos necessários à pesquisa. Este instrumento tem servido para acelerar os processos de entrada em fase de produção mas tem propiciado um aproveitamento inadequado de muitos depósitos, pela não realização de trabalhos de pesquisa propriamente dita.

A legislação ambiental atua concorrente com a mineração, devendo o interessado, desde a fase inicial de montagem do requerimento de autorização de pesquisa, conhecer e analisar as restrições ou proibições das áreas-alvo, no âmbito das três esferas administrativas. A partir de 1986 a mineração é obrigada a realizar estudos sobre os impactos causados pela atividade industrial, Resolução 01 do CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente, e desde 1990 a outorga de títulos, pelo Ministério das Minas e Energia é condicionada às licenças ambientais:

Tipo de Licença	Objetivos
- prévia	planejamento e viabilidade do empreendimento;
- instalação	análise dos programas de desenvolvimento da mina e suas instalações, afora dispositivos de controle ambiental;
- funcionamento	controle dos trabalhos de lavra, beneficiamento, exaustão e ambiental

3.9- Fatores de Análise Para uma Escavação

Numa análise econômica de uma escavação existem seis principais condicionantes que podem ser considerados, divididos em três grupos (Tabela 3.14).

Tabela 3.14 - Condicionantes de Análise Econômica de uma Escavação

GRUPO	CONDIÇÃO
Mercado	- preço do produto; - estimativa do futuro mercado, em termos de quantidade e preço a ser praticado.
Produção	- taxa de produção da mina; - custos de produção.
Geométricos	- reservas e sua distribuição espacial; - relação estéril : minério.

Fonte: Constanzo Jr., J., 1982

- Mercado: sobre estes condicionantes não há forma de interferir para modificá-los.
- Produção: a taxa e custos de produção são definidas desde a primeira fase do planejamento, devendo-se ressaltar que, a primeira só pode ser alterada após o início da produção, a partir da realização de investimentos suplementares, e a outra não pode variar muito ao longo da vida útil da mina.
- Geométricos: são as únicas condições (da jazida e da projeção da cava) que podem sofrer intervenção através da variação de forma da cava, do tipo da rocha e dos ângulos dos taludes.

Por outro lado, numa análise técnica para otimização existem também três grupos de fatores que podem influenciar no planejamento e recuperação da lavra, que são os fatores: geológico-geotécnicos; geométricos; e, operacionais.

- Fatores Geológico-Geotécnicos: são aqueles ligados à gênese e eventos geotectônicos que ocorreram sobre o maciço rochoso, devendo-se ressaltar:
 - ✓ Estruturas: são feições penetrativas do maciço rochoso, primárias (acamamento, contatos litológicos, foliações magmáticas) ou aquelas de origem tectônica, ou de alívio de tensões (xistosidade, falhas, fraturas, diáclases) que apresentam resistências à tração sempre inferiores à da rocha, ou mesmo nula, sendo as principais condicionantes que interferem sobre o planejamento da metodologia de lavra e sua recuperação. Para caracterização e determinação da natureza destas feições torna-se necessário levantar a atitude, persistência, freqüência, espaçamento, rugosidade, abertura, condições de alteração das suas paredes, presença de água, e, quando preenchidas, descrever o tipo e características do material de preenchimento.
 - ✓ Tensões *in situ* (ou virgens): pronunciam-se através da orientação de estruturas geológicas, anisotropia, presença de trincas recentes e de eventos de instabilidade local e regional, configuração do relevo e de

trabalhos que emitem cargas dinâmicas nas proximidades da área analisada.

- ✓ Litologia e estado de alteração: a variação mineralógica impõe maior ou menor resistência ao cisalhamento em superfícies potenciais de ruptura, e, de acordo com o estado de alteração da rocha, essa resistência característica diminui, à medida que aumenta o grau de alteração.
- ✓ Água subterrânea: a presença de água subterrânea resulta na redução de parte da pressão nos contatos de superfícies da rocha, reduzindo o atrito entre elas.
- Fatores Geométricos: são aqueles definidos como condições de contorno do relevo, da forma do jazimento e sua disposição em relação às descontinuidades presentes.
- Fatores Operacionais: utilizando-se qualquer método de exploração, no caso de rochas para fins ornamentais o princípio básico é de emissão mínima de energia dinâmica para minimização de vibrações do maciço rochoso que acarretem a reabertura, propagação e/ou geração de trincas e juntas. Sendo assim, operacionalmente o aumento de concentração de esforços localizados pode ser gerado pela alteração da geometria do relevo e pela velocidade de desenvolvimento da escavação, que também são capazes de induzir o fluxo de água subterrânea.

Sendo assim, os dados geotécnicos relativos ao corpo mineral, desde sua fase preliminar de ocorrência até a exaustão do corpo mineral, devem ser buscados e atualizados em todas as fases do projeto mineiro, sendo prioritárias as informações durante a fase de pesquisa, conforme:

- 1- Reconhecimento e pesquisa preliminar - realizar mapeamento geológico preliminar de superfície, detalhando as condições e variações litoestruturais, em escala conveniente:

- a- estruturas: descrever as lineações e descontinuidades estruturais, através de direção e mergulho; extensão; frequência e espaçamento; persistência; abertura e tipo de preenchimento; rugosidade; evidências de percolação de água, e condições de alteração de suas faces;
 - b- litologia: detalhar a natureza; forma de ocorrência; composição de solos e rochas, e as relações de contatos;
 - c- geomorfologia: analisar as formas de relevo, principalmente as cicatrizes de deslizamentos; variações de inclinações de taludes naturais e movimentos de massa.
- 2- Detalhamento da pesquisa preliminar - realizar sondagens para obter parâmetros de seus testemunhos: litologia; parâmetros geotécnicos; informações sobre o comportamento hidrológico do maciço rochosos; e, amostragem para ensaios:
- a- descrição litológica de testemunhos: descrever os grupos litológicos homogêneos, em termos de propriedades geotécnicas e de suas características mineralógicas, petrográficas e estruturais;
 - b- parâmetros geotécnicos - no caso de rochas ígneas e metamórficas, descrever o estado de alteração dos tipos litológicos, de acordo com análise macroscópica de propriedades físico-químicas e mecânicas da rocha; se se trata de litologia sedimentar avaliar a coerência do material, através de resistências ao impacto e ao risco.
 - b.1- recuperação de testemunhos - é a relação percentual entre a soma dos comprimentos de sondagem e o avanço de cada manobra efetiva;
 - b.2- frequência de fraturas naturais: inicialmente é recomendável que as fraturas sejam contadas em trechos homogêneos e isofraturados. Todavia, se deve procurar estabelecer a diferença entre fraturas naturais e aquelas induzidas por fatores operacionais; sendo assim, a frequência de fraturas naturais é definida pelo número destas que

interceptam a coluna de perfuração; de maneira geral, em áreas cujo objetivo seja de exploração de blocos, trechos com frequências superiores a 0,67 fraturas/ metro são inviáveis; e, sempre que possível, se deve descrevê-las com suas atitudes preferenciais, conforme item "2.a";

b.3- R.Q.D. (Rock Quality Designation) - trata-se de índice quantitativo, sendo uma variação do cálculo de "recuperação do testemunho", pois só leva em consideração as seções naturais com comprimentos superiores a duas vezes o diâmetro do furo, sendo definido conforme recomendações da I.S.R.M. (International Society for Rock Mechanics), que sugere como NX (54 mm) o diâmetro mínimo utilizado.

c- comportamento hidrológico do maciço - deve-se registrar as cotas de ocorrências de água em furos de sondagem, durante sua execução e após 24 horas de concluída a perfuração, bem como as seções onde ocorrem perda de fluidos de perfuração e os períodos de ocorrências pluviométricas;

d- amostragem para ensaios preliminares dos materiais - amostras de testemunho-padrão devem ser utilizadas para caracterização do maciço local, sendo submetidas a ensaios de:

- resistência mecânica: compressão simples, tração e impacto de corpo duro;
- deformabilidade: módulos de deformabilidade estático;
- desgaste por abrasão (Amsler);
- dilatação térmica linear;
- índices físicos: massa específica aparente seca e saturada; densidade real e aparente; porosidade; absorção de água.

e- amostragem para ensaios preliminares de placas - amostras retangulares de materiais devem ser elaboradas para submeter-se a cortes e polimentos de chapas, em diferentes direções, sendo submetidas a testes de:

- cores e suas variações;
- brilho; e,
- alterabilidade a agentes ambientais agressivos: ciclagem artificial; ataque químico; e, congelamento e degelo.

3.10- Metodologias Atuais de Pesquisa de Rochas Para Fins Ornamentais

Na atualidade os depósitos de rochas aplicadas como materiais de construção são prospectados de maneira análoga a outros tipos de depósitos minerais. Neste aspecto, todavia, os trabalhos envolvendo afloramentos rochosos são mais simples e não envolvem tantas análises. Se a formação rochosa apresenta-se rija, maciça, e propensa a formar blocos, satisfaz às exigências preliminares.

O início desta fase consiste na pesquisa bibliográfica, que precede os trabalhos de campo, para reduzir o tamanho da área-alvo, incluindo-se o potencial geológico para os dados litológicos e estratigráficos, afora estudos de fontes históricas e arqueológicas e das restrições ou limitações impostas pela legislação ambiental. Investigam-se mapas e fotografias aéreas para coletar informes sobre trabalhos anteriores e feições geológicas. Durante a fase de reconhecimento é interessante se ter em mente que, de forma geral, devido ao baixo consumo destes materiais, as pedreiras ocupam áreas restritas. Por exemplo, uma área de 1,5 hectares pode suprir a demanda de rocha por 25 anos, caso o pacote aproveitável tenha 5,0 metros de espessura (Jefferson, D. P., 1993).

O mapeamento geológico da área deve apresentar a relação de todas as formas de ocorrência, posição estratigráfica, distribuições e as relações estruturais dos depósitos minerais conhecidos. Estes dados servem como guia geral para prospecção ou desenvolvimento dos depósitos.

Segundo Diehl et ali, 1996, para a indústria, a necessidade de racionalização e introdução de novas tecnologias, para atendimento da demanda de volumes cada vez mais elevados e alta qualidade de blocos dentro de padrões internacionais, tem levado às análises de depósitos de acordo com parâmetros geológicos que interferem no valor *in situ* dos materiais, conforme:

- modelo e densidade dos sistemas de juntas e planos de partição;
- homogeneidade da rocha, em termos de textura e estrutura;
- consistência e distribuição de cor;
- tamanho e forma dos grãos do corpo mineral;
- modelo e direção de partição geoparamétrica.

Diversos critérios de classificação dos depósitos estão em uso (vide Tabela 3.15).

Tabela 3.15 - Critérios de Classificação de Depósitos de Rochas Para Fins Ornamentais, Segundo Junge, T. - 1996.

Critério de Classificação	Denominação
<ul style="list-style-type: none"> - Modo de Ocorrência (baseado na forma do corpo) 	<ul style="list-style-type: none"> - Batólitos - Domos - Stocks - Sheets e Sills - Diques - Matacões
<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de Rocha - (de acordo com a composição modal, comumente o diagrama de Streckeisen) 	<ul style="list-style-type: none"> - Gabro a Monzogabro - Granito a Monzogranito - Álcalis Granitos - Sienito - Foiaito - Diorito - Granodiorito - Quartzo-Diorito
<ul style="list-style-type: none"> - Modelo e Densidade do Sistema de Juntas e Recuperação de Blocos 	<ul style="list-style-type: none"> - Depósitos com sistemas de fraturas limitados e taxa de recuperação máxima de 8%. - Depósitos com sistemas de fraturas espaçados e taxa de recuperação máxima de 20%. - Depósitos com sistemas de fraturas subordinados e taxa de recuperação máxima de 40%. - Depósitos com sistemas de fraturas subordinados e espaçados, permitindo taxa de recuperação máxima de 50%.

Mesmo sendo considerada como de elevado custo para a atividade, a efetivação de campanha de sondagem é importante para se definir a natureza tridimensional do depósito, e a execução de furos com diâmetro $\varnothing \geq 54$ mm permite obter-se amostras para testes físicos e químicos. Todavia, as informações obtidas são muito limitadas dentro do contexto da escala de produção de blocos, devido à variação do padrão do material e / ou as irregularidades dos sistemas de juntas.

Amostragem em grandes cortes permite maiores e mais seguras informações quanto ao modelo de juntas e às variações laterais na rocha, sendo

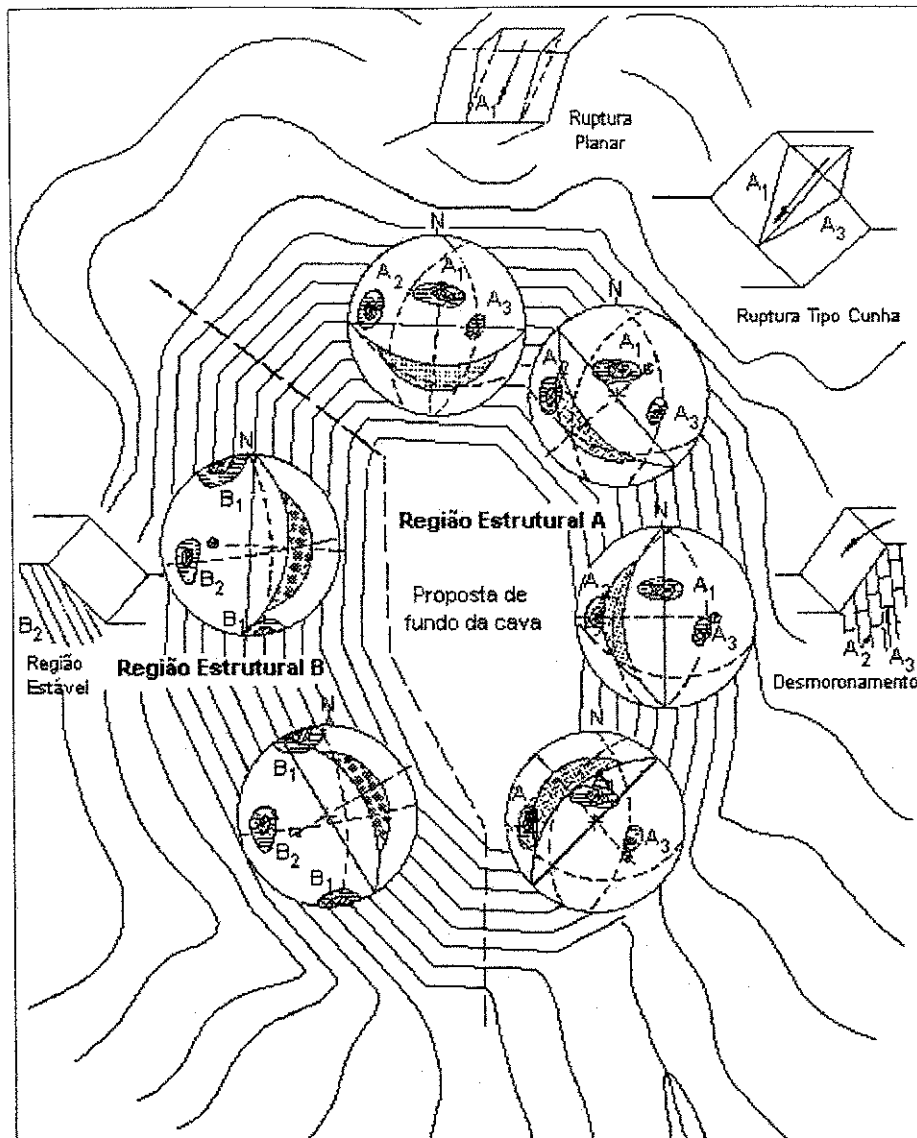
indicado um mínimo de 4 cubos de 40 cm de aresta para cada camada; Ross e Butlin, 1989, sugerem que, para materiais homogêneos, deve-se retirar entre 4 e 6 amostras cúbicas de dimensões citadas.

Para o cálculo de reservas deve-se considerar o capeamento, a perda direta na lavra e as irregularidades naturais geradas nas seis faces dos blocos produzidos, permitindo-se definir os volumes a serem mobilizados e as relações de recuperação efetiva da lavra.

✓ O mapeamento estrutural, com descrição das características (frequência, persistência, etc.) das discontinuidades presentes no maciço, deve preceder o planejamento da abertura inicial pois permite posicionar-se a frente de acordo com os planos existentes para otimização da recuperação da lavra e prevenir-se quanto a problemas de instabilidade das frentes. A Figura 3.2, exemplificada a seguir, representa um modelo de análise de um local quanto à instabilidade, utilizando o diagrama de Schmidt.

A partir de 1994 está sendo adaptada a utilização de GPR – Ground-Penetrating Radar – para análise do comportamento lito-estrutural de maciço, em três dimensões, conforme trabalho desenvolvido no sudeste da Suíça, em uma pedreira de rocha para uso ornamental (Leventina gneiss) – Iragna Quarry, conforme descrição de Grasmueck, M., 1996. As técnicas de georadar são baseadas no princípio de reflexão de ondas de alta frequência nas regiões heterogêneas limites de sub-superfície, apresentando alta resolução em investigações geológicas e geofísicas em profundidades menores que 50 metros.

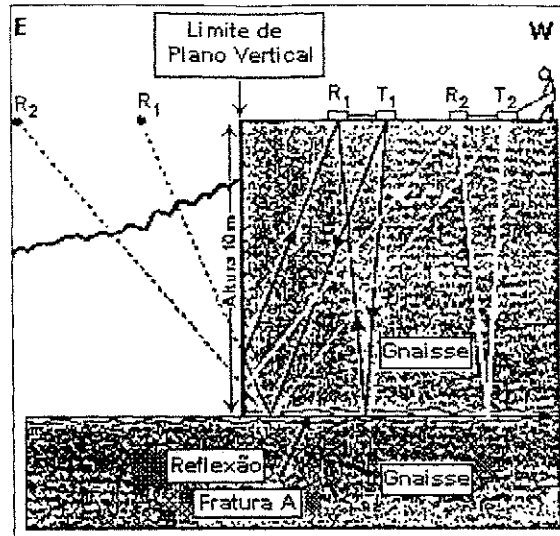
Esta técnica deve ser aperfeiçoada para definir o planejamento das atividades, em fase preliminar de coleta de dados, servindo-se de instrumento para discretização do corpo mineral, principalmente quanto ao seu comportamento estrutural.



(Fonte: Hoek, E. e Bray, J. W. 1981)

Figura 3.2- Modelo de análise de estabilidade de área

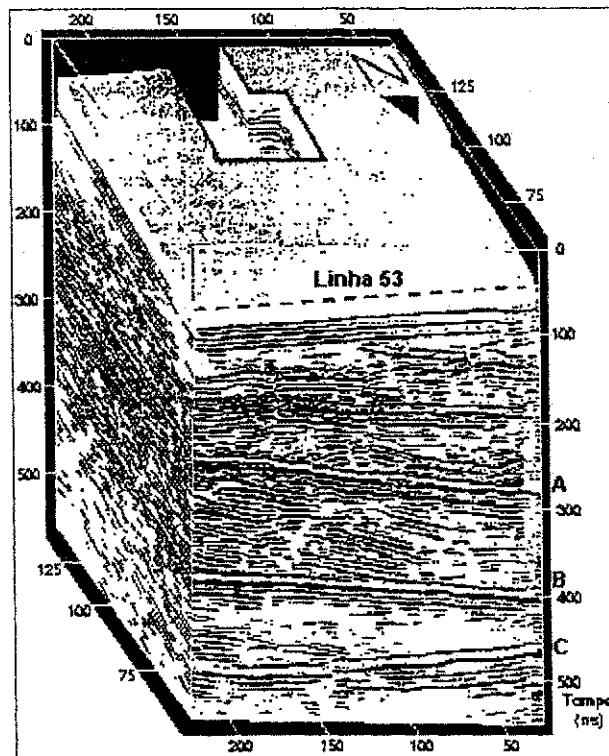
A Figura 3.3 apresenta uma interpretação das reflexões de descontinuidades sub-horizontais, em uma frente que possui 10 m de altura de bancada.



Fonte: Geophysics, 1996 – v 61

Figura 3.3- Interpretação de eventos observados em um perfil de Iragna Quarry.

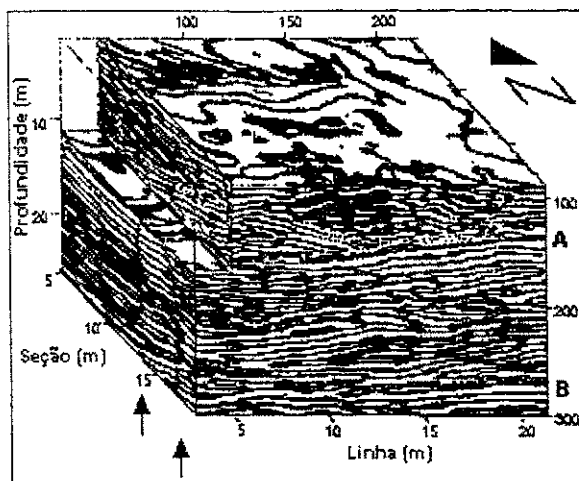
A técnica permite o processamento da topografia de superfície em imagem em três dimensões, mostrando o comportamento espacial dos planos de reflexão das discontinuidades, Figura 3.4.



Fonte: Geophysics, 1996 – v 61

Figura 3.4- Imagem tridimensional, realçando os planos A, B e C.

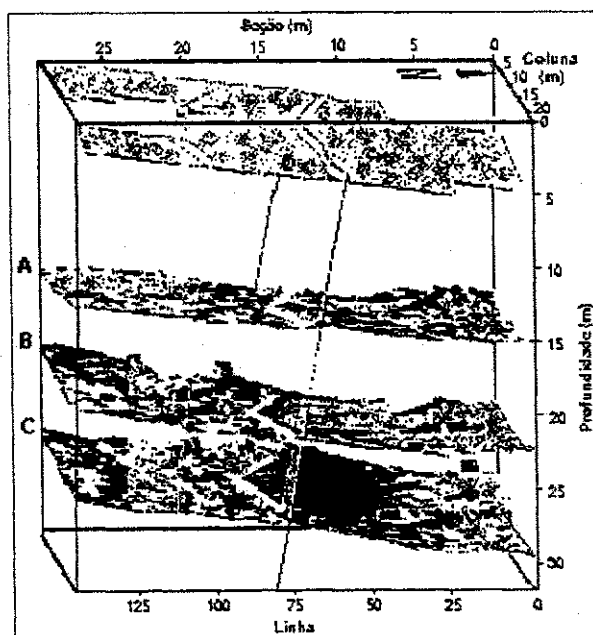
Na Figura 3.5, as setas ascendentes interpretam as zonas de reflexão sub-verticais de fraturas existentes, sendo destacada a fratura sub-horizontal desde a praça até o ponto A.



Fonte: Geophysics, 1996 – v 61

Figura 3.5- Interpretação das reflexões verticais e de fraturas sub-horizontais.

A interpretação desta técnica permite destacar além dos principais planos de fraturas sub-horizontais, em seção vertical (A, B e C), a representação de planos semi-verticais (nas curvilíneas seções de 10 e 20 m), Figura 3.6.



Fonte: Geophysics, 1996 – v 61

Figura 3.6- Vista tridimensional da superfície do terreno e dos planos de fraturas sub-horizontais e semi-verticais

Por fim, para caracterizar as pedras naturais, nas diversas fases do processo produtivo e de aplicação, são sugeridas as realizações de análises e ensaios de acordo com normas da ABNT, ASTM e DIN, conforme Tabela 3.16.

Tabela 3.16 - Ensaios de Caracterização Tecnológica

FASE / USO	ENSAIOS								
	Petrografia	Índices Físicos	Resistência ao Desgaste	Resistência ao Impacto	Resistência à Compressão	Resistência à Flexão	Módulo de Deform. Estática	Dilatação Térmica Linear	Alterabilidade
Extração	■	■	■	■					
Beneficiamento	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Revestimento externo	■	■	■			■		■	■
Revestimento interno	■	■	■			■		■	
Pisos	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Colunas e pilares	■	■			■	■	■	■	■
Pedestais	■	■			■		■		■
Tampos de mesas e de balcões	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Pias	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Soleiras	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Esculturas	■	■	■						■
Cilindros (granitos) ^a	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Mesas e aparelhos de desempenho	■	■	■	■	■	■	■	■	■

^a Utilizados nas indústrias de papel, alimentos, etc.

Fonte: IPT- 1990, Catálogo de Rochas para fins ornamentais, São Paulo

Nota: os ensaios de alterabilidade (ciclagem artificial, resistência ao ataque químico de substâncias, congelamento e degelo) ainda não foram normatizados por qualquer associação, sendo realizados por institutos especializados.

3.11- Metodologias de Lavra

As pedras naturais são produzidas com métodos de exploração de maciços aparentemente econômicos, mas altamente destrutivos. Recentemente com o advento da tecnologia de corte contínuo e sobretudo com o aumento da sensibilidade quanto aos valores de proteção ambiental, os métodos clássicos de exploração por desmoronamento de blocos têm registrado uma gradual mas decisiva redução e hoje são praticamente limitados a poucos casos isolados, para os quais existem condições particularmente favoráveis de aplicação: abundância dos matacões, posição geográfica isolada, espaço disponível para o bota-fora, fatores estruturais vantajosos e limitado valor do material.

O processo de transformação dos sistemas de grandes bancadas e os métodos de corte estão extremamente acelerados pelo progresso científico e industrial, de acordo com o desenvolvimento da tecnologia e de máquinas, e ao aperfeiçoamento do modelo organizacional, segundo o tipo de rocha e, em particular, das suas características físico-mecânica-estruturais.

A adoção do sistema de desmonte de maciços por grandes bancadas e aquelas muito seletivas, por bancos baixos, depende da morfologia geral do terreno, das características da formação rochosa, da estratificação na rocha sedimentar e da presença de superfícies de descontinuidades sub-horizontais.

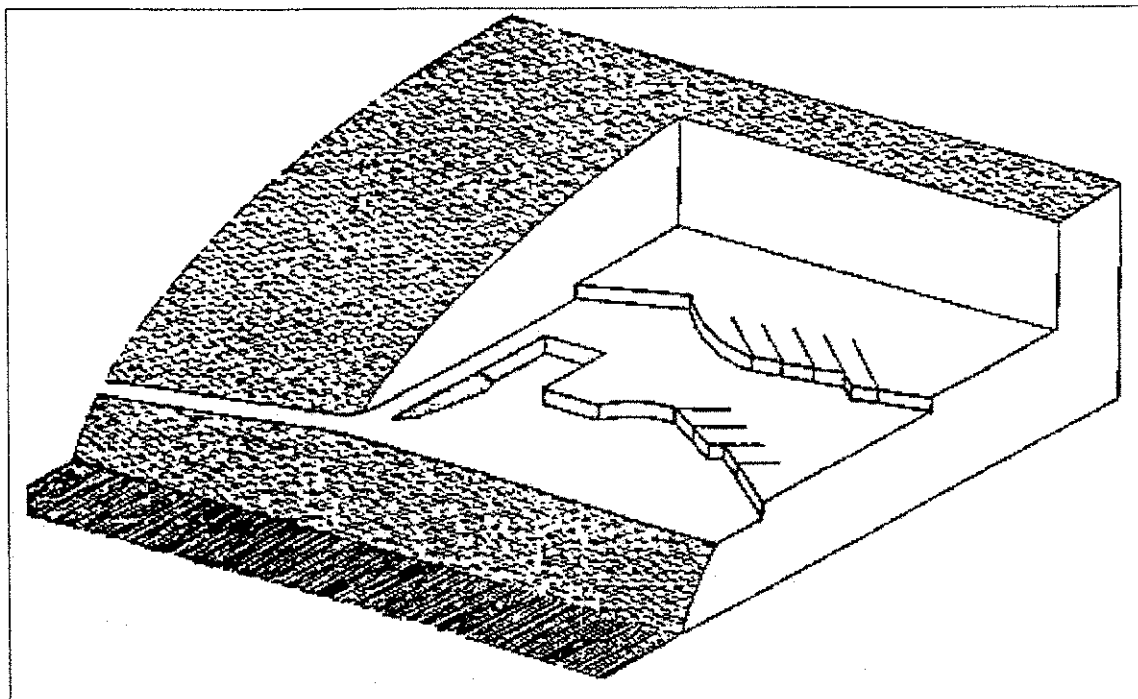
Todavia, o fator determinante na adoção do sistema de extração é, certamente, a exigência da seleção dos blocos por dimensões, forma e qualidade.

Em linhas gerais, o princípio de exploração com bancada baixa é o mais indicado pois permite:

- muita flexibilidade, pois a orientação das frentes pode ser facilmente modificada em função de questões estruturais;
- variação de níveis mais elevados de produtividade através do incremento de mecanização e da adoção dos ciclos de trabalho normalizados;

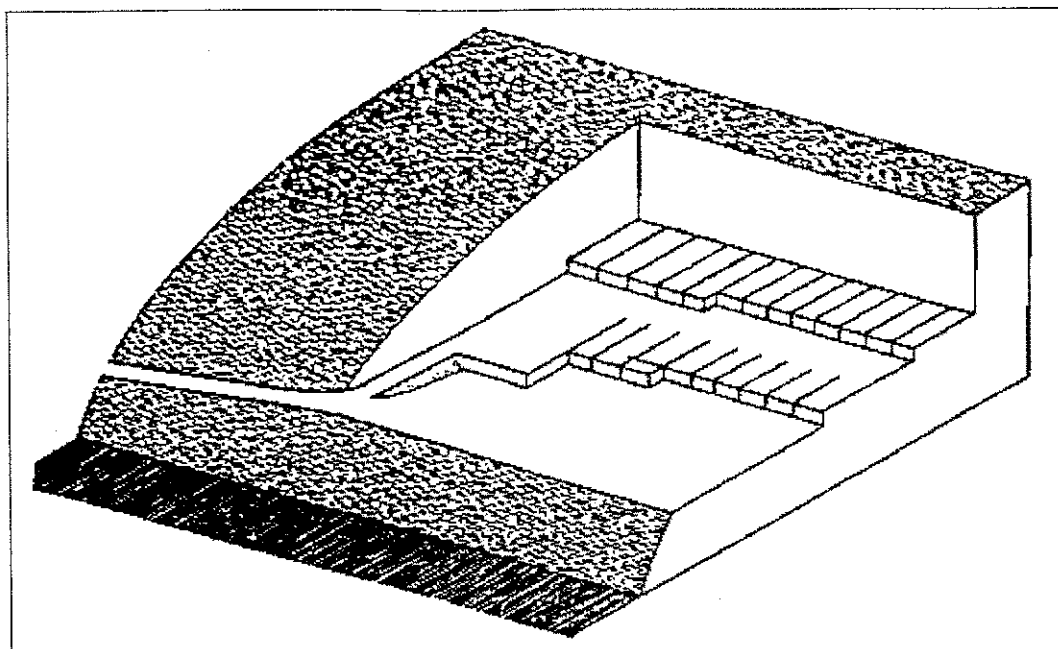
- incrementar a segurança, devido ao menor perigo de queda de pessoal com resultados graves, ao grande controle de estabilidade da frente, e por motivos do impacto ambiental causado pela atividade extrativa (graças a restrita superfície exposta à vista durante a atividade de extração).

Para o caso de bancadas baixas, estas comportam dimensões de bloco diretamente do maciço, com alturas geralmente correspondentes entre 1 e 2 metros, representadas nas Figuras 3.7 e 3.8.



Fonte: Ciccu, R. - 1993.

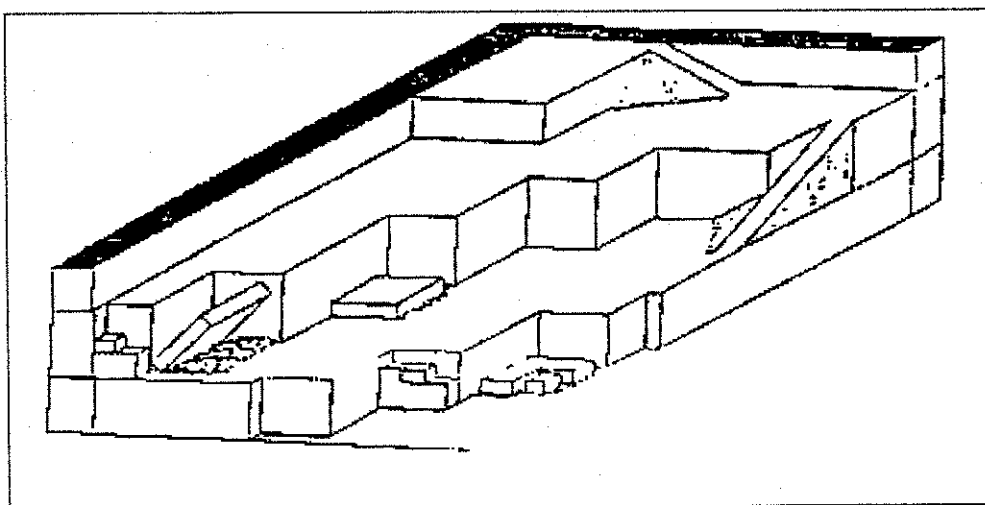
Figura 3.7- Esquema de bancada baixa, destacando-se diferentes direções de orientação das frentes.



Fonte: Ciccu, R. - 1993.

Figura 3.8- Esquema de orientação de bancada baixa com uma direção de orientação

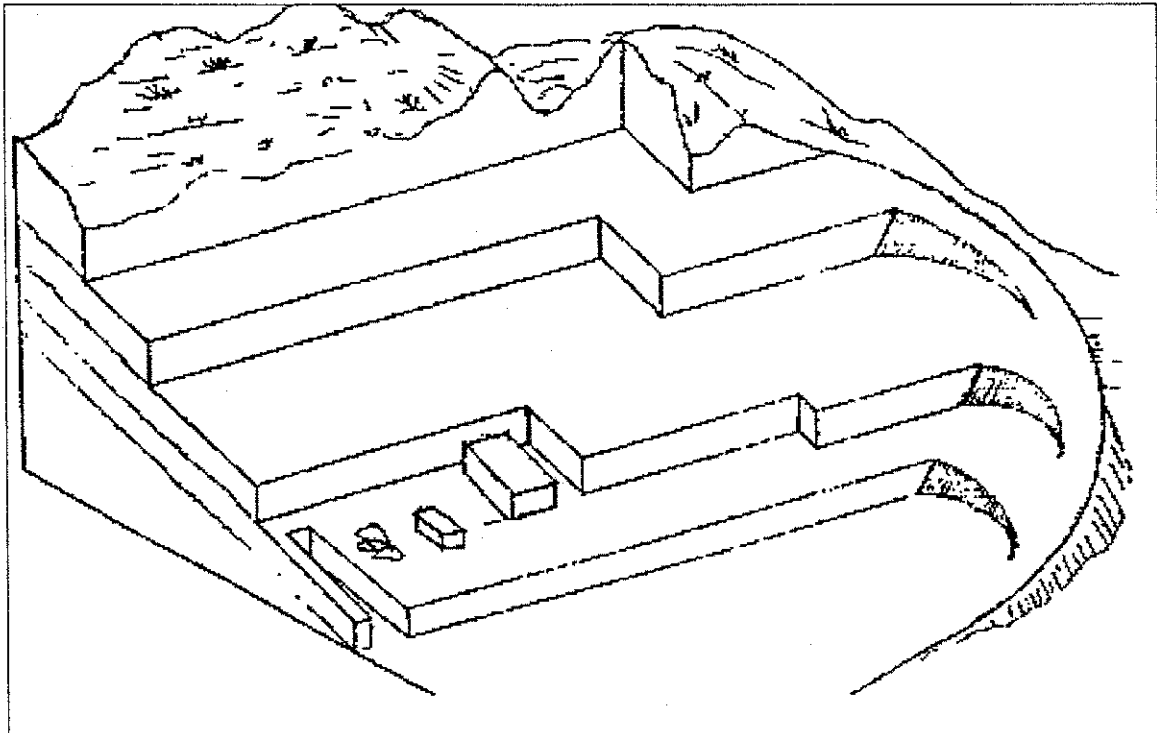
Por outro lado, a seleção dos blocos comercializáveis se traduz em uma redução importante da produtividade, pela qual a exploração é preferível através do sistema de grandes bancadas, Figura 3.9, onde a obtenção do bloco final vem através de operações de sucessivas subdivisões, e cujo número é estreitamente ligado à característica mecânica e estrutural do material extraído.



Fonte: Ciccu, R. - 1993.

Figura 3.9- Esquema de exploração utilizando grandes bancadas.

Na exploração realizada por grandes bancadas a altura da frente pode variar entre 10 e 15 m, Figura 3.10, para as rochas graníticas, sobretudo quando se recorre a métodos de exploração baseados em perfuração (corte contínuo, divisões por cunhas ou dispositivos de espaçamento, e corte dinâmico com explosivos).



Fonte: Ciccu, R. - 1993.

Figura 3.10- Esquema de exploração com bancadas altas.

3.12- Tecnologias de Exploração

A definição da tecnologia de exploração depende, essencialmente, da natureza da rocha. Todavia, antes que se adaptem aos tipos de rochas a serem trabalhadas, nem todas as tecnologias são perfeitamente confiáveis e substituíveis devido às restrições geométricas e operacionais que se verificam em algumas pedreiras (Ciccu, R., 1993).

As principais tecnologias, hoje em uso na exploração de jazimentos de rochas para fins ornamentais são as seguintes:

A- Tecnologia Tradicional:

- Exploração por escorregamento (EE)
- Desmonte com furo unitário a explosivo (DE)
- Perfuração contínua (PC)
- Perfuração seqüenciada e separação com dispositivos em cunha (PS)
- Perfuração coplanar e paralela e corte dinâmico (PP)
- Cunhas mecânicas ou manuais sem perfuração (SP)

B- Tecnologia Moderna (de corte contínuo):

- Fio helicoidal (FH)
- Fio diamantado (FD)
- Serra a corrente (SC)
- Disco dentado (DD)
- Corte a maçarico (CM)
- Corte com água a elevada velocidade (JA)
- Corte com abrasivo ou fio com disco diamantado (AF)

A Tabela 3.17 ilustra, sinteticamente, a situação atual e as perspectivas das tecnologias de exploração de granitos.

Tabela 3.17 - Quadro de Compatibilidade de Diversas Tecnologias (adaptada de R. Ciccu, 1993)

Método de Explotação	Tecnologia							
	Tradicional					Moderna		
	EE	DE	PC	PS	PP	FD	CM	JA
1- Bancadas Altas								
- Corte frontal			+			++	+++	
- Corte primário								
- horizontal		+++			+++			XX
- vertical		+++		+	+++	+		X
- Corte secundário				++	++	+		X
- Acabamento de blocos				+++	+			XXX
2- Bancadas Baixas								
- Corte horizontal					+			X
- Corte vertical			+	++	+		++	XX
3- Fatias Verticais								
- Corte Primário	+	++					+	
- Esquadrejamento		+	+++					
4- Lavra Seletiva								
- Corte Primário			+	+				
- Esquadrejamento				+				
5- Lavra de Matações								
- Divisão		+		++				
- Esquadrejamento		+		+				

Legenda:

Frequência de Aplicação

+++ = difundida
 ++ = subordinada
 + = rara

Perspectiva Futura

XXX = notável
 XX = discreta
 X = marginal

Tecnologias

EE = Escorregamento
 DE = Desmonte a Explosivo
 PC = Perfuração Contínua
 PS = Perfuração Sequenciada
 PP = Perfuração Paralela
 FD = Fio Diamantado
 CM = Corte a Maçarico
 JÁ = Jato de Água

3.13- Tecnologias de Exploração de Granitos e Mármore

Atualmente o método de escavação mais difundido é aquele baseado no uso de explosivos, enquanto é quase inexistente a aplicação do fio helicoidal (bastante difundido até a década de 1960), sobretudo devido ao alto custo do abrasivo. Os outros métodos abaixo são aplicados em condições muito particulares.

Para os cortes em elevações e os sucessivos trabalhos em cava de rochas para fins ornamentais, os métodos aplicados com maior frequência são os seguintes:

- desmonte por escorregamento;
- corte com explosivo;
- corte com fio helicoidal e carborundo;
- corte com chama;
- perfuração contínua;
- fraturamento com aparelhagem mecânica ou hidráulica.

Os princípios básicos de aplicação dos principais métodos tradicionais são:

3.13.1- Exploração por Escorregamento (EE)

Tecnicamente aplicável e economicamente conveniente para os casos de jazimentos em zona montanhosa, escarpada (condições topográficas) e com presença de fraturas ou planos de estratificação subverticais (condição geoestrutural) que permitem o isolamento de prismas de rocha através de simples corte da base. A produção primária fornece blocos de variados volumes e formas, sobre os quais são procedidos serviços secundários e operações de redução e regularização. O projeto, preparação e execução pressupõem um perfeito conhecimento das características do maciço e sobretudo da sanidade e

extensão das descontinuidades existentes e a previsão das linhas preferenciais do fraturamento gerado pelo explosivo.

3.13.2- Desmorte com Explosivo (DE)

É o método preferido por sua versatilidade (adaptável a vários projetos de cavas, mesmo em presença de bancadas irregulares), facilidade de execução, bom padrão de segurança, recuperação aceitável e por apresentar um custo operacional muitas vezes inferior a qualquer dos sistemas alternativos. Um argumento principal em discussão é sobre o tipo de explosivo que se deve empregar para realizar o corte da bancada do maciço e suas sucessivas subdivisões. As experiências norte-européias e finlandesa orientam que é preferível o uso de explosivos de baixa velocidade de detonação (até o limite da classe deflagrante, < 1500 m/s - energia semi-estática) confeccionados em cartuchos de pequeno diâmetro (11 a 17 mm) e iniciação a cordel detonante, permitindo a realização de dois ou três planos de corte de forma simultânea. Para dimensionamento da carga deve-se ter em mente que, para uma dada rocha a resistência à tração varia segundo a orientação do corte, conseqüentemente, em função da direção do corte se varia a carga limite.

Enquanto que uma rocha estruturalmente homogênea, ou com plano de menor resistência pouco pronunciado, exige a adoção de um explosivo mais forte e veloz; naquela que apresentar heterogeneidade ou linhas de fraturas evidentes usam-se explosivos mais lentos e menos potentes.

A carga efetiva deve ser superior a carga limite, mas sem excesso que possa danificar o material do entorno do plano de corte. Normalmente a referência é a carga linear, expressa como massa explosiva por unidade linear de furo (≤ 10 g/m para o corte com cordel detonante executado em furo simples, até 150 a 200 g/m para operações de grandes volumes com explosivos de baixa velocidade, carregados em furos de diâmetro superior a 50 mm).

É muito importante o controle dos parâmetros de desmorte para incrementar a precisão do corte (evitando-se o risco de corte incompleto ou de

fraturamento excessivo), como forma de controlar os custos de perfuração que, no caso do granito representa, geralmente, a maior incidência na operação.

A experiência sugere um limite no campo de variação do espaçamento dentro do intervalo de 4 a 8 vezes o diâmetro do furo, mas não são raros os casos de distâncias maiores, sobretudo quando os planos de mais fácil corte são bem definidos.

Geralmente é mais vantajoso se associar a operação dos dois cortes principais das bancadas (vertical e horizontal) com este método, enquanto que os cortes laterais são feitos com maçarico.

3.13.3- Perfuração Contínua (PC)

Executado através da realização de furos justapostos de forma a obter-se um plano de ruptura contínuo, ou deixando um diafragma suficiente que permita um destaque fácil dos blocos por tração. A necessidade de um perfeito paralelismo e coplanaridade de furos gera uma limitação do método, principalmente quando se produz blocos diretamente do maciço. Neste caso inexitem subdivisões intermediárias e as faces apresentam um bom refinamento, sendo a aspereza proveniente apenas das canaletas dos furos, afora que os blocos resultantes não apresentam danos.

A aplicação desta metodologia pode ser a solução para o caso de granitos particularmente frágeis à ação de explosivos ou com características favoráveis de perfurabilidade (baixo teor de quartzo).

A perfuração é realizada em furos de pequeno diâmetro para limitar a ação e os limites de vibrações.

3.13.4- Fraturamento com Aparelhagem Mecânica ou Hidráulica (PS)

O método é indicado sobretudo para a fase final de recorte e acabamento dos blocos ou nas operações de lavra de matacões, sendo dificilmente aplicado para execução de cortes de superfícies maiores.

O esquema geral de aplicação inicia com a perfuração com pequeno espaçamento eqüidistante (10 a 15 cm) e com profundidade compatível com a altura do corte, para garantir uma distribuição uniforme da força aplicada às paredes das superfícies. O plano de corte, em geral, coincide com um dos planos de menor resistência.

Nos furos são introduzidos dispositivos que consistem de cunhas metálicas ou em punções munidos de aletas opostas, tensionadas alternadamente com marretas para atingir a ruptura do bloco no plano dos furos. Em substituição a este método mecânico pode-se utilizar aparelhagem hidráulica, ou pneumática, consistindo de dispositivo de duplo efeito, coligado a um sistema de pressurização de fluido hidráulico ou ar comprimido e agindo sobre o acoplamento entre a cunha e a contra-cunha.

A pressão de operação de 50 MPa permite a transmissão de uma força de destaque de 800 a 4000 KN, suficiente para vencer a resistência da rocha à tração. A superfície de destaque apresenta rugosidade da ordem de 4 a 6 cm, mas os blocos apresentam-se íntegros, a menos que exista fraturamento preexistente.

Entre as técnicas modernas (corte contínuo) de exploração, aquelas que apresentam uma imediata aplicabilidade no campo industrial são as tecnologias com fio diamantado, com uso de água de elevada velocidade, e de corrente diamantada.

3.13.5- Corte com Fio Helicoidal (FH)

Esta tecnologia desenvolvida na Itália no princípio do século passado para o corte de mármore e travertinos, dominou a exploração de rochas brandas carbonáticas e ígneas com baixo teor de quartzo (gabros, dioritos, etc.) por dezenas de anos. Atualmente está em declínio com o advento do fio diamantado, tendo limitações quanto à sua aplicabilidade em granitos e rochas eruptivas devido a fatores tais como: elevado custo do material abrasivo, baixa produtividade e rendimento do sistema, alta incidência de mão-de-obra (baixa mecanização) e dificuldade de operação, particularmente quanto à distribuição do abrasivo no interior e ao longo do corte, e rigidez organizacional da operação da cava. O consumo médio de abrasivo (carborundo) em rocha granítica é da ordem de 10 Kg/m².

A seguir são apresentadas fotos que ilustram a utilização desta técnica, aplicada ao mármore branco do Estado do Espírito Santo, no Município de Cachoeiro do Itapemirim, destacando-se a vista geral de lavra em meia encosta, Foto 3.1, efetuada em níveis múltiplos de extração, e detalhe de duas bancadas altas, onde, além do desmonte primário é destacado o serviço de desbaste de blocos, Foto 3.2.

As fotos complementares ilustram o problema da rigidez locacional e distribuição da polpa (Foto 3.3) e a aplicação de tecnologia mista de corte (Foto 3.4).

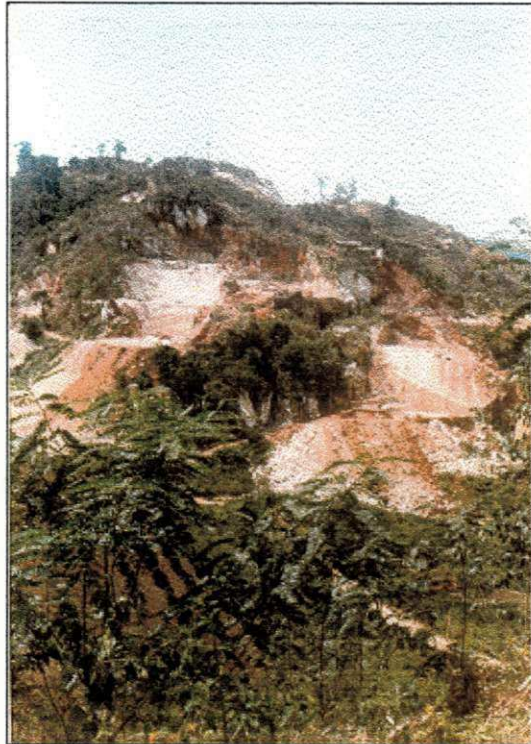


Foto 3.1- Vista geral de lavra, em meia encosta, efetuada em níveis múltiplos de extração.



Foto 3.2- Detalhe de duas bancadas altas, onde, além do desmonte primário é destacado serviço de desbaste de blocos.



Foto 3.3- Vista de poço para instalação de desvio de fio helicoidal (roldana fixa), tendo ao fundo água para resfriamento e distribuição da polpa de granalha.



Foto 3.4- Praça de trabalho com conjugação de método de perfuração contínua com fio helicoidal (a fratura oblíqua serviu de plano para formação de rampa de acesso a nível independente).

3.13.6- Corte com Fio Diamantado

O emprego do fio diamantado para o corte de materiais carbonáticos é considerado como uma tecnologia de corte de tradição consolidada que tem substituído outros métodos de corte, em particular aquele com fio helicoidal (que não será abordado). Para as rochas carbonáticas é possível se obter velocidades do corte que atingem até 14 m²/h, sendo assegurada uma recuperação muito elevada, uma notável flexibilidade e uma grande simplicidade de implantação.

Um dos problemas do uso do fio em matrizes silicosas é o desgaste das "pérolas", onde o diamante é depositado por sinterização e eletrodeposição (permitindo uma maior durabilidade). A concentração de materiais abrasivos durante o corte, aumentando um desgaste irregular das pérolas diamantadas, o que pode ser superado, ou reduzido, com a plastificação do fio que impede a rotação relativa e constitui uma proteção ao atrito da partícula abrasiva.

Todavia, devido à notável solitação mecânica e ao aquecimento do fio, que se verifica principalmente no último estágio de corte, o plástico se deteriora e perde sua característica de proteção e sustentação, propiciando rotação da pérola e infiltração da polpa abrasiva com a conseqüente ruptura do cabo (um uso cuidadoso do fio pode contribuir para a solução destes problemas).

Outra questão delicada, no uso desta técnica em rochas graníticas, consiste na necessidade de garantir uma rotação do fio em torno de seu próprio eixo para assegurar um desgaste uniforme da pérola diamantada, ou seja, não haja consumo de um só lado da peça que, quando ovalada, não deve ser reutilizada. Controlando-se os problemas enunciados, a vida-útil do fio permite uma produtividade de 3 a 5 m² de corte / m de fio.

A preparação de corte resume-se à execução de furos horizontal e vertical colimados. O consumo de água para resfriamento é de cerca de 30 litros/minuto para um corte de 50 m²; evitando-se trabalhar com deficiência de água devido ao aquecimento excessivo do fio. Por esta razão, a aplicação desta técnica em cavas de granito é dirigida a cortes verticais de bancadas, tendo em

vista que é praticamente impossível realizar-se uma adequada circulação de água em cortes horizontais.

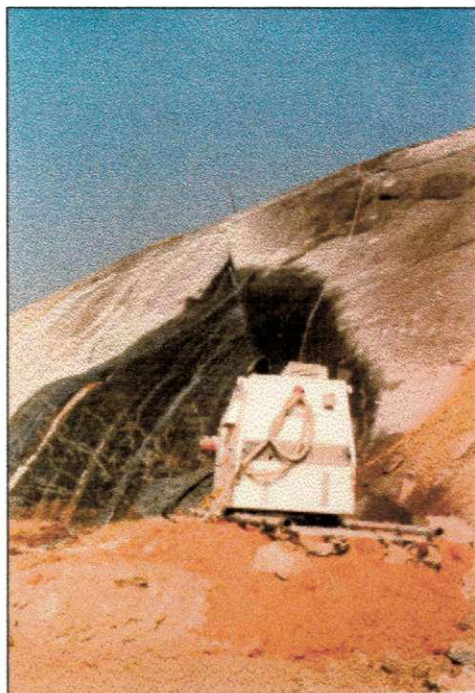


Foto 3.5- Execução de corte em maciço, destacando-se a alimentação de água para resfriamento do fio (Carmo da Mata / MG - Kynawa / Fontex)

A espessura do corte é de 11 mm e as superfícies expostas são praticamente lisas. O sistema não produz qualquer dano ao maciço ou ao bloco, todavia, apesar de lisa as superfícies não são perfeitamente planas, podendo apresentar ligeira concavidade ou convexidade.

Os custos de mão-de-obra são reduzidos, devido ser necessário apenas um operário para manuseio do equipamento.

A velocidade de corte é bastante elevada, estando no intervalo de 3 a 5 m²/h, sem se considerar a fase final do corte, onde a produtividade é progressivamente reduzida devido à tendência de curvatura do fio e ao aumento de sua solitação.

Comparativamente com outros métodos de extração, principalmente em regiões próximas a locais habitados, as vantagens da tecnologia de fio

diamantado dizem respeito ao baixo nível de ruído e à ausência de vibração provenientes do uso de explosivos.

No caso dos granitos os custos unitários de corte são bastante elevados, de R\$ 40,00 a 67,00/m² (US\$ 34,23 a 57,34/m²), ou algo em torno de R\$ 200,00/m³ (US\$ 171,16/m³). Considerando-se uma eficiência média de cerca de 4 m²/m, obtêm-se uma incidência média do custo do fio em cerca de R\$ 50,00/m² (US\$ 42,79/m²). Sendo assim, o fio diamantado representa o principal componente de custos desta tecnologia.

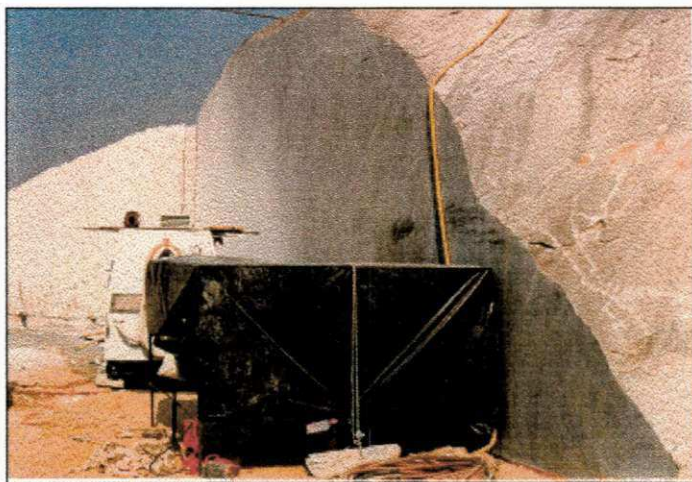


Foto 3.6- Corte executado, destacando-se as superfícies dos planos vertical e horizontal cortados a fio diamantado.

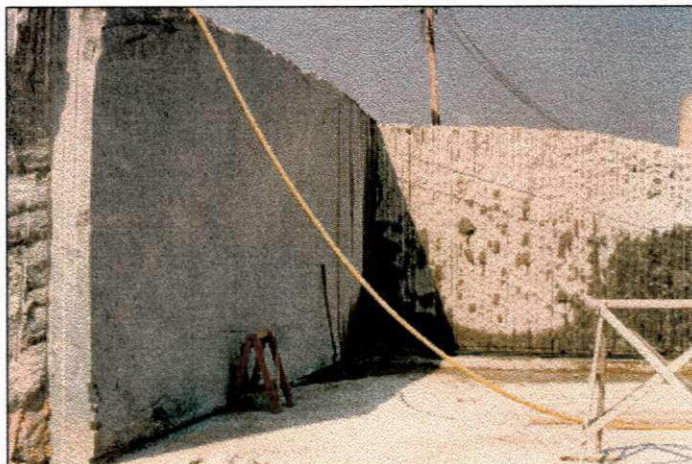


Foto 3.7- Conjugação de técnicas: fio diamantado + perfuração contínua. Vê-se a qualidade dos planos de corte (Kynawa).



Foto 3.8- Uso de talha-bloco e cunha pneumática de desmonte, além de desbaste de bloco semi-acabado.

Posto isto, conclui-se que, relativamente aos custos, estes são mais elevados do que qualquer dos métodos tradicionais, o que tem representado o único obstáculo para difusão rápida desta tecnologia no setor de granitos.

3.13.7- Corte com Maçarico (CM)

Foi inicialmente experimentada com sucesso nos Estados Unidos em um taconito. A técnica do corte a maçarico é indicada para rochas ígneas com alto teor de sílica (granito a diorito), tendo sido adotada nas extrações de granito europeu, sobretudo na fase de abertura do corte inicial, quando é geralmente impossível o emprego de explosivos. A versatilidade do sistema reside na facilidade de orientação do corte sem a necessidade de preparação preliminar, podendo realizar cortes verticais ou horizontais.

O princípio de desintegração da rocha está relacionado com a dilatação térmica diferencial dos minerais constituintes, sendo catalisada pelas transformações alotrópicas que o quartzo apresenta.

Todavia o método possui alguns fatores negativos, até agora não corrigidos, que tem determinado uma progressiva perda de interesse de sua aplicação:

- problemas de avanço do corte quando da existência de zonas de concentração de minerais máficos (micas) e de veios de quartzo (fundição ou vitrificação da massa - formando cavernas);
- irregularidade das superfícies obtidas; extensão da zona de dano; e efeitos ambientais, internos e externos à cava, sob a forma de ruído - 120 dB, calor e produção de poeira.

Não obstante que a chama produza um dano considerável da rocha até uma profundidade de 15 cm das paredes do corte, a perda de produção de blocos é pouco significativa se o método é empregado apenas na fase de abertura.

Devido ao alto custo da energia e à crescente sensibilidade aos problemas ambientais, atualmente o uso desta técnica está em declínio, sendo limitada à execução de cortes particularmente difíceis.

3.13.8- Jato D'Água (JA)

A aplicação desta técnica na lavra de pedras naturais é bastante recente, estando em fase de estudo há cerca de dez anos, sendo que foi iniciada sua aplicação industrial nos últimos três anos. Tem sido aplicada no Japão, em mina subterrânea, e uma de suas principais desvantagens é o preço de aquisição de equipamentos. Uma das formas de adequação é que seu uso seja conjugado com o fio diamantado (Bortolussi et al., 1996).

Trata-se de método indicado para rochas abrasivas (as eruptivas e os arenitos são cortados mais facilmente que o calcário), tendo como mecanismo de corte o impacto de jato de água que realiza a quebra da rocha no tamanho de seus minerais constituintes, ou nas microfaturas presentes.

O corte é obtido por meio de jato d'água com elevada velocidade, o que gera uma pressão que pode chegar a 400 MPa. O jato golpeia a rocha a pequena distância provocando o arranque de fragmentos. Esta distância é função das microdescontinuidades, que podem ser inter ou intragranular, segundo as quais a ação da água ocorrerá com maior eficiência.

Sendo assim, esta tecnologia se adapta a materiais que:

- não são perfeitamente homogêneos, em pequena escala;
- apresentem grã cristalina bem definida; ou,
- a presença de microdescontinuidades são comuns. Granitos e arenitos são exemplos clássicos de rocha que respondem a estas características.

O sistema de corte é constituído por:

- central de pressurização;
- lança com terminal dotado de porta-aspersor;
- guia da lança e materiais de apoio.

O trabalho é desenvolvido da seguinte forma: a água sob pressão (advinda da central) alimenta a lança (por meio de tubos) que possui micro-aspersores na sua extremidade. O sistema de sustentação e guia da lança tem a função de regular os movimentos que esta tem de executar, dado que o corte advém de passagens sucessivas, a lança deve poder transladar através de todo o comprimento do corte, penetrar dentro do sulco produzido (de modo que a distância aspersor-rocha seja a mínima possível), devido a irregularidade do corte, e objetivando alcançar a máxima eficiência do sistema.

A superfície de corte produzida apresenta-se regular e rugosa. Na fase de produção de chapas, há comprometimento de apenas 1 a 2 cm de espessura da parede dos blocos.

A aplicação desta tecnologia exige, além de uma geometria regular das frentes, um estudo detalhado, caso a caso, para a definição do número de parâmetros dos quais depende a eficiência de corte:

- características da rocha, em particular da resistência a compressão simples;
- dimensão da grã cristalina; e,
- distribuição das microdescontinuidades.

É necessário se determinar, a partir de testes laboratoriais, a pressão e posição ótimas (e qual a potência do sistema de pressurização), a forma do aspensor, a velocidade de translação da lança e, eventualmente, a sua velocidade de rotação.

De acordo com Bortolussi (op. cit.) atualmente se consegue realizar cortes horizontais e verticais com profundidades que variam de 4 a 5 metros, por um comprimento de 50 metros, e com uma taxa de produção de até 2,40 m²/h (para uma pressão de 250 MPa, diâmetro de injetor de 1,25 mm, 20 Hz de frequência e taxa transversa de 8 m/min). As formas da bancada e das frentes são os fatores que permitem a obtenção dos melhores resultados, sendo mais eficaz adotar-se uma seqüência de corte que preveja a produção direta de blocos para remessa à serraria (corte horizontal com uma profundidade que atinja a dimensão mínima dos blocos que se deseja obter e corte vertical da bancada com altura correspondente à dimensão média dos blocos).

3.13.9- Corte com Disco Diamantado (AF)

Conforme citado, o fio diamantado não pode ser utilizado para cortes horizontais no granito devido à impossibilidade prática de assegurar-se um eficiente resfriamento ao longo do fio.

Foi proposto o recurso de uma serra a braço, dotada de corrente que suporta os elementos abrasivos, constituída de segmentos ou plaquetas de diamante sinterizado, substituíveis quando se verificam condições de desgaste.

O sistema apresenta uma distribuição uniforme e segura da água de resfriamento por suas características de funcionamento que asseguram um tipo

de contato mais favorável com a rocha, minimizando os perigos de escorregamentos das bordas de ataque.

Em condições de trabalho, tanto o equipamento quanto seu sistema de controle são similares às modernas máquinas de corte empregadas nas cavas de mármore; a diferença está no braço e, sobretudo, na corrente.

O braço apresenta dimensões e formas variadas, de acordo com a profundidade do corte a realizar, até um máximo de 3,5 a 4,0 metros, e tem uma série de furos (em pequeno espaçamento) ao longo do canal da guia perimetral, através dos quais flui a água de resfriamento.

Os elementos diamantados, sob forma de segmentos de paralelepípedos, são dispostos transversalmente à direção do movimento, soldados a uma base metálica e fixados à corrente.

Teoricamente, o sistema possui capacidade de realizar cerca de 3.000 m² de corte em mármore duro (trabalho sem interrupções), limitando-se, na prática, a uma produção de 400 m² de superfície cortada.

No caso do granito, os resultados técnicos obtidos garantem uma vida-útil dos elementos diamantados de 100 a 200 m² de corte, de acordo com a abrasividade da rocha e as condições de trabalho, sendo de cerca de 50 m² a área cortada sem paralisações.

A velocidade de corte não deve superar 2 m²/h, utilizando-se sistemas de maiores potências.

Seu custo unitário é relativamente elevado, superior ao do fio diamantado, que executa o corte com mecanismo de desagregação substancialmente análogo, e igual energia específica, mas de espessura nitidamente inferior.

Dentre os aspectos positivos evidenciam-se a perfeita planaridade e a limitada rugosidade da superfície, afora a possibilidade de iniciar e completar-se o corte sem preparação particular.

3.14- Aplicação de Tecnologia Mista

As explorações de pedras naturais são, em geral, realizadas utilizando-se combinações de tecnologias diversas com o objetivo de maximizar o resultado econômico e conferir a necessária flexibilidade ao ciclo produtivo.

É importante utilizarem-se racionalmente os métodos mais destrutivos, aqueles baseados no uso de explosivos e da chama, para execução apenas do corte primário para o arranque de bancadas de grandes volumes, lançando mão de outros métodos para realizar as subdivisões sucessivas e, em particular, as operações de recorte e esquadreamento dos blocos.

Como aplicações impróprias, por exemplo, poderia citar-se a utilização do maçarico para extração direta de blocos do maciço, haja visto a proporção de volume não utilizável por causa da extensão da zona de danos, ou aplicarem-se explosivos para a subdivisão de volumes inferiores a 40-50 m³.

Paralelamente, seria pouco racional utilizarem-se os métodos de elevada precisão (fio diamantado, jato d'água) para realizar o corte primário, reduzindo a qualidade da superfície do bloco final com uso de métodos mais rudimentares nas fases seguintes de produção, como aquelas baseadas em perfuração.

Na Itália, o processo produtivo freqüentemente seguido consiste em se recorrer a trabalhos de extração e subdivisão sucessivos, desde o arranque de rochas da ordem de 500 a 2.000 m³ do maciço (bancadas), seguido de redução em volumes que variam de 50 a 100 m³, e, finalmente, o recorte final dos blocos com 8 a 15 m³.

Geralmente o modelo seguido consiste em:

- Fase 1 - corte de abertura das bancadas, sendo realizado com maçarico, e o primário (horizontal e vertical), realizado com cordel detonante.
- Fase 2 - subdivisão da bancada que pode ser realizada com explosivos, mas é preferível recorrer-se a dispositivos espaçadores, que não produzem danos

que causam redução excessiva do volume recuperado; as operações de recorte e de esquadrejamento também são realizadas com os mesmos dispositivos.

Em geral, pelo menos duas faces são obtidas com dispositivos espaçadores que não causam danos à massa rochosa mas imprimem uma certa irregularidade de formas e uma considerável rugosidade, com conseqüente penalização do volume comercializado.

Por outro lado, se pelo menos duas faces são cortadas, este fato introduz um elemento negativo posterior representado pela elevada espessura da zona danificada que é considerada quando da comercialização. Se o bloco provém da extremidade da bancada, uma face pode apresentar-se realizada com maçarico e a penalização do volume é, neste caso, ainda maior.

Raramente ocorre extração direta dos blocos em uma fase única, em jazimentos qualitativamente homogêneos e de características estruturais favoráveis. Caso isto ocorra pode ser vantajoso adotar-se a perfuração contínua como método principal: a superfície do bloco é qualitativamente aceitável, a forma é regular e a espessura do material danificado é praticamente nula; todavia, o custo de extração é relativamente elevado.

Uma alternativa técnica e economicamente válida pode ser representada pelo método do corte com jato d'água, que, à luz do carácter experimental, apresenta-se competitivo sob o prisma econômico, desde que seja utilizado um potencial hidráulico adequado.

Como pontos positivos a favor desta tecnologia, pode-se destacar a regularidade do corte, caracterizado pela limitada rugosidade, perfeita coplanaridade, forma regular e ausência de danos no interior do bloco.

CAPÍTULO 4

TENSÕES NO MACIÇO: ESTIMATIVA E MEDIÇÕES *IN SITU*

4.1- Estimativa: Introdução

Uma das características da atividade de produção de rochas para fins ornamentais é a prática de desmonte com a finalidade de produzirem-se blocos de feições regulares, tamanho padronizado e com ausência de trincas.

As trincas podem ser resultantes do comportamento mecânico das rochas sendo controladas por seus fatores intrínsecos e pelo próprio meio em que as mesmas se encontram:

- fatores da rocha (intrínsecos) – mineralogia; tamanho dos grãos; porosidade; presença de fraturas;
- fatores do meio – tensão de confinamento; temperatura; tempo; pressão dos poros; anisotropia e heterogeneidades; e atividades antrópicas.

Os efeitos destes últimos fatores enunciados estão agrupados, de maneira sucinta, na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Efeitos dos Fatores do Meio sobre a Resistência das Rochas

Fatores	Efeitos
Tensão de Confinamento	As rochas exibem pequenas deformações plásticas sob elevada tensão de confinamento.
Temperatura	A deformação plástica é bem menor nas proximidades da superfície, aumentando a possibilidade de sua ocorrência em maiores profundidades, devido ao aumento da temperatura e pressão de confinamento
Tempo	Como os processos geológicos ocorrem em períodos prolongados de tempo, eles imprimem a necessidade de que sejam definidos dois conceitos para sua análise: <ul style="list-style-type: none"> - ocorrência de fluência – que é uma deformação lenta, devido ao efeito combinado entre uma deformação elástica e outra permanente, devido às altas pressão e temperatura; - presença de soluções – a existência de soluções quimicamente reativas nos poros das rochas são capazes de proceder a dissolução de minerais antigos e precipitação de novos.
Pressão dos Poros	Enfraquece a rocha, apesar da resistência da rocha aumentar com a profundidade, o aumento da pressão dos poros causa a diminuição da pressão efetiva de confinamento.
Anisotropia e Heterogeneidades	As rochas acamadas, bandeadas ou foliadas apresentam resistência em função da orientação das forças aplicadas, relativamente às estruturas planares.
Atividades Antrópicas	Alterações rápidas na geometria de um corpo rochoso pode produzir a concentração de esforços localizados.

(Fonte: Amadei, 1996; Amadei, e Stephansson, 1997)

Em rochas para fins ornamentais trabalha-se na proximidade da superfície do terreno, em profundidade até 20 metros, onde:

- a) inexistente a componente normal de tensão de confinamento, que foi aliviada por processos de denudação, podendo existir tensões residuais horizontais;
- b) as rochas apresentam comportamento dúctil ou frágil;
- c) alterações rápidas no relevo, principalmente em regiões de topografia acentuada geram concentrações de tensões em regiões próximas à crista de elevações e / ou fundos de vales.

— O estado de tensões *in situ* deve ser estimado desde a fase inicial de avaliação de projetos de engenharia, como forma de auxiliar as definições dos processos de planejamento, seleção do método de medição e localização dos pontos de levantamento de dados.

A previsão exata das tensões na rocha, e sua variação espacial, é muito difícil e, na prática impossível, devido à possibilidade de superposição de componentes de esforços de muitos tipos, associados aos eventos geológicos que se sucederam.

De maneira geral, a estimativa das tensões exige uma caracterização detalhada da geologia local. Os modelos (físicos e numéricos) devem ser desenvolvidos para explorar os efeitos dos parâmetros tais como:

- modelo constitutivo da rocha;
- histórico do carregamento;
- estruturas geológicas críticas;
- topografia; e,
- condições de contorno das tensões *in situ*.

Existem duas condições que devem ser assumidas para se estimar o estado de tensão a uma determinada profundidade z :

a- supor que o mesmo pode ser descrito por duas componentes:

- vertical (σ_v) igual ao peso do maciço sobrejacente a z ($\sigma_v = \gamma.z = \rho.g.z$; onde γ é o peso específico da rocha – N/m^3);
- horizontal uniforme $\sigma_h = \sigma_H = K. \sigma_v$.

b- assumir que σ_v e σ_h são tensões principais, ou tensão total.

Tensões isoladas também podem ser produtos de efeitos topográficos, onde esforços mais superficiais alinham-se com a topografia local,

enquanto que aqueles de maior profundidade alinham-se com o *trend* regional. Em áreas com topografia suave geralmente se assume que as componentes de tensão vertical e horizontal são principais.

Os domínios de variação das componentes de tensão horizontal *in situ* são restritos pela resistência do maciço rochoso. Tais limites são função da intensidade e direção das tensões, das profundidades e do modelo do comportamento da rocha (frágil ou dúctil).

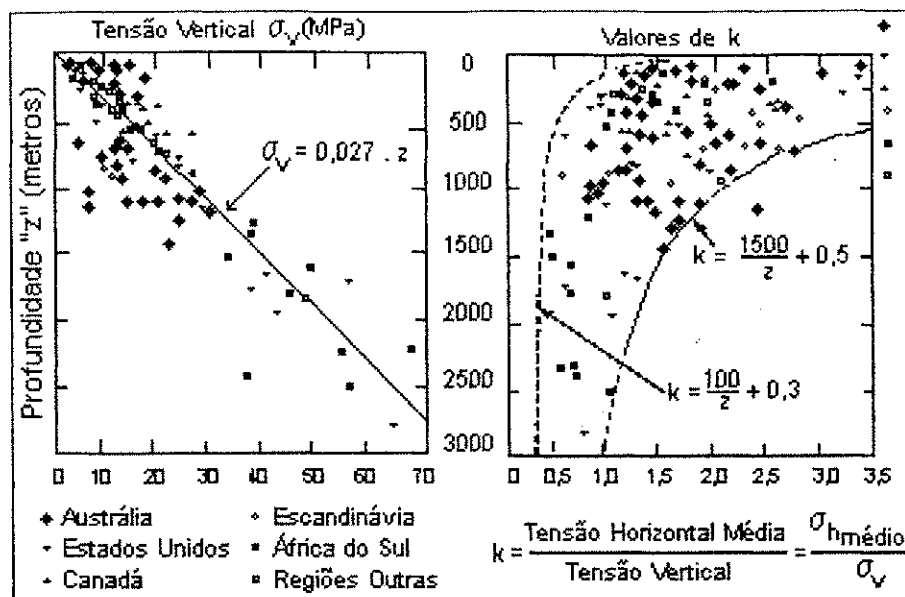
Medidas de tensões realizadas em diversas partes do mundo e analisadas por Aytmatov (1986) mostram que, em 65% a 70% dos casos os esforços horizontais excedem o vertical. Concorrentemente, a partir de dados coletados na China, Li (1986) verificou que as medidas de tensões horizontais não são uniformes, apresentando variações na faixa de $1,4 < \sigma_H / \sigma_v < 3,3$.

Em todos os casos as diferenças entre previsto e medido foram atribuídas a esforços tectônicos, sendo classificados como de origem: residual; termal; erosiva; deformacional lateral; anisotrópica; topográfica; e por feições geologicamente ativas.

4.2- Variação de Tensões *In Situ* com a Profundidade

Existem muitas pesquisas, realizadas em diferentes regiões do mundo, que procuram relacionar as tensões horizontal e vertical com a profundidade, com o trabalho pioneiro publicado em de 1966 por Voight, até recentes (Lim e Lee, 1995).

Hoek e Brown (1978), analisando uma série de resultados desses estudos construíram dois gráficos que procuram interpretar a relação tensão - profundidade, através da regressão da tensão vertical e dos limites do fator K, conforme Figura 4.1.



(Fonte Hoek e Brown, 1978)

Figura 4.1- Representação de tensões verticais de acordo com a profundidade (à esquerda) e variação da taxa de tensão horizontal *versus* vertical (direita).

Atualmente, através de técnicas de fraturamento hidráulico e outras, a relação que tem sido obtida refere-se às tensões principais *versus* profundidade, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Variação das Componentes de Tensão Principal Máxima, Intermediária e Mínima com a Profundidade

Autor	Variação de σ_1 , σ_2 , e σ_3 (MPa) com a profundidade (z)	Local e Profundidade
Herget (1993)	$\sigma_1 = 12,1 + (0,0403 + 0,002) \cdot z$ ($r = 0,84$) $\sigma_2 = 6,4 + (0,0293 + 0,0019) \cdot z$ ($r = 0,77$) $\sigma_3 = 1,4 + (0,0225 + 0,0015) \cdot z$ ($r = 0,75$)	Canadian Shield (0 – 2300 m)
Stephansson (1993)	$\sigma_1 = 10,8 + 0,037 \cdot z$ ($r = 0,68$) $\sigma_2 = 5,1 + 0,029 \cdot z$ ($r = 0,72$) $\sigma_3 = 0,8 + 0,020 \cdot z$ ($r = 0,75$)	Suécia (0 – 1000 m)

Fonte: Amadei e Stephansson, 1997

Pelas pesquisas assume-se que, cada componente de tensão varia linearmente com a profundidade, e que, entre as duas, a relação guarda uma função direta com a profundidade.

De forma geral, na literatura a intensidade da tensão vertical pode ser prevista pelo peso da camada de rocha sobrejacente ao plano indicado. Contudo, em determinados locais é comum se encontrar valores três a quatro vezes superior ao previsto apenas pela força peso, devido ao complexo estrutural e geológico, ou em zonas tectônicas ativas (Herget, 1980, 1986), Bulin (1971).

A comparação do incremento de tensão horizontal, entre os dados obtidos nas pesquisas e de literatura mostram-se discrepantes. A relação de tensões, K , medida é raramente igual a $1/3$, especialmente em pequena profundidade e é, geralmente, maior que a unidade.

Relações genéricas entre tensão e profundidade podem ser utilizadas na estimativa da intensidade do campo de tensões em uma dada profundidade, permitindo-se uma idéia do regime de tensão (normal, reversa, empurrão) na área de interesse e como este varia com a profundidade.

4.3- Modelo de Resistência de Rocha Intacta

Considera um maciço intacto, onde a resistência pode ser descrita pelo critério de Mohr, com coesão interna S_0 e ângulo de atrito interno ϕ . Na seleção deste modelo de ruptura assumem-se as seguintes condições básicas:

- a resistência é independente da tensão principal intermediária (σ_2);
- a fratura ocorre em um ou mais pares de planos conjugados que passam na direção do eixo principal intermediário, e inclinados de ângulos inferiores a 45° com a direção da tensão principal maior (Jaeger e Cook, 1977, p. 92).

-Com base nestas condições, Goodman (1989), deduziu as equações 4.1 e 4.2:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = C_0 + \sigma_3 \left[\operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right] \quad \text{Eq. 4.1}$$

onde, C_0 = resistência compressiva não confinada, e,

$$C_0 = 2.S_0 \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad \text{Eq. 4.2}$$

Então, conclui-se que a uma profundidade z , o estado de tensão assume uma componente vertical $\sigma_v = \gamma \cdot z$ e duas tensões horizontais diferentes.

Conforme Anderson, 1951, existem três casos possíveis de falhamento (Tabela 4.3).

Tabela 4.3- Relação de Tensões com Tipo de Falha, Segundo Anderson

Caso	Condição	Tipo de Falhamento
1	$\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$	normal
2	$\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$	rejeito direcional
3	$\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$	inversa ou de empurrão

Caso 1- falha normal: característica de um ambiente tectônico extensional. Substituindo σ_v (σ_1) e σ_h (σ_3) na equação de Goodman, Eq. 4.1, a relação entre as tensões horizontal mínima e vertical ($K_{\min} = \sigma_h / \sigma_v$) é:

$$K_{\min} = \operatorname{ctg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \left(1 - \frac{C_0}{\gamma \cdot z} \right) \quad \text{Eq. 4.3}$$

Neste caso, o fraturamento ocorrerá paralelo à componente de tensão horizontal máxima (σ_H), conforme esquema e modelo das Figuras 4.2 e 4.3.

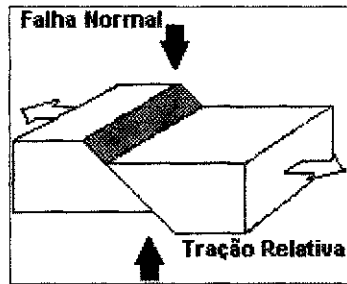


Figura 4.2- Esquema de falha normal.

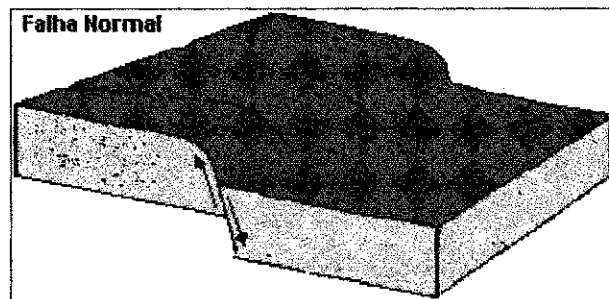


Figura 4.3- Modelo de falha normal.

Caso 2 – falha de rejeito direcional: substituindo-se $\sigma_H(\sigma_1)$ e $\sigma_h(\sigma_3)$ na equação 4.1, e reformulando as relações de tensões horizontais $K_h = \sigma_h / \sigma_v$ e $K_H = \sigma_H / \sigma_v$, tem-se:

$$K_H = \frac{C_0}{\gamma \cdot Z} + K_h \cdot \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad \text{Eq. 4.4}$$

O fraturamento da rocha será paralelo à componente de tensão vertical (σ_v), de acordo com as Figuras 4.4 e 4.5.

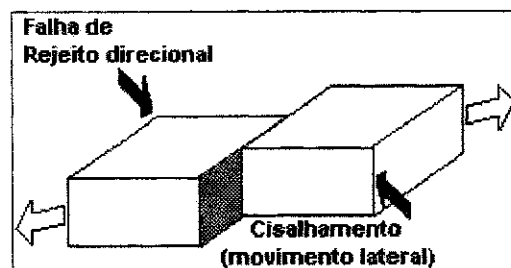


Figura 4.4- Representação de falha de rejeito direcional.

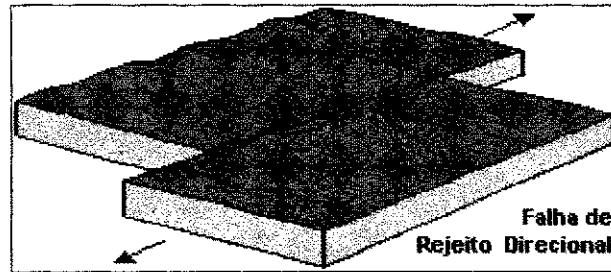


Figura 4.5- Modelo de identificação de falha de rejeito direcional.

Caso 3 – falha inversa ou de empurrão: também característica de um ambiente tectônico compressional. Novamente substituindo-se σ_H (σ_1) e σ_v (σ_3) na equação 4.1, a relação entre as tensões horizontal mínima e vertical ($K_{\text{máx}} = \sigma_H / \sigma_v$) é:

$$K_{\text{máx}} = \frac{C_0}{\gamma \cdot z} + \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad \text{Eq. 4.5}$$

O fraturamento ocorrerá paralelo à componente de tensão horizontal mínima (σ_h), Figuras 4.6 e 4.7.

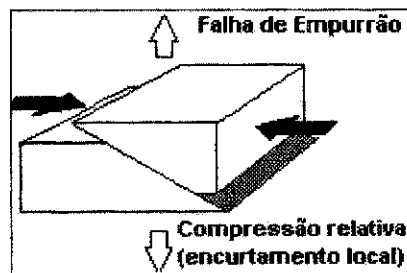


Figura 4.6- Falha inversa ou de empurrão.

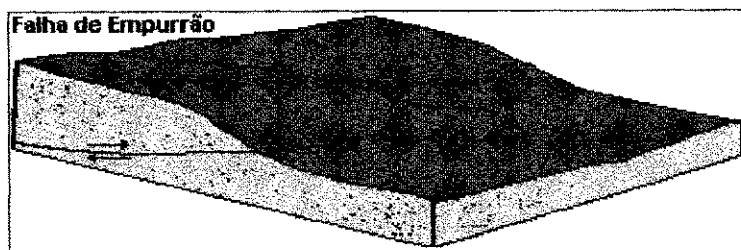


Figura 4.7- Modelo de apresentação de falha de empurrão.

4.4- Efeito das Estruturas da Rocha

Comparativamente às rochas intactas, as rochas fraturadas apresentam menor resistência ao cisalhamento, e resistência à tração tendendo a zero. O efeito dos planos de fraqueza é que o maciço assume estar sujeito a um estado de tensão compressivo e de eixo simétrico, σ_1 e σ_3 . As juntas são orientadas em um ângulo δ com relação a σ_1 . A resistência ao cisalhamento é descrita pelo critério de Mohr, com uma força de coesão zero e um ângulo de atrito interno ϕ_j , Figura 4.8.

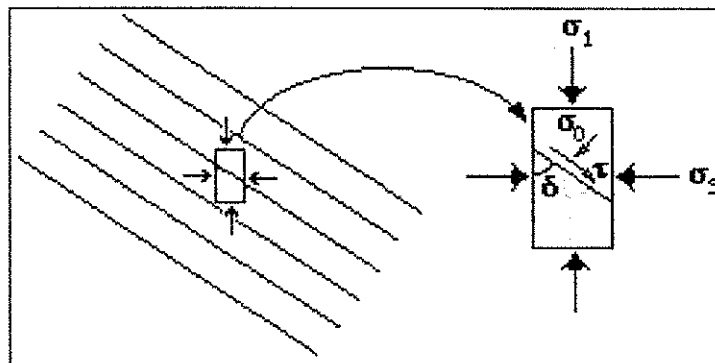


Figura 4.8- Maciço rochoso com fratura regular sujeito a um estado de tensão de eixo simétrico σ_1 e σ_3

Em termos de tensões principais (σ_1, σ_3), Goodman (1989) definiu a equação 4.6:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \cdot \frac{\text{tg}(\delta + \phi_j)}{\text{tg}\delta} \quad \text{Eq. 4.6}$$

Partindo de um estado de tensão inicial ($\sigma_v = \gamma \cdot z$, σ_h) e utilizando a equação acima, $K_{\text{mín}}$ e $K_{\text{máx}}$ são independentes da profundidade z e são definidos pela equação 4.7:

$$K_{\text{mín}} = \frac{\text{tg}\delta}{\text{tg}(\delta + \phi_j)}$$

e

$$K_{\text{máx}} = \frac{\text{tg}(\delta + \phi_j)}{\text{tg}\delta} \quad \text{Eq. 4.7}$$

Estas equações indicam que o menor domínio de variação de K ocorre sempre que $\delta = \pi/4 - \phi/4$.

4.4.1- Efeito da Anisotropia

Os modelos anteriores supõem a existência de um contínuo semi-infinito, com propriedades elástico-linear, homogêneo e isotrópico, e cuja relação entre as tensões horizontal e vertical é $K_0 = \frac{\nu}{(1-\nu)}$.

Todavia muitas rochas são anisotrópicas, ou seja, apresentam variações de suas propriedades com a direção. Essas variações são geralmente relacionadas com a existência de uma trama bem definida (acamamento, planos de xistosidade, foliação, fissuramento e juntas). A anisotropia é uma característica de rochas metamórficas foliadas - xistos, quartzitos, gnaisses e filitos; sedimentares – folhelhos, calcários, arenitos e carvão; e, qualquer rocha cortada por um ou mais planos de juntas fechadas que se apresentam espaçados. Todas estas rochas apresentam claras evidências de anisotropia e mostram um ou mais direções aparentes de simetria (isotropia transversa ou ortotropia, respectivamente).

A isotropia transversa é utilizada para descrever a simetria de rochas com um plano de sistema dominante: rochas sedimentares e foliadas ou maciços rochosos com um sistema de juntas. Neste caso são utilizadas cinco constantes elásticas (E , E' , ν , ν' e G') para descrever a deformabilidade da rocha num sistema de coordenadas relativo ao plano:

- E e E' são os módulos de Young no plano de isotropia transversa e na sua normal;
- ν e ν' são as relações de Poisson caracterizando a deformação lateral no plano de isotropia transversa devido à tensão atuando paralela ou normal a ele, respectivamente;

- G' é o módulo de rigidez no plano normal ao plano de isotropia transversa.

O módulo de rigidez (G) no plano de isotropia transversa é igual a

$$\frac{1}{2} \frac{E}{(1 + \nu)}$$

Para a maioria das rochas intactas e transversalmente isotrópicas as relações E / E' e G / G' variam entre 1 e 3; e, entre as relações de Poisson (ν / ν') encontram-se no intervalo $0,15 < \nu / \nu' < 0,35$, segundo Amadei, Savage e Swolfs (1987); e Gerrard (1975).

Para maciços rochosos com juntas regulares, a relação da anisotropia pode ser bem maior e, em geral, depende do nível de tensão segundo os planos de juntas. Conforme demonstrado por Duncan e Goodman (1968), considerando-se uma família de juntas com espaçamento S e rigidez normal k_n , a relação E / E' é igual a:

$$\frac{E}{E'} = 1 + \frac{E}{k_n \cdot S} \quad \text{Eq. 4.8}$$

Utilizando-se a rigidez normal, k_n , proposta por Bandis, Lumsden e Barton (1983), a relação 4.9 passa a:

$$\frac{E}{E'} = 1 + \frac{E}{k_{ni} \cdot S} \left(\frac{k_{ni} \cdot V_m}{\sigma_n + k_{ni} \cdot V_m} \right)^2 \quad \text{Eq. 4.9}$$

onde, k_{ni} é a rigidez normal inicial dos planos de juntas e V_m é o fechamento máximo. Vê-se que se a tensão normal é zero, a equação 4.11 retorna à anterior de Duncan e Goodman, e deve ser maior para juntas com valor de espaçamento e ou rigidez inicial pequenos.

Analisando-se o efeito da anisotropia nas tensões gravitacionais que atuam em maciços rochosos homogêneos com uma superfície horizontal, Amadei, Savage e Swolfs (1987) e Amadei e Pan (1992), propõem expressões

para o coeficiente K em maciços rochosos anisotrópicos, ortotrópicos e transversalmente isotrópicos.

Considerando um maciço transversalmente isotrópico num plano P, sendo n, s e t um sistema de coordenadas pertencente a P e que tem inclinação ψ , relativamente ao sistema de coordenadas globais x, y e z, onde os eixos x e y são horizontais, e z é um eixo vertical para baixo. O plano P tem direção paralela ao eixo y. O maciço está submetido apenas à força da gravidade e as componentes de deslocamentos nas direções x e y dependem de z. Ou seja, as deformações normais ϵ_x ϵ_y inexistem e a deformação de cisalhamento γ_{xy} é desprezível, Figura 4.9.

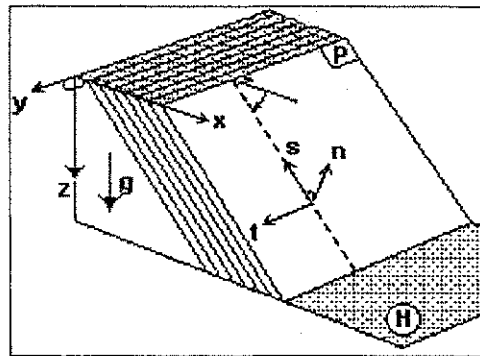


Figura 4.9- Esquema de maciço anisotrópico com camadas inclinadas e paralelas ao plano P, submetido à gravidade, segundo Pan e Amadei, 1994.

Sendo assim, as tensões em x, y e z são principais com $\sigma_z = \rho \cdot g \cdot z$, $\sigma_x = K_x \cdot \rho \cdot g \cdot z$ e $\sigma_y = K_y \cdot \rho \cdot g \cdot z$. De forma geral, as duas relações K_x e K_y não são iguais e dependem do ângulo de mergulho ψ e das relações E/E' , G/G' , ν e ν' .

Se: - $\psi = 0^\circ$: plano horizontal de isotropia transversa $K_x = K_y$

$$K_x = K_y = \frac{\sigma_x}{\rho g z} = \frac{\sigma_y}{\rho g z} = \nu \frac{E}{E'} \frac{1}{1-\nu} \quad \text{Eq. 4.10}$$

- $\psi = 90^\circ$: plano vertical isotrópico transversa, equações 4.11 e 4.12

$$K_x = \frac{\sigma_x}{\rho g z} = \frac{\nu'(1+\nu)}{1-\nu'^2(E/E')} \quad \text{Eq. 4.11}$$

$$K_y \frac{\sigma_y}{\rho g z} = \frac{\nu + \nu'^2 (E/E')}{1 - \nu'^2 (E/E')} \quad \text{Eq. 4.12}$$

Para uma maciço rochoso isotrópico $K_x = K_y = K_o = \frac{\nu}{(1-\nu)}$.

Os modelos mostram que, para um maciço rochoso, o campo de tensão induzida gravitacional é multiaxial e fortemente correlata com a estrutura do maciço. A tensão vertical é sempre a tensão principal e é igual ao peso da rocha sobrejacente e sua intensidade é independente da anisotropia. Em geral, as duas componentes horizontais são diferentes e sua amplitude e orientação no plano horizontal dependem do caráter anisotrópico do maciço.

4.4.2- Efeito da Estratificação

A estratificação, que é comum às rochas sedimentares e vulcânicas, criam heterogeneidades. Dependendo da litologia e da rigidez relativa entre diferentes camadas, as tensões *in situ* podem variar substancialmente de uma camada a outra. De forma geral, variações bruscas na tensão horizontal podem ocorrer quando se cruzam os contatos entre estratos com propriedades diferentes.

A tensão horizontal mínima, determinada em teste de fraturamento hidráulico (Warpinski e Teufel, 1991), apresenta um valor baixo em camada com módulo de Young elevado e relação de Poisson baixo, e, por outro lado, apresenta um alto valor em camada com módulo de Young baixo e relação de Poisson elevado, ou seja, o valor da tensão horizontal mínima é diretamente proporcional à relação de Poisson e tem relação inversamente com o módulo de Young.

4.4.3- Efeito da Heterogeneidade e de Estruturas Geológicas

As variações da geologia de maciços rochosos e a existência de heterogeneidades e de estruturas geológicas podem afetar a distribuição e intensidade das tensões *in situ* e contribuir, em parte, para as variações encontradas em medições de campo (Fairhurst, 1986).

Hudson e Cooling (1988) identificaram muitos casos em função da rigidez relativa do material da descontinuidade *versus* a rocha de seu entorno:

- a- se a descontinuidade é aberta, a tensão principal maior (σ_1) é desviada no sentido paralelo ao plano de descontinuidade;
- b- se a descontinuidade é de um material com propriedades similares da rocha do entorno, as tensões principais não são afetadas; e,
- c- se o material da descontinuidade é rígido, a tensão principal maior (σ_1) é desviada no sentido perpendicular à descontinuidade.

Determinações múltiplas de tensão *in situ*, realizadas no Canadá (Underground Research Laboratories – URL) revelaram uma forte discrepância do campo de tensão *in situ* com as estruturas geológicas da rocha, variando em escala, desde microfraturas em rocha intacta até falhamentos maiores (Martin e Simmons, 1993).

Em geral, as heterogeneidades e estruturas geológicas causam distúrbios no campo de tensão regional, resultando numa diferenciação deste com o campo de tensão local.

A Figura 4.10 mostra um exemplo de distribuição de tensões num maciço rochoso, com dimensões de 6.000 x 4.000 metros, composto por três blocos, submetidos a tensões uniformes em seus limites.

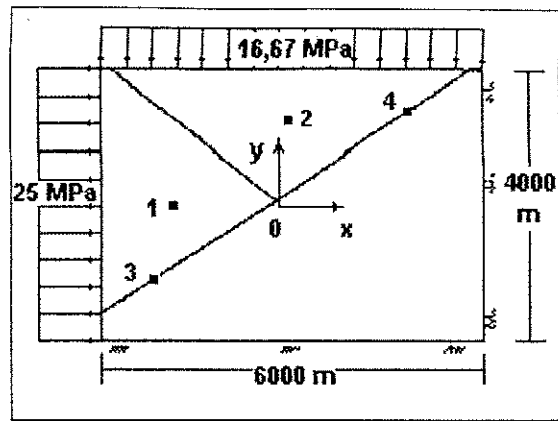


Figura 4.10- Representação de bloco de rocha granítica, para análise de deformações, Stephansson, Ljunggren e Jin, 1991.

A partir de análise que utilizou o Método dos Elementos Distintos Bidimensional, elaborada por Stephansson, Ljunggren e Jin (1991), fica claramente indicado que, apesar da aplicação de tensões uniformes nos limites do domínio, desenvolvem-se tensões não-uniformes em cada bloco do maciço rochoso e ocorrem descontinuidades de tensão devido ao escorregamento ao longo dos limites dos blocos (Figura 4.11).

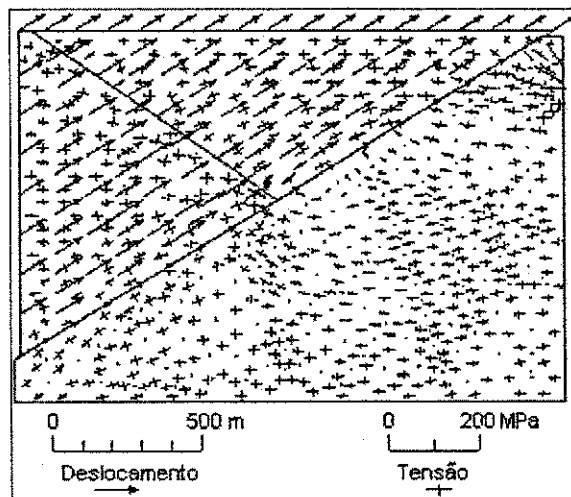


Figura 4.11- Deslocamentos de tensões atuantes num modelo de elementos distintos com três blocos, segundo Stephansson, Ljunggren e Jin, 1991.

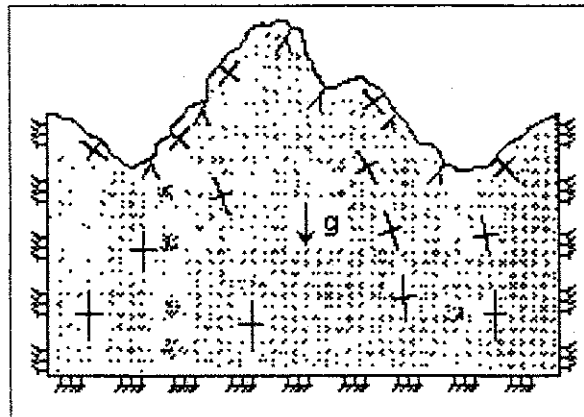
De acordo com o exposto, as tensões na rocha dependem das condições de carregamento limite e da estrutura da rocha, sendo que essas condições devem ser bem definidas para que se possa analisar a complexidade do campo de tensão local.

Do ponto de vista prático, a heterogeneidade é capaz de criar concentrações de tensões que podem conduzir a problemas de *rockburst* e de estabilidade local, durante as escavações.

4.4.4- Efeito da Topografia

A possibilidade de utilização de simplificações que assumem que as tensões principais são horizontais e verticais terminam quando a superfície do terreno não é horizontal.

A Figura 4.12 mostra uma seqüência de elevações e vales, com o maciço submetido apenas a esforços gravitacionais sem possibilidade de deslocamentos laterais. Tendo em vista a condição limite de tração, os esforços principais são paralelos e normais à superfície do terreno. Em profundidade as tensões principais apresentam direções aproximadas como se o terreno fosse horizontal.



Fonte: Amadei e Stephansson, 1997.

Figura 4.12 – Perfil de um maciço de topografia complexa sujeito à gravidade (sem cargas superficiais) e com restrições a deslocamentos.

O conhecimento do efeito topográfico na distribuição de tensões tem importância particular quando a escavação é realizada em região montanhosa, próxima a encostas de vales ou em grandes minerações a céu aberto.

Savage e Swolfs (1986) mostram que a superposição dos efeitos de compressão tectônica uniaxial, atuando normal aos planos de elevações e de vales simétricos isolados, resultam num pequeno aumento na componente lateral dos esforços de compressão das cristas de elevações. Sobre fundos de vales esta superposição resulta numa redução dos esforços de tração. Efeitos opostos ocorrem quando uma tensão tectônica regional é superposta ao campo de tensão gravitacional.

McTiger e Mei (1981,1987), e Liao, Savage e Amadei (1992) mostram que a topografia afeta a distribuição de esforços gravitacionais em áreas de topografia suave, com inclinações inferiores a 10%, e os últimos autores também concluem que a intensidade da tensão horizontal em elevações e em vales ortotrópicos e transversalmente isotrópicos, dependem fortemente das propriedades elásticas e da orientação da trama do maciço rochoso em relação à superfície do terreno.

4.4.4.1- Vales e montanhas simétricas sujeitas apenas à gravidade

As Figuras 4.13 e 4.14 representam uma elevação e um vale simétricos, inseridos num espaço semi-infinito, orientados por um sistema de coordenadas x, y, z , sendo os eixos x e z pertencentes ao plano horizontal e o eixo y , vertical.

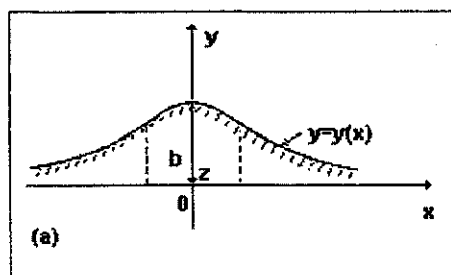


Figura 4.13- Esquema de elevação simétrica de altura b .

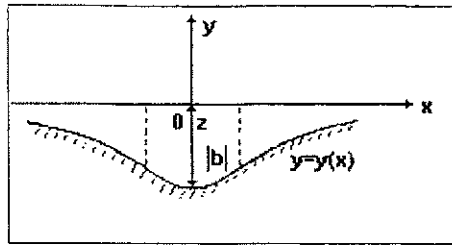


Figura 4.14- Representação de vale simétrico de profundidade $|b|$.

Considera-se que o maciço rochoso seja linearmente elástico, homogêneo, anisotrópico e contínuo, com densidade uniforme ρ , e que as propriedades elásticas e a geometria do espaço semi-infinito são independentes da direção z .

Como demonstrado por Pan e Amadei (1992) e Pan, Amadei e Savage (1994), as relações entre as seis componentes de tensão σ_{ij} ($i, j = x, y, z$) e a tensão característica $\rho g |b|$, dependem das relações adimensionais das constantes elásticas E / E' , G / G' , ν e ν' para rochas transversalmente isotrópicas.

Estas relações também dependem de:

- 1- ângulos de orientação β e ψ , dos planos de anisotropia relativos aos eixos x , y e z , vinculados à elevação ou vale;
- 2- coordenadas $(x / |b|, y / |b|)$ dos pontos onde as tensões são calculadas;
- 3- relações $a / |b|$ e $b / |b|$ que descrevem a geometria da elevação ou do vale.

Um regime de tensão gravitacional, atuante num maciço rochoso transversalmente isotrópico, com $E / E' = G / G' = 3$, $\nu = 0,25$, $\nu' = 0,15$, e anisotropia vertical ($\psi = 90^\circ$) para os casos de elevação e vale, onde a relação $a / |b| = 1$ são mostrados nas figuras seguintes (devido à simetria, apenas a metade direita das representações de trajetórias de tensão e contorno são mostradas).

Nas Figuras 4.15 e 4.16 nem a tensão horizontal, nem a vertical, são as maiores mas aquelas que são orientadas paralela e perpendicularmente à superfície ao longo do contorno da elevação ou do vale, e, gradualmente, com a profundidade passa a ser horizontal e vertical.

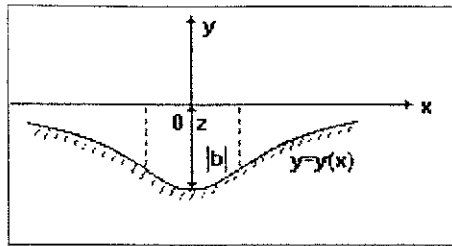


Figura 4.14- Representação de vale simétrico de profundidade $|b|$.

Considera-se que o maciço rochoso seja linearmente elástico, homogêneo, anisotrópico e contínuo, com densidade uniforme ρ , e que as propriedades elásticas e a geometria do espaço semi-infinito são independentes da direção z .

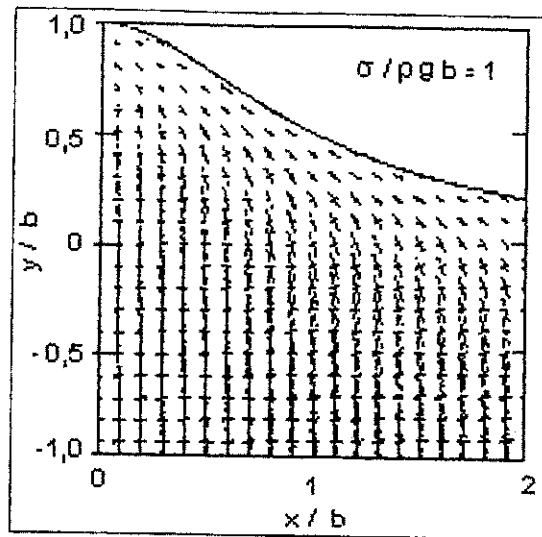
Como demonstrado por Pan e Amadei (1992) e Pan, Amadei e Savage (1994), as relações entre as seis componentes de tensão σ_{ij} ($i, j = x, y, z$) e a tensão característica $\rho g |b|$, dependem das relações adimensionais das constantes elásticas E / E' , G / G' , ν e ν' para rochas transversalmente isotrópicas.

Estas relações também dependem de:

- 1- ângulos de orientação β e ψ , dos planos de anisotropia relativos aos eixos x , y e z , vinculados à elevação ou vale;
- 2- coordenadas $(x / |b|, y / |b|)$ dos pontos onde as tensões são calculadas;
- 3- relações $a / |b|$ e $b / |b|$ que descrevem a geometria da elevação ou do vale.

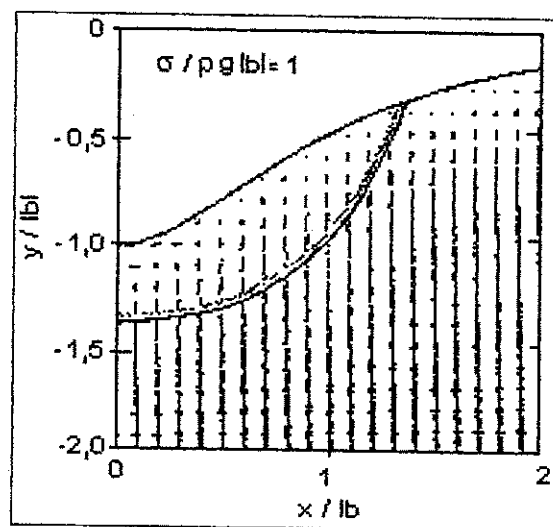
Um regime de tensão gravitacional, atuante num maciço rochoso transversalmente isotrópico, com $E / E' = G / G' = 3$, $\nu = 0,25$, $\nu' = 0,15$, e anisotropia vertical ($\psi = 90^\circ$) para os casos de elevação e vale, onde a relação $a / |b| = 1$ são mostrados nas figuras seguintes (devido à simetria, apenas a metade direita das representações de trajetórias de tensão e contorno são mostradas).

Nas Figuras 4.15 e 4.16 nem a tensão horizontal, nem a vertical, são as maiores mas aquelas que são orientadas paralela e perpendicularmente à superfície ao longo do contorno da elevação ou do vale, e, gradualmente, com a profundidade passa a ser horizontal e vertical.



Fonte: Pan et al., 1995

Figura 4.15- Trajetórias de contorno de tensão em uma elevação.

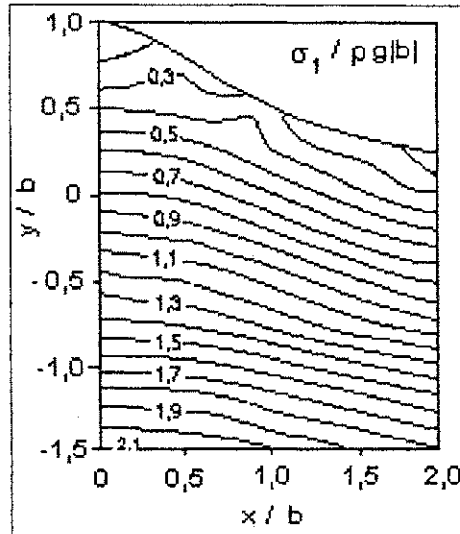


Fonte: Pan et al., 1995

Figura 4.16- Trajetórias de contorno de tensão num vale. A região demarcada representa a extensão da zona de tração no fundo do vale.

4.4.4.1.1- Comportamento de tensões em elevações

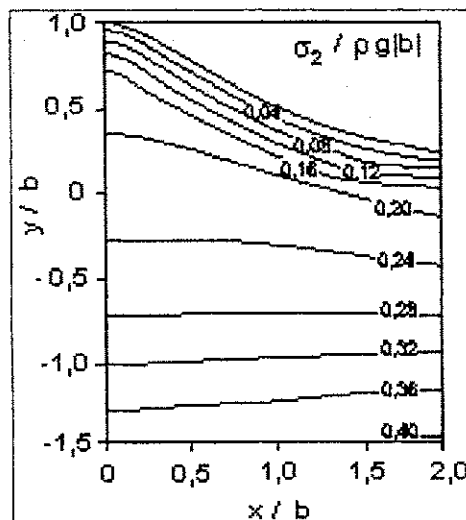
A Figura 4.17 indica que os maiores valores da tensão principal compressiva máxima ($\sigma_1 / \rho \cdot g \cdot |b|$) são alcançados na encosta da elevação (0,33, em $x / |b| = \pm 0,94$):



Fonte: Pan et al., 1995

Figura 4.17- Contorno de $\sigma_1 / \rho \cdot g \cdot |b|$ numa elevação.

Na Figura 4.18 fica evidenciado que o contorno da tensão compressiva mínima ($\sigma_2 / \rho g |b|$) tende a seguir a forma da elevação.

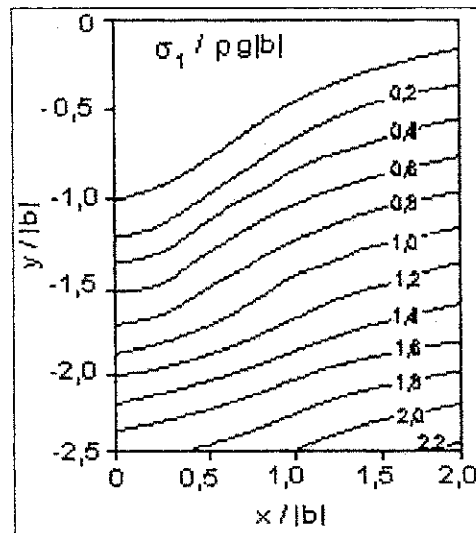


Fonte: Pan et al., 1995

Figura 4.18- Contorno de $\sigma_2 / \rho \cdot g \cdot |b|$ numa elevação.

4.4.4.1.2- Comportamento de tensões em vales

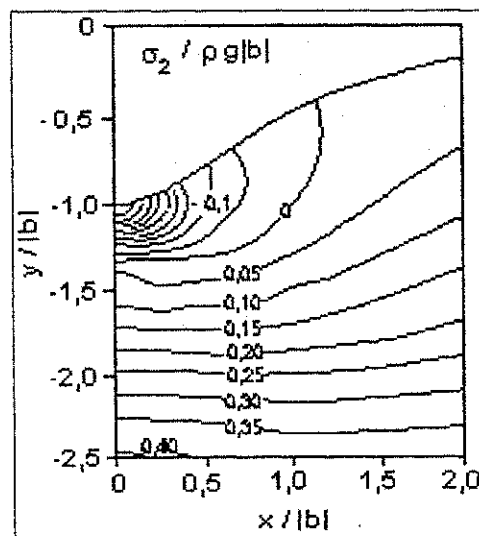
A tensão máxima ($\sigma_1 / \rho \cdot g \cdot |b|$) é compressiva, apresentando contorno na forma do vale, Figura 4.19.



Fonte: Pan et al., 1995

Figura 4.19- Contorno de $\sigma_1 / \rho \cdot g \cdot |b|$ num vale

A Figura 4.20 mostra que ocorre uma concentração de tração ($\sigma_2 / \rho \cdot g \cdot |b|$) no fundo do vale ($-0,51$ em $x/|b| = 0$);



Fonte: Pan et al., 1995

Figura 4.20- Contorno de $\sigma_2 / \rho \cdot g \cdot |b|$ num vale.

4.4.4.1.3- Efeito do mergulho e grau de anisotropia

Na tabela 4.4 apresentam-se os efeitos de algumas condições sobre as variações de mergulho e plano de anisotropia, quanto à variação de tensão.

Tabela 4.4- Influência do Mergulho e Grau de Anisotropia sobre a Variação de Tensão

Condição	Efeitos
Profundidade Aumenta	- a relação tensão horizontal : tensão característica ($\sigma_{xx} / \rho.g. b $) diminui quando o ângulo de mergulho (ψ) aumenta.
Relação de Elasticidade (E/E') é Fixa (para Anisotropia Horizontal e Vertical)	- com o aumento da profundidade, o valor da relação G / G' não tem efeito sobre a variação de $\sigma_{xx} / \rho.g. b $ (o maciço rochoso é mais deformável no plano normal aos planos de isotropia transversa).
Relação de Rigidez (G / G') é Fixa (para Anisotropia Horizontal e Vertical)	- com o aumento da profundidade, o valor da relação E/E' aumenta, também aumenta a relação $\sigma_{xx} / \rho.g. b $ (o maciço rochoso é mais deformável segundo o eixo vertical).
Mergulho do Plano de Anisotropia	- se o plano de anisotropia é horizontal ($\psi = 0^\circ$), a tensão é maior; - se o plano de anisotropia é vertical ($\psi = 90^\circ$), a tensão é menor.
Plano de Anisotropia Inclinada	- a trajetória da tensão principal e a região de tração são mais simétricas, relativamente ao eixo vertical; - um aumento da relação do módulo de rigidez (G/G') implica em um aumento de $\sigma_{xx} / \rho.g. b $ e uma redução da região de tração do fundo do vale; - um aumento da relação do módulo de elasticidade (E/E') implica em redução de $\sigma_{xx} / \rho.g. b $.
Plano de Anisotropia Vertical ($\psi = 90^\circ$)	- com o aumento de profundidade, as tensões principais se ajustam mais rapidamente às direções vertical e horizontal; - o efeito da relação de elasticidade E/E' na amplitude de $\sigma_{xx} / \rho.g. b $ é pequeno.

4.4.4.1.4- Efeitos da geometria e do relevo

Os efeitos da geometria e do relevo encontram-se resumidos na tabela 4.5.

Tabela 4.5- Efeitos da Geometria e Topografia sobre as Tensões

Condição	Efeitos
Geometria de vales e montes	
Inclinação do Terreno (a / b) Aumenta	<ul style="list-style-type: none">- o valor da relação de tensão máxima : tensão característica ($\sigma_1 / \rho.g. b$) aumenta ao longo da superfície;- a variação da relação de tensão máxima : tensão característica ($\sigma_1 / \rho.g. b$) é menor ao longo da superfície;- a tensão máxima é encontrada na região de crista da elevação;- o talude do vale diminui e aumenta a amplitude lateral da região de tração no fundo do vale.
Topografia em profundidade	
Topografia Mais Suave	<ul style="list-style-type: none">- o campo de tensões é afetado em maiores profundidades e em uma área mais extensa.
Plano de Anisotropia Vertical ($\psi = 90^\circ$)	<ul style="list-style-type: none">- o efeito sobre as tensões em profundidade é maior.

4.4.5- Efeitos da Erosão

Erosão, ou denudação, conforme proposto por Voight (1966), é um mecanismo que pode ser responsável por elevadas tensões horizontais nos níveis superiores da crosta terrestre.

Goodman (1989), denominando de K_0 à relação inicial de tensão horizontal : vertical em determinado ponto localizado na profundidade z_0 do maciço rochoso, supôs um descarregamento da tensão vertical, pela remoção de uma camada de espessura Δz . Utilizando a teoria da elasticidade, demonstrou que a nova relação de tensão, numa profundidade $z = z_0 - \Delta z$, é igual a:

$$K = K_0 + \left[K_0 - \frac{\nu}{1-\nu} \right] \frac{\Delta z}{z_0 - \Delta z} \quad \text{Eq. 4.13}$$

Haxley e Turcotti (1976) sugerem que o estado de tensão induzido pela erosão compreende três princípios básicos a serem considerados:

- 1- redução da pressão do capeamento;
- 2- associação soergimento - reajuste isostático;
- 3- tensão termal, proveniente de redução de temperatura.

4.5- Tensões Tectônicas e Residuais

As tensões podem resultar em juntas, ou fraturas, que são geneticamente classificadas de acordo com suas causas fundamentais:

- tensões tectônicas –fraturamento singenético com a atividade tectônica;
- tensões residuais - fraturamento tardio devido a eventos que ocorreram bem antes de sua propagação;
- contração por eventos alternados de congelamento e degelo;
- movimentos mássicos de superfície.

4.5.1- Tensões Tectônicas

A diferenciação entre tensões tectônicas ativas e remanescentes, através da observação da estrutura geológica, geralmente é difícil. O estado de tensões atual de uma determinada área pode não ser relacionado às estruturas geológicas que vemos hoje. É comum que tenha mudado durante eventos tectônicos passados, resultando em dobras e falhas.

Segundo Zoback et al., 1989 há dois grupos de forças que são identificadas como responsáveis pelas tensões tectônicas de acordo com a escala de atuação: principal, cujas forças atuam nos limites da placa litosférica; e local.

A Figura 4.21 apresenta um esboço da escala de atuação das forças tectônicas, cujos eventos estão enumerados e agrupadas na Tabela 4.6.

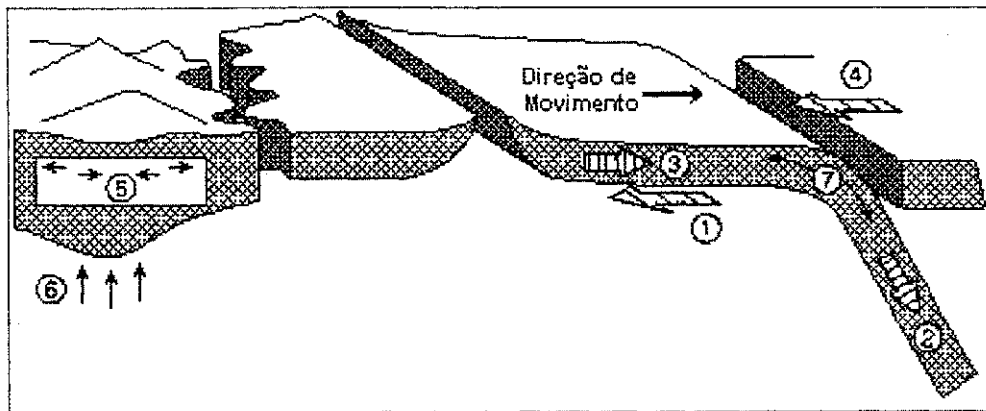


Figura 4.21- Forças responsáveis por tensões tectônicas, Zoback et al., 1989.

Tabela 4.6- Relação de Forças Tectônicas e sua Atuação

Forças Tectônicas	Atuação
Escala principal	<ol style="list-style-type: none"> 1. tensão de cisalhamento da base da litosfera; 2. grandes placas arrancadas das zonas de subducção; 3. cordilheiras impelidas de cadeias oceânicas; 4. sobreposição de placas na sucção de fossas.
Escala local	<ol style="list-style-type: none"> 5. encurvamento devido a cargas superficiais; 6. compressão isostática; 7. flexão de litosfera oceânica.

4.5.2- Tensões Residuais

São "tensões auto-equilibrantes que permanecem numa estrutura mesmo se as forças e momentos externos forem removidos" (Voight, 1966). Aparentemente estas tensões estão relacionadas com um sistema de balanceamento (não necessariamente nulo) entre forças de tração e compressão, sendo encontradas em domínios desde micro (grãos e cristais) até macro-escala.

Hyett, Dyke e Hudson (1986) sugerem três exigências fundamentais para a geração de tensão residual na rocha:

- a- variação de nível de energia (tensão ou topografia);
- b- heterogeneidade causada por diferentes partes constituintes do material; e,
- c- compatibilidade (pelo menos parcial) de partes constituintes.

As tensões residuais podem permanecer no maciço que esteve sujeito a altíssimas tensões, quer as condições ainda ocorram, ou sejam diferentes. Mesmo que o maciço rochoso tenda a relaxar, quando a carga é reduzida (devido à erosão ou soerguimento), ou ocorrendo variações de temperatura (devido ao resfriamento), são criadas restrições pelo entrelaçamento da trama da própria rocha.

Hyett, Dyke e Hudson (1986) sugerem também que, se a tensão residual aumenta, o volume de rocha diminui em toda escala de observação. Esta tendência é atribuída ao fato de que, como o volume aumenta, torna-se mais comum se encontrar descontinuidades que não permitam a transmissão das tensões residuais.

Sendo assim, as tensões residuais podem resultar em dois tipos genéticos de juntas, devido a:

- tensões tectônicas que não foram completamente aliviadas;
- tensões de rochas consolidadas em grandes profundidades e que gradualmente se aproximam da superfície, devido à erosão.

Neste último caso, quando a rocha aflora a componente vertical é imediatamente anulada, visto que apenas o ar atmosférico é a barreira existente, mas os esforços laterais permanecem e podem cada vez mais se pronunciar sob a forma de erosão.

Principalmente sobre exposições artificiais (pedreiras) de corpos graníticos podem ocorrer o fenômeno de deslocamento (*sheeting*), como forma de ruptura similar às juntas, devido ao alívio de cargas suprajacentes, quer seja

como efeito de erosão ou pela retirada da rocha, não estando relacionado com processo de flexão ou outra feição estrutural primária.

Os planos de deslocamento são um tanto curvos e sub-paralelos, ou paralelos, à superfície topográfica. As fraturas resultantes são pouco espaçadas, quando próximo da superfície, mas com o aumento da profundidade tendem a desaparecer em alguns metros. Observa-se que uma ou outra destas juntas podem ser seguidas lateralmente passando-se a outras, ou simplesmente desaparecer de maneira brusca contra juntas verticais profundas, não relacionadas com a topografia. Se tal fato ocorrer, evidencia-se que o deslocamento ocorreu após a formação de juntas verticais ou sub-verticais. Outrossim, observa-se que o deslocamento corta xenólitos, foliação e pegmatitos tardios.

Contudo, em superfície e em grandes profundidades existem planos de fraqueza "invisíveis" (microfraturas), paralelos ao plano de deslocamento, que podem ser utilizados nas explorações.

4.6- Estimativa de Existência de Tensões Elevadas

4.6.1- Tensões Horizontais Elevadas

Estas podem ser usualmente inferidas a partir de observações de campo e de serviços de sondagem. No campo, estas tensões podem se manifestar sob diferentes feições estruturais (predominância de falhas de empurrão, existência de falhas e dobras nas estruturas próximas à superfície e nas praças de minas a céu aberto).

No caso de serviços de sondagem, conforme registrado por Hast (1958), as tensões horizontais, quando elevadas, estão sempre resultando na

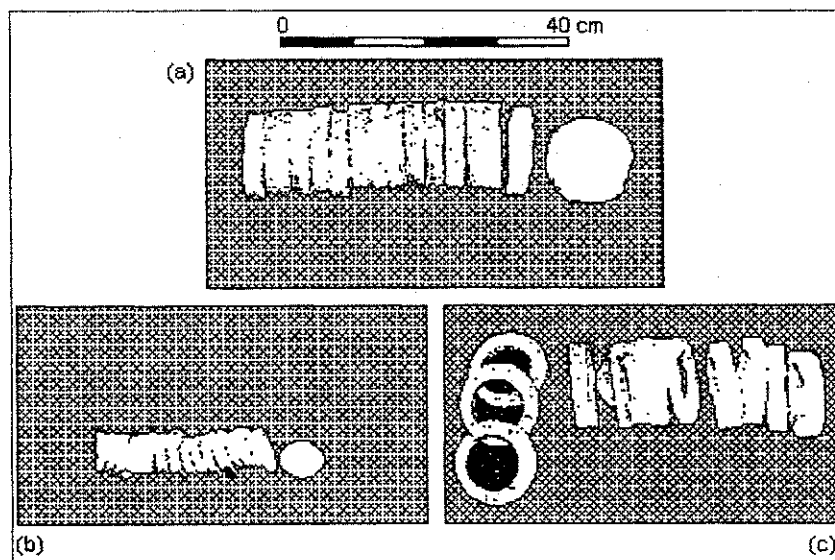
formação de discos e anéis horizontais de testemunhos. Estes quebram-se formando superfícies usualmente curvas (em forma de sela), com centro de curvatura próximo à base do furo.

Esses testemunhos são recuperados de vários tipos de rochas sujeitas a altas tensões e os anéis são conseguidos através da técnica de recorte, podendo apresentar três formas distintas, em seções de 50 cm de comprimento, Figuras 4.22 e 4.23.



Fonte: Ishida e Saito, 1995.

Figura 4.22- Três tipos de testemunhos recuperados



Fonte: Ishida e Saito, 1995.

Figura 4.23- Exemplos típicos de testemunhos recuperados em forma de discos com diâmetro de 115 mm (a); discos de 54 mm (b); e, anéis de 75 e 115 mm de diâmetro (c).

Baseados em resultados experimentais recentes, e análises de superfícies de discos por microscopia eletrônica, Haimson e Lee (1995), concluíram que o disco é resultado do desenvolvimento de trincas de extensão sub-horizontais na base do furo.

Existem dois critérios para investigar a possibilidade de ocorrer *core-discing*:

- empírico, de Obert e Stephenson, de 1965, baseado na Equação 4.14:

$$\sigma_r = k_1 + k_2 \sigma_z, \quad \text{Eq. 4.14}$$

onde, σ_r é a tensão radial; σ_z a tensão axial; e k_1 e k_2 são constantes que dependem da rocha;

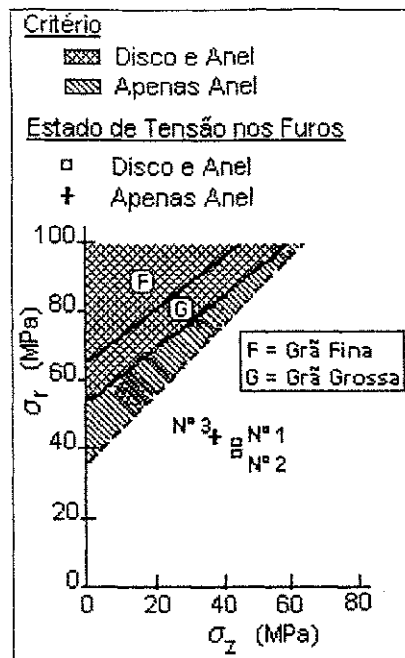
$$k_1 = k_0 + 2,0 S_0, \text{ (com } k_0 = 23,4 \text{ MPa e } S_0 \text{ é a resistência ao cisalhamento).}$$

- teórico, de Sugawara et al., 1978,

$$\sigma_r / S_t = 4,0 + \sigma_z / S_t \quad \text{Eq. 4.15}$$

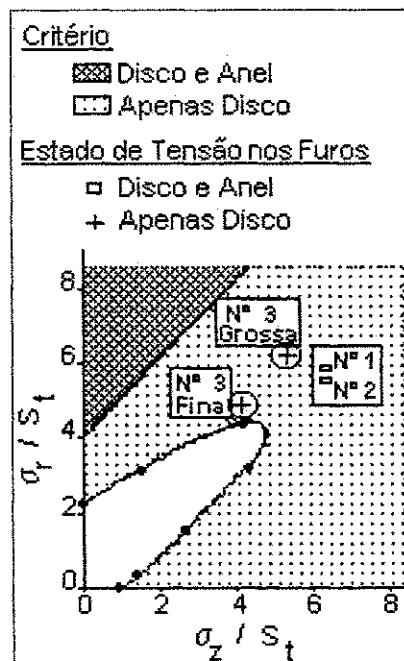
onde, σ_r é a tensão radial; σ_z a tensão axial; e S_t é a resistência à tração da rocha;

No trabalho de Ishida e Saito, 1995, a partir da análise de campanha de sondagem realizada no Japão, fica evidenciada a imperfeição dos critérios, tendo em vista que estes não consideraram a componente de cisalhamento ao longo do eixo de sondagem. As discrepâncias entre o previsto e obtido são apresentadas nas Figuras 4.24 e 4.25.



Fonte: Ishida e Saito, 1995

Figura 4.24- Comparação entre estado de tensão medido em três furos de sonda e o baseado no critério de Obert-Stephenson, onde a componente radial de tensão é calculada a partir da relação $\sigma_r = (\sigma_x + \sigma_y) / 2$.



Fonte: Ishida e Saito, 1995

Figura 4.25- Comparação entre o estado de tensão medido em três furos de sonda e baseado no critério teórico de Sugawara et al., que é normalizado pela resistência à tração.

Sendo assim, deve-se destacar que:

- 1- o disco de sondagem é apenas um indicador da existência de tensões horizontais elevadas (sem ser conclusivo);
- 2- a formação do disco depende de alguns parâmetros: estado de tensão *in situ*, propriedades de resistência da rocha, e que a tensão seja paralela ao furo (Stacey, 1982);
- 3- a informação sugerida pelo disco é apenas qualitativa;
- 4- o disco também pode ocorrer devido a deficiência na operação de sondagem, em circunstâncias em que é aplicado demasiado avanço à coroa.

4.6.2- Estimativa de Orientação de Tensão

Existem vários métodos propostos na literatura para se estimar a orientação de tensões *in situ*. Tais métodos podem ser divididos em três principais grupos, sendo o primeiro o de maior relevância para o nosso estudo:

- Orientação de tensões de estruturas geológicas: métodos baseados na orientação, distribuição, deformação e fraturamento de feições geológicas, aplicados na amplitude desde cristais até montanhas;
- Orientação de tensões de solução de plano de falha: métodos que dependem de análises do primeiro movimento de um terremoto (que não será abordado, para efeito deste trabalho);
- Orientação de tensões por análise de estrangulamento de escavação circular: método experimental para indicar a direção da tensão *in situ*.

Estruturas geológicas como falhas, dobras, juntas, diques, sills, vulcões, etc., tem sido utilizadas por geólogos e geofísicos como indicadoras de paleotensões. Freedman (1964) apresentou várias técnicas petrográficas que

podem ser usadas para determinar a direção das tensões *in situ* no tempo da deformação.

Quanto à escala de aplicação, algumas destas técnicas permitem análises de orientação de dobras (macro-escala); deslizamento intercrystalino, fenômenos de rotação e recristalização (micro-escala).

A orientação de corpos intrusivos tem sido analisadas e associadas aos campos de tensões, sendo aceito que:

- a propagação de diques é comparável a um grande teste de fraturamento hidráulico, tendo magma no lugar da água;
- os diques se propagam na direção normal à tensão principal mínima.

4.7 - Métodos de Medição de Tensões *In Situ*

4.7.1- Medição de Tensões: Introdução

Existindo evidências sobre a existência de um tensor de tensões atuante, podendo interferir sobre a recuperação da exploração, deve-se proceder sua definição através de técnicas de medição de tensões *in situ*.

De maneira geral todas as técnicas de medição de tensões *in situ* consistem em ensaios destrutivos. A resposta a este "distúrbio provocado", na forma de deformação, deslocamento ou pressão hidráulica, é medida e analisada levando-se em consideração o comportamento constitutivo da rocha.

Existem muitos fatores que precisam ser considerados quando se faz um planejamento de um programa de medição de tensões *in situ*:

- 1- a geologia local e os aspectos ambientais, e suas variações, devem ser identificados, incluindo-se topografia, tipo de rocha, estruturas geológicas, anisotropia, heterogeneidades e indícios de presença de tensões elevadas, afora a ocorrência de água, temperatura da rocha e da água e a possibilidade de influência de condições externas. Todos estes fatores tem importância no processo de seleção do método de medição mais indicado e auxiliarão na interpretação das próprias medidas;
- 2- os objetivos das medições devem ser bem identificados e estar integrados ao projeto de interesse. Isto afeta a seleção da técnica, a localização e número de medidas a realizar, e em que direção e profundidade;
- 3- existência de equipamentos e pessoal treinado;
- 4- identificação da disponibilidade de serviços e acessos;
- 5- estimativa do tempo e disponibilidade de recursos financeiros para realização do programa de medições;
- 6- é desejável que as tensões sejam definidas por mais de um método (denominado híbrido), realizando-se medições nos mesmos ou em locais diferentes através de metodologias diferentes (o que permite um melhor refinamento).

As técnicas de medição podem ser divididas em seis grandes grupos principais de métodos: de alívio; de macaco hidráulico; hidráulicos; de recuperação de deformação; de estrangulamento de sondagem; e, diversos.

Dos métodos acima, o de alívio (ou recorte) e o macaco hidráulico são os de aplicação mais apropriada para a atividade de rochas para fins ornamentais, sendo os outros aplicados a medições em grandes profundidades ou que se encontram em evolução

A Tabela 4.7 apresenta os métodos de medição de tensões *in situ* e uma estimativa do volume de rocha envolvida em cada método:

Tabela 4.7- Métodos de Medição de Tensões *in Situ*

MÉTODO	TÉCNICA	Volume (m ³)
Hidráulicos	Fraturamento Hidráulico	0,5 – 50
	Fraturamento de Camisa	10 ⁻²
	Testes Hidráulicos de Fraturas Pré-Existentes	1 – 10
Alívio	Métodos de Alívio de Superfície	1 – 2
	Recorte	10 ⁻³
	Métodos de Alívio de Escavações	10 ⁻³ – 10 ⁻²
	Alívio de Grandes Volumes de Rocha	10 ² – 10 ³
Macaco Hidráulico	Macaco Plano	0,5 – 2
	Macaco Curvo	10 ⁻²
Recuperação de Deformação	Recuperação de Deformação Inelástica	10 ⁻³
	Análise de Curva de Deformação Diferencial	10 ⁻⁴
Ruptura de Furos	Análises de Medidor de Profundidade e Caliper	10 ⁻² – 10 ²
	Análise Televisual de Furos	10 ⁻² – 10 ²
Diversos	Análise de Dados de Mergulho de Falhas	10 ⁸
	Mecanismos Focais de Terremotos	10 ⁹
	Métodos Indiretos (Efeito Kaiser, etc.)	10 ⁻⁴ – 10 ⁻³
	Inclusões	10 ⁻² – 1
	Medidas de Tensões Residuais	10 ⁻⁵ – 10 ⁻³

4.7.2- Métodos de Alívio

Sua idéia central é isolar, parcial ou totalmente, uma amostra de rocha do campo de tensão atuante no maciço rochoso e monitorar sua resposta. O isolamento pode ser feito por diferentes formas: furos de recorte, fendas de corte, ou escavação.

As tensões são inferidas pelos deslocamentos ou deformações criadas pelo processo de alívio (descarregamento) e por medidas de amostras de rochas isoladas pela sondagem, ou na rocha do entorno associada ao processo de alívio. As interpretações corretas dos testes de alívio dependem da capacidade de:

- a- estabelecer a relação tensão-deformação (ou deslocamento) da rocha;

- b- ser capaz de determinar as propriedades do maciço, a partir de testes das amostras;
- c- ter instrumental sensível para captar pequenos deslocamentos ou deformações.

Apesar deste método ter sido desenvolvido para rochas duras, ele tem sido aplicado, com sucesso, para rochas brandas e frágeis, como evaporitos.

O método de alívio pode ser dividido em três principais sub-grupos, de acordo com:

- 1) Métodos de Alívio de Superfície: que envolvem medidas de deslocamento, ou deformação, em escavações subterrâneas ou a céu aberto.
- 2) Métodos de Alívio de Furos de Sonda: através de instrumentação de furos.
- 3) Métodos de Alívio de Maciço Rochoso: envolvem a resposta de grandes volumes de rochas.

4.7.2.1- Métodos de Alívio de Superfície

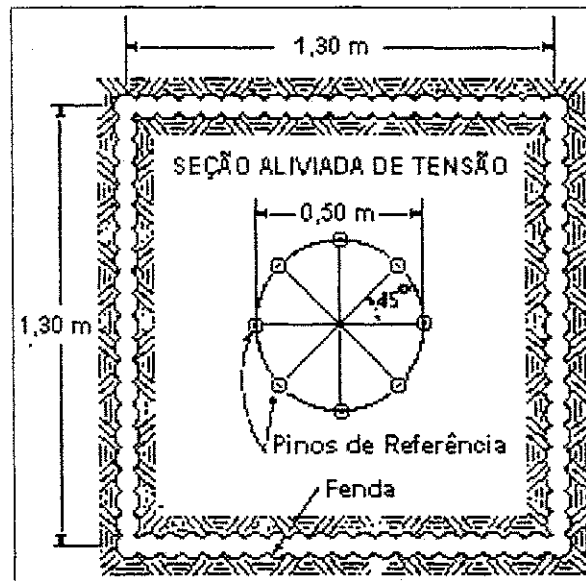
Foi a primeira técnica aplicada para determinação da tensão *in situ* em escavação subterrânea, sendo instrumentado com o auxílio de escalas ou pinos, e seu princípio é medir a deformação da rocha depois de um corte ou furo de alívio.

Esta técnica sofre de algumas limitações:

- a precisão do calibrador, ou dos pinos, pode ser afetada por incidência de poeira e umidade;
- as deformações, ou deslocamentos, são medidas na rocha que pode ter sido alterada, ou danificada, por intemperismo e pelo próprio processo de escavação;

- fatores intervenientes, que causam concentração de tensões, devem ser quantificados localmente nas paredes da escavação para identificação das componentes do campo de tensão.

A Figura 4.26 apresenta modelo de uma superfície aliviada por perfuração contínua.



Fonte: Merrill, 1964.

Figura 4.26- Croquis representativo de uma seção de rocha e seus pontos de instrumentação (dimensões estão em metro).

4.7.2.2- Métodos de Alívio de Furos de Sonda (Recorte)

São classificados como métodos de alívio total, sendo desenvolvidos dentro da seguinte rotina:

1. execução de furo de grande diâmetro, até a profundidade exigida para totalizar o volume de rocha que se deseja medir as tensões;
2. em algumas técnicas um furo piloto (pequeno diâmetro) e concêntrico ao primeiro é realizado no fundo deste;
3. um dispositivo medidor de deformação, ou deslocamento, é inserido no furo piloto;

4. prolonga-se a perfuração de grande diâmetro para que o dispositivo registre as variações de deformações, ou deslocamentos.

A Figura 4.27 exemplifica um perfil das etapas de desenvolvimento do método.

Ou, após a execução da fase 1.(sondagem de grande diâmetro), instalar um dispositivo para instrumentação do fundo do furo.

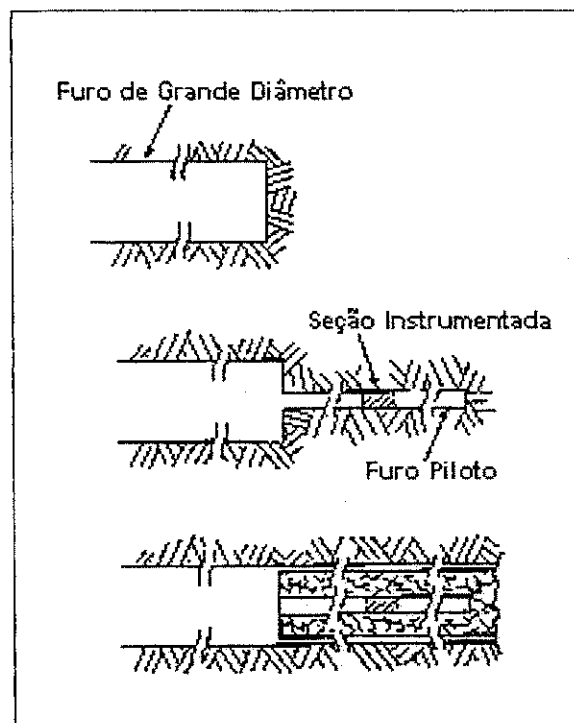


Figura 4.27- Modelo de desenvolvimento do método de recorte.

Dependendo do instrumento utilizado para monitorar a rocha durante o recorte, o estado de tensão completo pode ser determinado em um, dois ou três furos não paralelos entre si, entretanto o campo de tensão que atua no volume considerado precisa ser homogêneo.

A taxa de sucesso dos métodos de recorte raramente ultrapassa 50% (Herget, 1993), sendo os problemas advindos, principalmente, da instalação do sensor e de ambientes de calor e poeira. Outra limitação da técnica é quanto

à intensidade das próprias tensões *in situ*. Ela deve ser utilizada em profundidades onde a resistência da rocha não seja ultrapassada.

De acordo com a intensidade das componentes de deformação que forem registradas, segue-se o critério de análise proposto por Bielenstein e Barron (1971), conforme Figura 4.28.

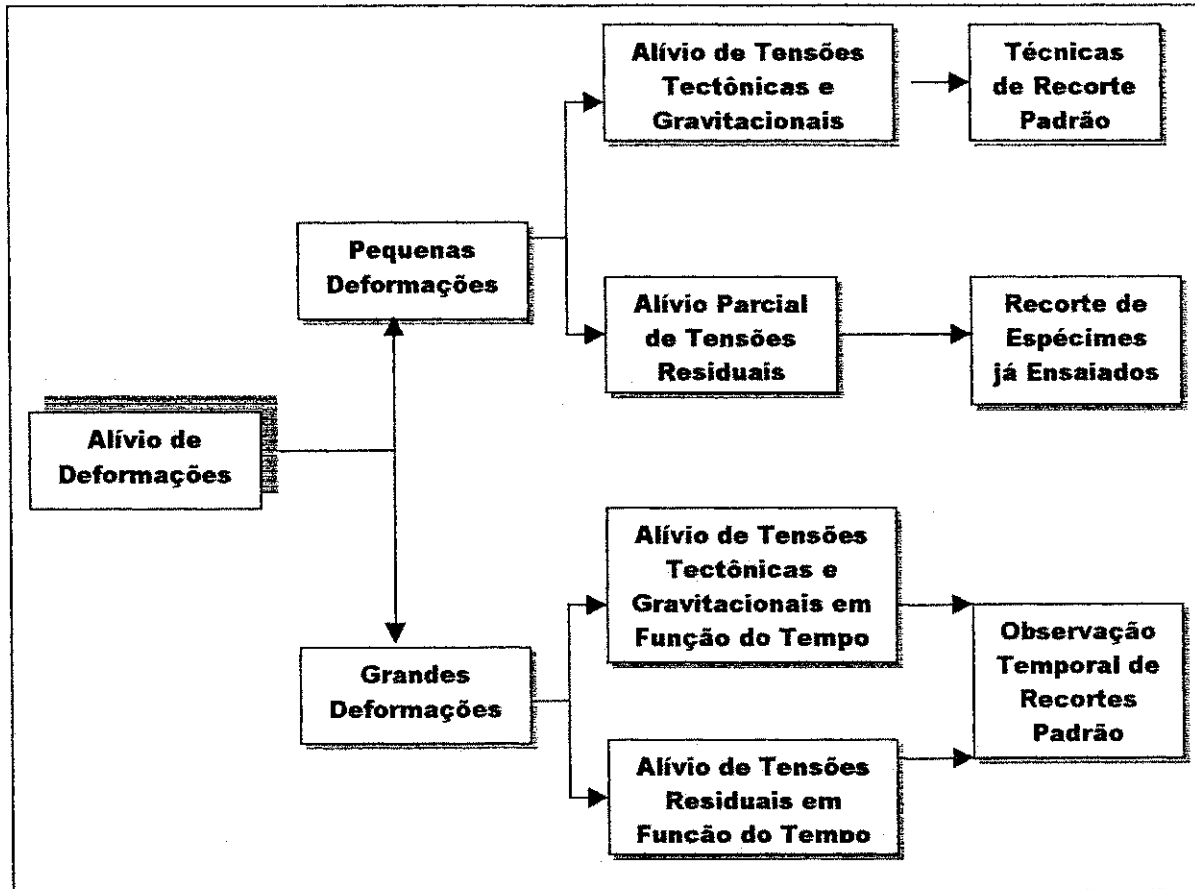


Figura 4.28- Padrão de procedimento de acordo com a análise de alívio de deformações.

Para o caso de pequenas deformações assume-se comportamento elástico, interpretado em termos de intensidade de tensões. Nas grandes deformações a interpretação é feita apenas em termos de direções de tensões.

4.7.2.3- Método de Alívio de Maciço Rochoso

O principal inconveniente deste método é que o mesmo envolve pequenos volumes de rocha, e as medidas podem ser sensíveis às variações de composição mineral e do tamanho dos grãos. Para sanear esta limitação tem sido propostas algumas técnicas envolvendo grandes volumes de rocha, dentre elas:

- 1- realizar-se recorte com muitos sensores de deformação na superfície e em diferentes níveis do furo; os dados devem ser analisados para determinar as tensões locais ou a tensão média para todo o volume de rocha considerado em todas as medidas;
- 2- realizar-se medição numa escavação enquanto se abre um corte subterrâneo, medindo-se os deslocamentos em uma ou muitas seções transversais no sentido da abertura da escavação, seguido de análise por métodos analíticos e numéricos (Elementos Finitos e Elementos de Fronteira);
- 3- aproximação por retro-análise (chamada de técnica de domínio de escavação), que consiste em se conjugar dados de uma técnica de medições de deformações e deslocamentos, medidos com calibradores de convergência, extensômetros, medidas de fechamento, inclinômetros, todas realizadas simultaneamente para determinar o campo de tensões *in situ* tridimensional, utilizando-se do método de elementos de fronteira tridimensional, associado ao avanço da escavação.

4.7.3- Métodos do Macaco Hidráulico

Também denominado de método de compensação de tensão, é baseado no princípio de que o equilíbrio de um maciço rochoso é alterado por fendas de corte (planar ou circular) na superfície da rocha. Isto cria deformações que são registradas em calibradores de deformação colocados próximos à fenda.

O equilíbrio é recuperado pela inserção de um dispositivo (macaco hidráulico) nas fendas. Quando o dispositivo é pressurizado todas as deformações tendem a desaparecer. As tensões *in situ* são definidas pela reação da rocha durante a pressurização, assumindo-se seu comportamento elástico.

A Figura 4.29 mostra um esquema, em plano e perfil da aplicação do macaco plano

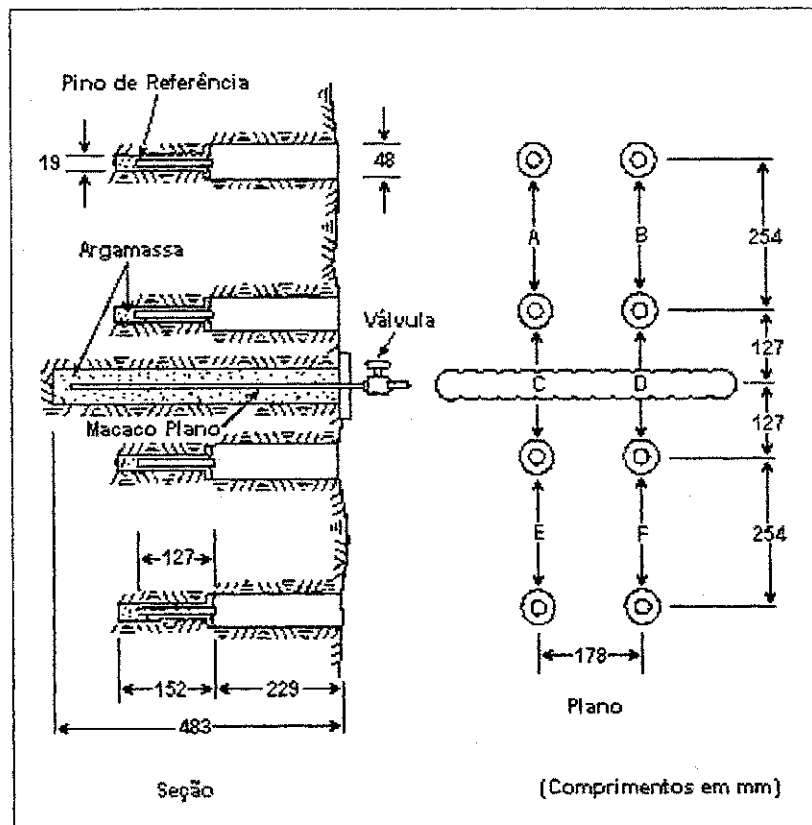


Figura 4.29- Modelo de macaco hidráulico utilizado por Merrill, 1964.

Desta forma, a pressão de compensação é utilizada como uma estimativa direta da tensão normal ao macaco hidráulico. Como cada teste define uma componente do campo de tensão, é necessária a realização de seis testes para obter o campo completo.

As vantagens principais desta técnica é que ela não exige o conhecimento das constantes elásticas da rocha para determinar-se a tensão tangencial dos pontos da parede da escavação; as tensões são medidas

diretamente no maciço; o equipamento é rústico e estável; e, os testes podem ser realizados sobre grandes áreas, envolvendo volumes de rocha consideráveis.

4.7.4- Métodos Hidráulicos

Mede o estado de tensões *in situ* em furos de escavações, onde a pressão é aplicada numa seção isolada por revestimento, sendo aumentada até que as fraturas pré-existentes e novas, sejam abertas.

A pressão do fluido, necessária para abrir, gerar e reabrir fraturas em uma dada profundidade, é medida e relacionada ao campo de tensões *in situ*. A direção das tensões é inferida por observação, ou medida a orientação das fraturas abertas ou induzidas hidráulicamente.

Este método não exige conhecimento avançado das propriedades de deformabilidade da rocha e pode ser executado abaixo do nível de água.

O método hidráulico é utilizado para furos em grandes profundidades e está sub-dividido em três técnicas distintas: fraturamento hidráulico; fraturamento de camisa; e, testes hidráulicos em fraturas pré-existentes.

4.7.5- Método de Recuperação de Deformação

As técnicas deste método tem sido utilizadas em medidas de tensões em grandes profundidades estão baseadas no registro de deformações inelásticas, geralmente seguidas pela abertura e propagação de microtrincas preferenciais, que uma amostra de sondagem apresenta logo após a perfuração.

O método está subdividido em duas técnicas diferentes:

- recuperação de deformação inelástica (ASR – Anelastic Strain Recovery); e,
- análise da curva de deformação diferencial (DSCA – Differential Strain Curve Analysis).

4.7.6- Método de Ruptura de Furos

É uma técnica utilizada para indicar a existência de tensões horizontais principais, máxima e mínima, que atuam na parede de furos verticais profundos, aplicada na escala continental. Existe registro de sondagem até 11.600 m, tornando operacionalmente difícil a efetivação de medidas diretas nestas profundidades. Assim, ela é usada apenas para verificar a presença e orientação das tensões.

Em sondagem vertical a menor componente de tensão *in situ* é definida como coincidente com a direção de fechamento do furo. Quando ocorre o desmoronamento das paredes dos furos, os sensores de direção ou os teleregistradores são capazes de fornecer uma estimativa sobre a orientação das tensões principais horizontais, máxima e mínima, e a variação desta orientação com a profundidade.

A rocha do entorno de furos de sonda pode não ter capacidade de resistir à concentração de tensão compressiva associada ao processo de perfuração. A quebra da rocha resultante de duas zonas opostas de alargamento do furo é denominada "fechamento" (Figura 4.30).

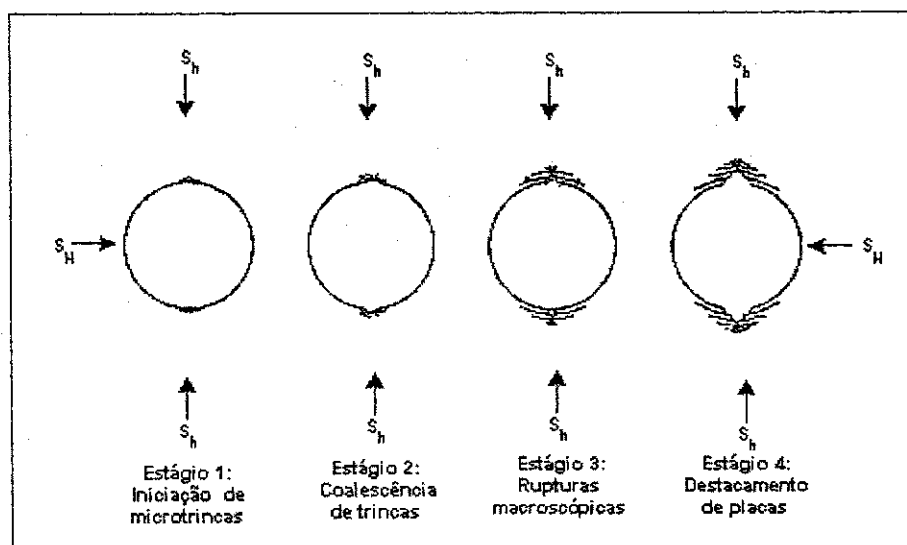


Figura 4.30- Representação do desenvolvimento progressivo do processo de fechamento de um furo de sonda.

4.7.7- Outros Métodos

4.7.7.1- Análise de Dados de Falha de Empurrão

A utilização de medidas de materiais estriados numa população de falhas pode ser utilizada para determinar a orientação e intensidade do campo de tensão *in situ*, tratando-se de técnica de grande potencial de evolução. É um método utilizado em escala de afloramento e está baseado em três princípios:

- a- todos os materiais estriados são relacionados a um tensor de tensão desconhecido;
- b- o movimento de cada plano de falha é paralelo a ação da tensão de cisalhamento que atuou no próprio plano;
- c- os movimentos das falhas são independentes.

A vantagem desta técnica é que sua aplicação não exige o conhecimento das propriedades de deformabilidade da rocha. Contudo, o ângulo de atrito de Coulomb e os três princípios enunciados estão implícitos nas análises.

4.7.7.2- Mecanismos Focais de Terremotos

Esta técnica consiste em se analisar as informações sobre os reflexos da primeira onda de terremotos que ocorrem a grandes profundidades, inferindo-se, a partir de seu comportamento, as condições do maciço rochoso, sendo aplicada para medição e estimativa de tensões existentes em escala continental.

4.7.7.3- Métodos Indiretos

São todos aqueles que procuram identificar variações de propriedades físicas, mecânicas ou quaisquer outras, que ocorrem no maciço rochoso, como resultado da variação de tensão. Existe uma série de técnicas que estão em evolução, mas se encontram em um estágio de grande aceitabilidade, podendo-se destacar:

- Efeito Kaiser;
- Análise Holográfica; e,
- Ressonância Magnética Atômica.

4.7.8- Efeito de Escala

As relações entre as propriedades do maciço rochoso e as dimensões geométricas de uma amostra de mão são denominadas de efeito de escala.

Quando se trabalha com tensão *in situ* deve-se considerar três tipos potenciais de efeitos de escala que incidem sobre:

- 1- a própria tensão;
- 2- as medidas de tensão; e,
- 3- os dados das propriedades que estão envolvidas nas análises de medidas de tensão *in situ*.

Relativamente à própria tensão, deve-se considerar que:

1. seu conceito é aplicado a um ponto do contínuo: a força atua num ponto e a tensão é definida uma área infinitesimal do seu entorno - Cauchy;
2. todas as técnicas de medição são aplicadas em volumes variáveis de rochas, que consistem de um grande número de pontos (grandes volumes dão valores

médios do campo de tensão mas eliminam o efeito de irregularidades locais; por outro lado, pequenos volumes, apesar de permitirem uma descrição mais detalhada, podem não envolver heterogeneidades e descontinuidades do maciço rochoso);

3. as medidas de tensão são geralmente utilizadas como dados de entrada para análises de problemas em escalas variadas.

Quanto às medidas de tensão, estudos detalhados mostram que para uma mesma rocha e com um domínio geológico bem definido, utilizando-se diferentes técnicas de medição, os valores são comparáveis com uma incerteza de ± 10 a 20% para a intensidade, e $\pm 10^\circ$ a 20° para a orientação da tensão (Martin e Chandler, 1993).

4.7.9- Incertezas Quanto ao Melhor Método

Existem incertezas naturais sobre os dados que são coletados, utilizando-se quaisquer métodos, pelo fato de que as tensões *in situ* variam pontualmente no maciço rochoso, com reflexo das variações de propriedades mecânicas, estruturas geológicas e da trama do maciço. Grandes variações podem ser encontradas aleatoriamente, em todos os tipos de rocha e nem sempre devem ser registradas como anomalias ou erros na medição (Figura 4.31).

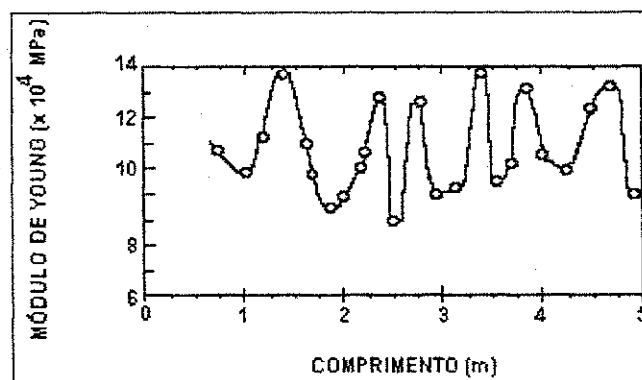


Figura 4.31- Variação de módulo de elasticidade encontrada ao longo de 5 metros de uma sondagem em rocha granítica (Aytmatov, 1986).

As incertezas também podem ser criadas por anisotropia da rocha, heterogeneidade e tamanho dos poros e dos grãos, conforme Figura 4.32.

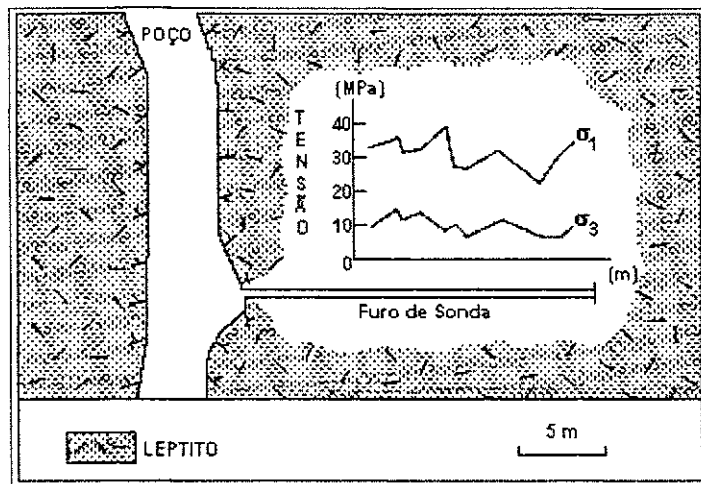


Figura 4.32- Variações aleatórias de medidas de tensões principais ao longo de um furo de sonda de cerca de 22 m, feito em condições uniformes de um leptito (Leijon, 1989).

A melhor forma de reduzir-se as incertezas das medições de tensão *in situ* é elegendo um sistema híbrido para a campanha de levantamento, ou seja, conjugando-se dois ou mais métodos em uma mesma área, e em alguns casos, no mesmo ponto.

CAPÍTULO 5

O PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

O homem primitivo pôs em prática o processo de reconhecimento e agrupamento de objetos com características similares. Todavia, os escritos indicam que a ciência de classificação teve origem na Grécia Antiga.

A taxionomia é dirigida por aspectos teóricos de classificação, que incluem suas bases, princípios, procedimentos e regras.

5.1- Resistência , Deformabilidade e Classificação Geomecânica

O maciço rochoso é um material agregado, que consiste de uma associação entre rocha intacta, juntas, falhas, planos de fraqueza e outras descontinuidades.

A resistência e deformabilidade das rochas dependem muito do grau de fraturamento, o qual deve ser definido no campo e relacionado sistematicamente a estas propriedades. As envoltórias de Mohr, obtidas do sistema de classificação de Bieniawski e do critério empírico de Hoek-Brown, para afloramentos e outras exposições de grande escala de rochas fraturada, relativamente ao material não fraturado, evidenciam que a resistência à compressão e à tração do maciço podem apresentar um fator de redução da ordem de 10 vezes. O módulo de deformação é também reduzido, relativo ao módulo de Young (Schultz, 1996).

Em se tratando de rochas com comportamento frágil, a envoltória de Mohr para material intacto pode ser idealizada como linear (Critério de Coulomb), parabólica (Critério de Griffith) ou uma combinação de ambos (Critério de Griffith Modificado), sob uma dada gama de esforços normal e de cisalhamento.

As envoltórias são construídas utilizando-se valores da resistência à tração (T_0), coesão (C_0) e atrito interno $\mu = \text{tg } \phi$, onde ϕ é o ângulo de atrito, obtido a partir de testes de amostras intactas em escala de mão. Sendo assim, essas envoltórias, baseadas em valores de rochas intactas, podem ser impróprias para afloramentos e grandes volumes de rochas porque elas não consideram os efeitos do enfraquecimento proporcionado pelas fraturas (Hoek, 1983).

A resistência ao cisalhamento de fraturas (juntas e falhas) é normalmente dada pelo critério linear de Coulomb (Regra de Byerlee), com valores menores de resistência à coesão e atrito do que aqueles utilizados para rocha intacta. Este modelo de enfraquecimento de plano único assume que em desenvolvimento total, a fratura contínua corta uma amostra, ou afloramento, completamente (Priest, 1993).

A envoltória de uma rocha intacta consiste de uma seção parabólica de Griffith, para esforço de tração normal, e uma outra linear de Coulomb, para compressão, demonstrando que micro trincas e outros defeitos são minúcias quando comparadas ao tamanho do espécime (Figura 5.1). A envoltória "linha de escorregamento" (Regra de Byerlee), definida pelas propriedades de atrito de uma junta simples, falha ou superfície de corte artificial, implica que um plano de fratura simples corta completamente a rocha. O comportamento do maciço deve estar entre estes dois extremos.

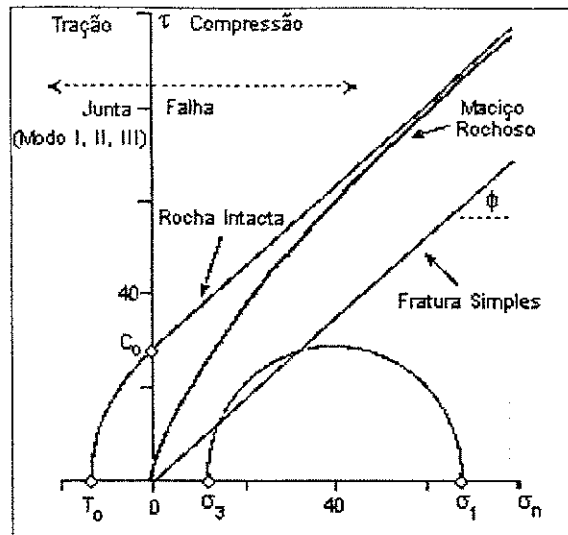


Figura 5.1- Diagrama de Mohr: Utilizado frequentemente para representações de resistências de rochas intactas e fraturadas e a influência do efeito de escala no critério de resistência (Schultz, 1996).

Os critérios de resistência clássicos (Griffith, Byerlee) devem ser aplicados apenas para estimar ou limitar as propriedades dos materiais geológicos dentro de seus respectivos campos de aplicabilidade, ou seja:

- o Critério de Griffith ou tipo-Griffith sejam usado apenas em rochas onde não existem fraturas macroscópicas aparentes, na escala de observação.
- a Regra de Byerlee é utilizada apenas para porções de fraturas.

Exposições de rocha que contêm fraturas descontínuas, que são significativas na escala considerada, são melhor caracterizadas por um critério geomecânico de maciço rochoso.

Uma escala relativa é definida como a relação da escala de observação com a escala do fraturamento. Uma amostra de rocha pode ser considerada como meio:

- contínuo, para uma dada escala relativa, quando as características das discontinuidades (comprimento, espaçamento) são estatisticamente constantes, propiciando que suas propriedades se apresentem homogêneas (Priest e Hudson, 1981);

- descontínuo, é aquela unidade de rocha com propriedades que variam espacialmente (fraturamento, tamanho dos blocos): duas amostras de uma rocha qualquer, sendo uma de um testemunho com 10 cm de comprimento, e outra de um afloramento de 10 m de extensão são ambos contínuos (ou intactos), numa escala relativa, embora seus parâmetros específicos de resistência e deformabilidade possam divergir entre si (rocha intacta x maciço).

5.2- A Classificação de Maciços Rochosos

As classificações de maciços rochosos devem ser aplicadas em consonância com métodos observacionais e estudos analíticos para formular projetos racionais compatíveis com suas metas e com a geologia local.

Seus objetivos principais são:

- 1- identificar os parâmetros mais significativos que influem sobre o comportamento do maciço rochoso;
- 2- compartimentar o maciço, ou seja, dividi-lo em grupos de comportamento similares, de acordo com a qualidade da rocha;
- 3- definir as bases de conhecimento das características de cada classe do maciço;
- 4- correlacionar as experiências das condições da rocha de um local com os experimentos encontrados em outros;
- 5- inferir dados quantitativos e servir de pauta para projetos de engenharia;
- 6- permitir uma base para comunicação entre todos os profissionais, engenheiros e geólogos, envolvidos com problemas geomecânicos.

Isto posto, para aplicação de um sistema de classificação é indispensável que o mesmo possa abordar os parâmetros básicos do projeto de engenharia. Em se tratando de rochas para fins ornamentais, a metodologia deve se ater a quatro critérios indispensáveis: valor estético; características mineral e petrográfica; características físicas da rocha e características geológicas e estruturais. Existe ainda um componente básico que é o condicionante mercadológico, que aprecia aspectos de infraestrutura do local, custo de extração, mercado alvo, existência de materiais similares e o limite de preço que o mercado comporta.

Vê-se então que as especificidades do setor não permitem a utilização direta dos critérios existentes. Todavia, para previsão do estado de tensão no local, pode-se lançar mão do critério de ruptura de Hoek-Brown, que tem como base o parâmetro RMR de Bieniawski.

5.3- Os Processos de Classificação

São apresentados os princípios básicos de classificação consolidados, destacando-se as ressalvas sobre a aplicação em rochas para fins ornamentais.

Dentre os 36 sistemas de classificação pode-se destacar aqueles seis que imprimiram conceitos: Terzaghi, Lauffer, Deere, Wickman et al., Bieniawski e Barton et al. Todos estes foram originalmente elaborados para aplicação em trabalhos subterrâneos, sendo que alguns foram modificados e aplicados a serviços a céu aberto (fundações e taludes). A Tabela 5.1 apresenta a evolução cronológica dos principais sistemas elaborados.

Tabela 5.1- Evolução de Sistemas de Classificação de Maciços Rochosos

Ano	Autor Original / Alteração	Conceito / Aplicação
1946	Terzaghi	Classificação de Carga em Túneis com Suporte
1968	Brekke	
1982	Rose	
1958	Lauffer	Tempo de Resistência em Túneis
1964	Pacher et al.	NATM ¹
1988	Lauffer	Uso para TBM ²
1967	Deere	RQD ³
1972	Wickham et al.	RSR ⁴
1973	Bieniawski	Sistema RMR ⁵
1975	Weaver	facilidade de escarificação
1976	Bieniawski e Orr	fundações em rochas
1977	Laubscher	mineração de asbestos
1979	Olivier	alterabilidade
1981	Ghose e Raju	mineração de carvão
1982	Moreno Tallon	túneis
1983	Nakao et al.	túneis
1983	Kendorski et al.	mineração em rochas duras
1983	Unal	mineração de carvão
1983	Serafim e Pereira	fundações de barragens
1983	Gonzalez de Vallejo	túneis
1983	Abad et al.	mineração de carvão
1984	Laubscher	mineração
1985	Romana	estabilidade de taludes
1985	Newman e Bieniawski	mineração de carvão
1985	Sandbak	facilidade de perfuração rotativa
1986	Venkateswarlu	mineração de carvão
1986	Smith	facilidade de alteração
1988	Robertson	estabilidade de taludes
1974	Barton et al.	Sistema - Q
1982	Kirsten	facilidade de escavação
1983	Kirsten	túneis
1975	Franklin	Relação Tamanho x Resistência
1981	ISRM	Descrição Geotécnica Básica
1984	Williamson	Classificação Uniformizada

¹ New Australian Tunneling Method.

² aplicações para Tunnel Boring Machine.

³ RQD - Rock Quality Designation

⁴ RSR - Rock Structure Rating - primeiro índice quantitativo

⁵ RMR - Rock Mass Rating - denominado de Índice de Classificação Geomecânica

5.3.1- Classificação de Terzaghi

O primeiro sistema de classificação de rochas foi elaborado por Terzaghi, em 1946, sendo utilizado exclusivamente para estimar as cargas atuantes sobre escoramentos de aço, utilizados em túneis. Baseado em sua experiência sobre o sistema de suporte implementado numa estrada de ferro nos Alpes e na descrição de vários tipos de terreno, ele definiu os limites de cargas para diversas condições existentes.

A partir de testes foram definidas nove condições de rochas, de acordo com o grau de fraturamento, acamamento, alteração, profundidade, tensão e empolamento.

5.3.2- Classificação de Lauffer

Em 1950, Stini, em seu livro Tunnelbaugologie, propôs que um sistema de classificação de rochas deve dar ênfase às suas deficiências estruturais e advogou que a direção de uma escavação tem de estar de acordo com o comportamento das descontinuidades.

Com base nas considerações de Stini, e outras, Lauffer, em 1958, apresentou um sistema de classificação que definiu o tempo de resistência da rocha do túnel em agüentar um vão ativo, sem escoramento. Esta medida de tempo é aquela em que uma escavação subterrânea irá permanecer aberta, sem suporte após escavada, sendo sugerido que o tempo é relacionado com as características do maciço rochoso.

5.3.3- Classificação de Deere

Uma relação entre a recuperação do testemunho de sondagem e a qualidade da rocha é feita de acordo com o conceito de **RQD** (Rock Quality Designation), que foi introduzido por Deere (1963). O RQD é definido a partir da percentagem de recuperação de testemunho, em comprimentos superiores a duas vezes o seu diâmetro, não levando em consideração os parâmetros geotécnicos, estruturais e ambientais da rocha. Para sua determinação a **ISRM** recomenda diâmetro NX (54 mm), como mínimo, para a sondagem.

As críticas ao modelo de Especificação da Qualidade da Rocha foram apresentadas por Merrit, 1972, que demonstrou que o sistema apresenta-se falho em áreas onde as juntas contêm finos preenchimentos de argilas ou materiais alterados, responsáveis pela redução da resistência ao atrito ao longo dos limites das juntas. Isto pode resultar numa rocha instável, apesar das juntas poderem ser espaçadas apresentando RQD elevado.

Adicionalmente, o índice é puramente uma grandeza linear que não representa com perfeição a fraqueza do maciço rochoso (Rolim Fº, J.L., 1998 – comunicação verbal) e não faz referência direta a outros fatores, tal como orientação de descontinuidades, que podem influir sobre o comportamento da rocha.

Para blocos de mármore e granitos, os de qualidade excepcionais permitem a produção de blocos com dimensão mínima de 0,60 m, tornando o índice de qualidade, com base no diâmetro da sondagem (AX, BX ou NX), totalmente sem sentido.

5.3.4- Classificação de Wickham et al.

O conceito de Índice de Estrutura de Rocha (**RSR** - Rock Structure Rating) foi desenvolvido por Wickham, Tiedemann e Skinner, em 1972. Trata-se do primeiro método quantitativo que introduziu um sistema de pontuação que serve para descrever a qualidade do maciço rochoso e selecionar o tipo de escoramento adequado ao túnel. Na sua elaboração foram consideradas duas categorias de fatores que influenciam no comportamento do maciço rochoso:

- 1- Parâmetros Geológicos: origem da rocha; espaçamento médio dos sistemas de juntas; orientação de juntas (direção e mergulho); tipos de descontinuidades, falhas maiores, cisalhamento e dobras; propriedades do material rochoso; e, estado de alteração.
- 2- Parâmetros Construtivos: tamanho do túnel; direção de avanço e, método de escavação.

Todos estes fatores foram agrupados em três parâmetros básicos, cujo somatório máximo assume o valor 100, segundo Wickham et al.(1974).

5.3.5- Classificação de Bieniawski

O sistema de classificação de Bieniawski (1973), é um dos mais utilizados em geomecânica porque foi obtido com base em numerosos casos reais, e porque é muito flexível. Tendo sido originalmente idealizado para subsolo, foi adaptado para aplicações em fundações e taludes.

São cinco os parâmetros considerados mais relevantes para analisar a estabilidade de uma determinada estrutura. A cada índice está associado um coeficiente numérico, baseado em sua influência, e o somatório destes cinco coeficientes fornece um valor, conhecido como **RMR** (Rock Mass Rating), que varia de 0 a 100, e permite classificar o maciço rochoso em uma das cinco classes distintas de Bieniawski, para a qual são definidos índices de resistência e qualidade. A validação de sua aplicabilidade é realizada através do uso de um

outro índice, obtido por diferente método - Classificação de Barton, por exemplo, o que permite uma eventual confirmação dos resultados obtidos.

A geração de dados para classificar um maciço rochoso deve obedecer a critérios que são recomendados para um correto levantamento de seus parâmetros:

1. determinação de informes geológicos detalhados sobre as condições e parâmetros do maciço rochoso;
2. estabelecer o campo de tensão por meio de técnica de recorte, de macaco hidráulico, ou de fraturamento hidráulico;
3. determinar as condições de continuidade do maciço, através de pesquisa geofísica sobre velocidade de ondas sísmicas na área do projeto;
4. realizar sondagem com diâmetro mínimo NX (54 mm), para determinação do RQD e obter amostra de espécime para testes de determinação de resistência estática, módulos e velocidade sônica da rocha intacta.

Como o maciço rochoso é por natureza descontínuo, a primeira fase dos trabalhos de caracterização é subdividi-lo em regiões estruturais onde suas feições são mais ou menos uniformes. Na maioria dos casos, os limites dessas regiões coincidem com as feições geológicas maiores, como falhas e zonas de cisalhamento.

Os escores que definem o sistema **RMR** são obtidos através de gráficos e / ou tabelas (vide Tabela 5.2), sendo que naqueles há maior precisão do índice, tendo em vista que os intervalos de classe utilizados nas tabelas são grandes.

Tabela 5.2- Fonte e Variação de Parâmetros da Classificação de Bieniawski

Parâmetro	Fonte	Faixa de Variação
- resistência da rocha;	Figura 5.2	0 a 15
- espaçamento de juntas e fraturas;	Figura 5.3	5 a 20
- característica das juntas;	Tabela 5.3	0 a 30
- qualidade do testemunho de sondagem;	Figura 5.4	3 a 20
- presença de água.	Tabela 5.4	0 a 15

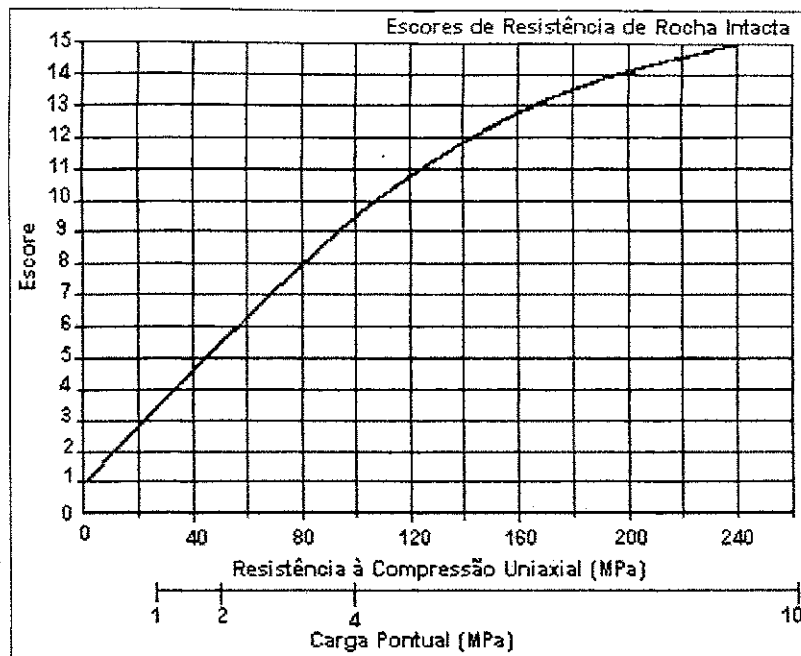
Como índice adicional, para corrigir a influência relativa da orientação das juntas, foi inserida uma tabela, com escores que variam de 0 a - 25, visando levar em consideração se a orientação das juntas é favorável ou desfavorável à estabilidade da obra, sendo este índice somente aplicado a túneis e fundações.

Os passos para aplicação deste sistema de classificação são os seguintes:

1. A resistência da rocha pode ser avaliada utilizando-se ensaio de compressão de corpo de prova não confinado, ou de carga pontual em amostra intacta do material de sondagem.

Conforme Figura 5.2, Bieniawski definiu classes de rochas, de acordo com os resultados dos ensaios de resistência (compressão uniaxial ou de carga pontual), apresentando seus respectivos valores atribuídos.

Para o caso dos granitos a Norma ASTM C 615 admite um valor mínimo de 131 MPa, para a resistência à compressão uniaxial, o que corresponde a 11 pontos do escore da Figura 5.2, com variação de 1 a 15, o que pode induzir a erros quando compilados em conjunto com outros parâmetros.



Fonte- Bieniawski, 1973

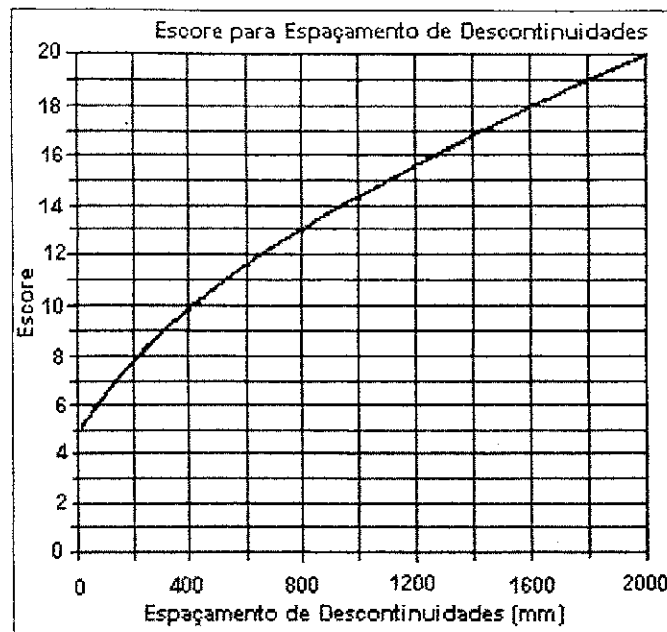
Figura 5.2- Escore de rocha intacta, relativo à resistência do material.

2. O espaçamento de juntas e fraturas é a distância média entre os planos de fraqueza do maciço rochoso, medida na sua direção perpendicular. Esta distância pode ser avaliada através da análise do testemunho de sondagem, partindo-se do pressuposto da existência de três famílias de juntas, ou fraturas.

Há duas considerações a fazer:

- a- trabalha-se com maciços que apresentam mais de um sistema de fraturas, em geral até três, sendo inviável analisar uma família de descontinuidades, em particular, em detrimento das outras;
- b- conforme citado anteriormente, caso o material seja todo são, o espaçamento mínimo terá de ser de 0,6 m, inviabilizando a faixa de escore de 5 a 11.

O modelo original de Bieniawski sugere que se escolha a família de juntas de melhor condição para uso do gráfico de espaçamento mostrado na Figura 5.3.



Fonte- Bieniawski, 1973

Figura 5.3- Índice de acordo com o espaçamento da principal família de fraturas.

3. A característica das juntas é também definida através da descrição da rugosidade das superfícies da família de juntas que mais influencia o comportamento da rocha. A rugosidade impõe a existência de juntas com paredes entrelaçadas, se estas forem limpas e fechadas deverão inibir a ocorrência de movimento de cisalhamento ao longo da superfície da junta. A aspereza é medida em escala de milímetros.

A separação, ou distância entre as paredes das juntas, controla a existência efetiva de atrito entre suas superfícies. Na ausência de contato rocha - rocha, a descontinuidade pode conter água e / ou materiais de preenchimento (*gouge*), que ficam como responsáveis pela resistência ao cisalhamento. Sendo assim, conclui-se que a resistência ao longo da junta é uma iteração dos seguintes condicionantes:

- separação de suas paredes;
- rugosidade das superfícies;
- presença ou ausência e natureza do material de preenchimento; conforme dados agrupados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3- Caracterização da Superfície de Juntas (Bieniawski, 1979)

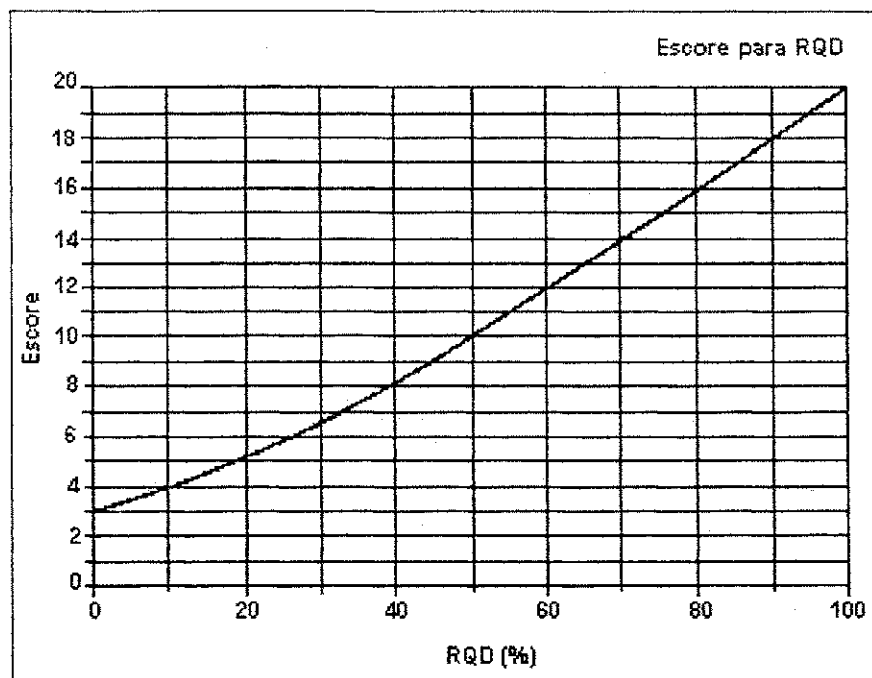
Descrição da Junta	Score
Superfícies muito rugosas de extensão limitada; rocha com paredes duras	30
Superfícies levemente rugosas; abertura < 1 mm; rocha com paredes duras	25
Superfícies levemente rugosas; abertura < 1 mm; rocha com paredes macias	20
Superfícies macias, ou <i>gouge</i> de preenchimento com espessura 1 - 5 mm, ou abertura 1 - 5 mm; juntas com persistência de vários metros	10
Juntas abertas preenchidas com mais que 5 mm de <i>gouge</i> , ou aberturas de mais de 5 mm; juntas com persistência de muitos metros	0

Na descrição do estado de alteração das superfícies das discontinuidades, deve-se utilizar as recomendações do Comitê de Classificação de Rocha da **ISRM** - International Society for Rock Mechanics:

- a- rocha inalterada, sem sinais visíveis de intemperismo: rocha fresca e brilho de cristais;
- b- rocha levemente alterada: superfícies estão manchadas ou descoloridas e podem apresentar uma pequena espessura de material alterado; a descoloração pode se estender até 20% do espaçamento da discontinuidade;
- c- rocha moderadamente alterada: uma leve descoloração se estende dos planos de juntas para mais de 20% do espaçamento da discontinuidade, que podem apresentar material de preenchimento alterado; também é possível a ocorrência de abertura parcial nos limites dos grãos;
- d- rocha altamente alterada: a descoloração atinge toda a rocha, que é parcialmente friável; a textura original permanece preservada mas podem ocorrer separação entre grãos;
- e- rocha completamente alterada: é aquela totalmente descolorida, decomposta e friável; apresenta aparência externa de solo.

Vê-se que, em se tratando de rochas para fins ornamentais, este parâmetro não tem fundamento em ser aplicado, visto que em todos os casos de interesse prático a condição mais favorável será atingida.

4. Definir o índice RQD, aplicada em conformidade com a metodologia de Deere, sendo definido conforme Figura 5.4. As restrições a este escore estão no item 5.3.3: Classificação de Deere.



Fonte- Bieniawski, 1973

Figura 5.4- Definição do escore relativo ao RQD

5. A presença de água pode influenciar fortemente o comportamento do maciço rochoso, quanto à sua classificação geomecânica. Se uma escavação exploratória é disponível, medidas de entrada ou de pressão hidráulica nas juntas pode ser usada para determinar o respectivo escore. Todavia pode ser utilizado furo de sonda, ou uma seção, para determinar em qual das cinco categorias a rocha se enquadra (Tabela 5.4).

Tabela 5.4- Presença de Água

Pressão de Água na Junta Dividida por Tensão Principal Máxima, ou	Condição Geral	Escore
0	Completamente Seco	15
0,0 - 0,1	Úmido	10
0,1 - 0,2	Molhado	7
0,2 - 0,5	Gotejando	4
> 0,5	Fluindo	0

Sendo assim, de forma geral o escore relativo à presença de água deverá ser analisado a partir da ocorrência de umidade ou água nas fraturas, sendo utilizada a coluna 2 da Tabela 5.4, ou caso haja determinação da pressão da água e da tensão máxima na junta, através de seu quociente contido na coluna 1 da referida tabela.

Sobre a orientação das juntas, de acordo com a obra que estiver sendo realizada, é recomendado que se ajuste a soma dos cinco primeiros escores para definir se a orientação é favorável ou desfavorável à estabilidade da rocha, cujo critério é encontrado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5- Orientação de Juntas na Obra

Determinação da Influência das Orientações das Descontinuidades e Obra	Escore para Túneis	Escore para Fundações
Muito Favorável	0	0
Favorável	- 2	- 2
Regular	- 5	- 7
Desfavorável	- 10	- 15
Muito Desfavorável	- 12	- 25

Como este parâmetro foi idealizado originalmente para aplicação em obras de subsolo e de barragens, ele não deve ser aplicado diretamente em trabalhos a céu aberto.

De acordo com o sistema original de Bieniawski, após definidos os cinco parâmetros do maciço rochoso, mais o ajuste de orientação de juntas (em relação à orientação do eixo da obra), o escore é obtido através da soma dos

parâmetros individuais, definindo uma determinada classe, cuja descrição sucinta é dada na Tabela 5.6.

Tabela 5.6- Classificação Geomecânica do Maciço Rochoso de Bieniawski

Classe	Descrição do Maciço Rochoso	Escore Final: Soma dos Escores
I	Rocha Muito Boa	81 - 100
II	Rocha Boa	61 - 80
III	Rocha Regular	41 - 60
IV	Rocha Fraca	21 - 40
V	Rocha Muito Fraca	00 - 20

A título de exemplo, podemos supor que se analisa uma área onde os parâmetros levantados estão quantificados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7- Exemplo Numérico de Aplicação do Sistema de Bieniawski.

Parâmetro	Resultado	Escore
resistência à compressão simples	80 MPa	8
Espaçamento de juntas	500 mm	11
Características das juntas	rugosas, pouco extensas, com paredes duras	30
RQD (diâmetro NX)	100%	20
presença de água	completamente seco	15
Escore RMR	Rocha Muito Boa	84

Para fins de geotecnia, a rocha é muito competente para suportar a escavação de um túnel ou fundação, todavia é inadequada como rocha para uso ornamental, haja visto que não apresenta resistência mínima estabelecida nas normas; tem fraturamento intenso, e não permite a extração de blocos de tamanho compatível com o exigido.

5.3.5.1- Classificação de Laubscher

Se o maciço possui muitas famílias de juntas, o escore do espaçamento entre elas pode ser definido através da adaptação do modelo de Bieniawski feita por Laubscher(1981), que considera os seus espaçamentos mínimo, intermediário e máximo.

Sua importância repousa no fato de que, na atividade de produção de blocos de rochas para fins ornamentais para processamento em teares, que exigem dimensões mínimas de alimentação de: 2,7 x 1,0 x 0,6 m (excetuando-se os materiais excepcionais). Se estas medidas coincidem com os espaçamentos médios para o sistema de múltiplas juntas, o escore mínimo, é 13, e fica definida uma área no canto superior direito da Figura 5.5 (de 13 a 20), que informa a viabilidade estrutural de se operacionalizar a lavra.

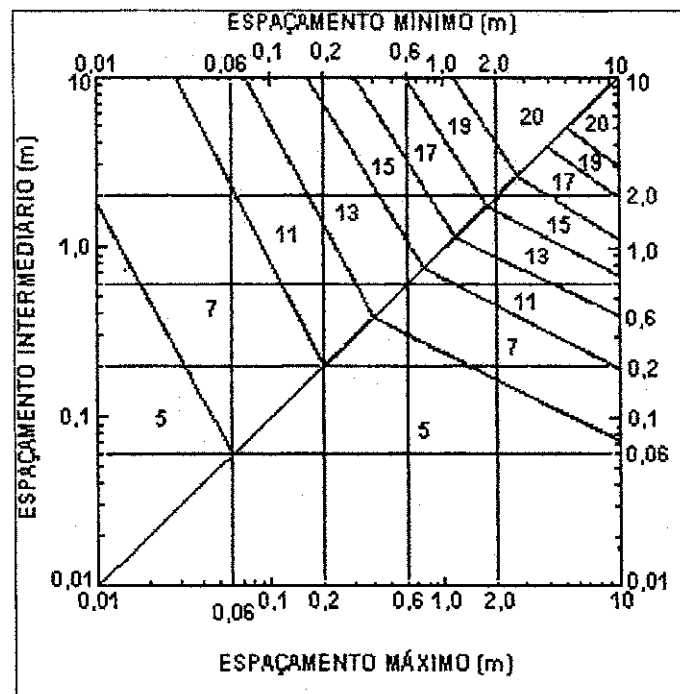


Figura 5.5- Escore de espaçamentos, segundo Laubscher (1981)

O processo de definição do índice se inicia com a plotagem do ponto espaçamento mínimo *versus* intermediário. Leva-se este ponto perpendicularmente até a diagonal do gráfico e, concluindo segue-se

horizontalmente até o valor do espaçamento máximo, conseguindo-se definir o escore dos espaçamentos conjugados.

Esta metodologia poderá ser melhor utilizada mudando-se os limites de espaçamentos, para valores compatíveis com a atividade e desprezando-se os demais.

5.3.5.2- Classificação de Romana

Romana, 1985, fez uma aproximação fatorial para o ajuste do índice de orientação de descontinuidades original de Bieniawski, como aplicação direta para minas a céu aberto, baseando-se no comportamento espacial das juntas, em relação ao talude e à metodologia de escavação, visando definir a estabilidade da rocha, independente do fraturamento do talude. Este ajuste tem por base a definição de quatro fatores de correção, sendo três geométricos e um operacional, conforme:

a) fatores geométricos -

F_1 - trata do paralelismo entre o talude e a direção da descontinuidade;

F_2 - é relativo ao mergulho da descontinuidade no plano de ruptura;

F_3 - inter-relação entre o ângulo do talude e o mergulho da descontinuidade;

b) fator operacional -

F_4 - depende do tipo de escavação que esteja sendo efetuado em talude natural, ou escavado, com técnica de pré-corte, ou de desmontes controlado, regular, ou deficiente.

Sendo assim, o ajuste do Sistema de Classificação RMR, de acordo com Romana é calculado a partir da equação:

$$RMR_{Ajustado} = RMR_{Base} - (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad \text{Eq. 5.1}$$

Aplicando-se ao sistema RMR o critério de correção de Romana, relativos ao comportamento espacial dos sistemas de juntas e das frentes dos taludes, afora o tipo de operação, a classificação permite avaliar as condições de estabilidade e prever os problemas de ruptura que podem ocorrer, Tabela 5.8.

Tabela 5.8- Classificação Geomecânica de Romana

Classe	Faixa de Índice	Descrição	Estabilidade	Rupturas / Tipo
I	81 - 100	Muito Boa	Totalmente Estável	Nenhuma
II	61 - 80	Boa	Estável	Alguns Blocos
III	41 - 60	Regular	Parcialmente Estável	Algumas Juntas / Muitas Cunhas
IV	21 - 40	Fraca	Instável	Planar ou Grandes Cunhas
V	00 - 20	Muito Fraca	Muito Instável	Planares Grandes ou Solos *

* Comportamento típico de solos.

5.3.6- Classificação de Barton et al.

Este sistema foi desenvolvido na Noruega, em 1974, por Barton, Lien e Lunde, sendo denominado como Sistema-Q de Classificação de Maciços Rochosos. Trata-se de sistema quantitativo, muito detalhado, que permite maior precisão na avaliação de seus parâmetros, relativamente à Classificação RMR, de Bieniawski, sendo baseado em seis princípios distintos:

- a. RQD;
- b. Número de famílias de juntas (J_n);
- c. Rugosidade da junta ou descontinuidade mais desfavorável (J_r);
- d. Grau de alteração ou preenchimento ao longo da junta mais fraca (J_a);
- e. Presença de água (J_w);
- f. Condição de tensão (SRF - Stress Reduction Factor).

O índice varia numa escala logarítmica de qualidade, no intervalo de 0,001 até 1000, sendo dado pela seguinte equação:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad \text{Eq. 5.2}$$

Os parâmetros, agrupados em três quocientes acima, representam:

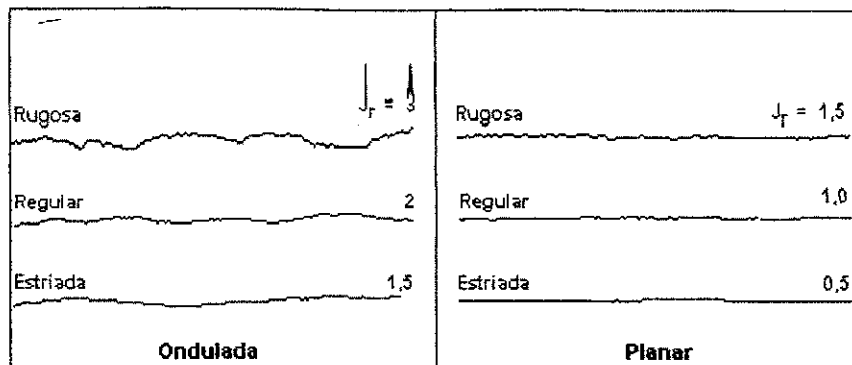
- 1- as propriedades geométricas do maciço;
- 2- a rugosidade e resistências das fraturas; e,
- 3- condições de contorno.

Apesar da classificação de Barton ser indicada para aplicação em construção de túneis e galerias, ela pode ser utilizada para avaliar o tipo de maciço rochoso, ou para problemas de estabilidade de taludes

Sua aplicação exige um grande número de dados, tornando-o de difícil emprego para rochas para fins ornamentais, e seus resultados devem ser considerados como puramente indicativos, porque são utilizados apenas para confronto com a classificação de Bieniawski, permitindo avaliar a existência de correlação matemática entre ambas.

Todos os parâmetros envolvidos devem ser levantados durante a fase de pesquisa, através da sondagem de detalhamento e dos dados estruturais:

- 1- RQD é o índice avaliado em conformidade com o método de Deere;
- 2- J_n - famílias de juntas: é o número de famílias de descontinuidades encontradas após o tratamento estatístico de dados do levantamento estrutural e definido através de projeções hemisféricas;
- 3- J_r - índice de rugosidade da juntas: definido através da descrição dos perfis das descontinuidades, classificadas em dois grupos principais (onduladas e planares) e obtidos conforme representação na Figura 5.6.



Fonte: Barton, 1997

Figura 5.6- Representação de índice de rugosidade, através de perfis de paredes de juntas

- 4- J_a - número de alteração: descrição das condições das paredes das discontinuidades e do tipo e análise do preenchimento, se existente;
- 5- J_w - índice de presença de água: fator de redução que depende da condição hidráulica do maciço rochoso;
- 6- SRF - fator de redução de tensão. Índice que absorve as condições de resistência do maciço rochoso quando submetido a uma escavação subterrânea, e como se trata de atividade a céu aberto este será considerado sempre igual a 1, exceto em condições excepcionais de elevadas tensões horizontais.

Segundo os autores, os quocientes da equação 5.2 que definem o índice Q permitem as seguintes considerações:

- a- RQD / J_n representa a estrutura do maciço rochoso, tendo dois extremos (10 / 20 e 100 / 0,5), que significam uma aproximação grosseira do tamanho dos blocos gerados;
- b- J_r / J_a corresponde às características de rugosidade e conseqüente atrito das paredes das juntas ou dos materiais de preenchimento;
- c- J_w / SRF trata-se de fator empírico que descreve as tensões ativas, onde: J_w é a medida de pressão da água que tem efeito adverso na resistência ao cisalhamento de juntas, devido à redução da tensão normal efetiva, afora poder causar, em se tratando de juntas preenchidas de argilas, o amolecimento e carreamento destes materiais.

Os índices são definidos a partir dos dados da Tabela 5.9.

Tabela 5.9- Classificação de Parâmetros Individuais do Sistema-Q

Item	Descrição	Valor
1	Especificação da Qualidade da Rocha	RQD
A	Muito fraca	0 - 25
B	Fraca	25 - 50
C	Média	50 - 75
D	Boa	75 - 90
E	Excelente	90 - 100

Notas: - onde o RQD for avaliado ou medido como < 10 cm (incluindo 0), deve-se assumir um valor nominal de 10;
 - para o RQD, o intervalo de 5, isto é 100, 95, 90, ..., apresenta precisão suficiente.

2	Número de Família de Juntas	J_n
A	Maciço, nenhuma ou poucas juntas	0,5 - 1,0
B	Uma família de juntas	2
C	Uma família de juntas mais juntas aleatórias	3
D	Duas famílias de juntas	4
E	Duas famílias de juntas mais juntas aleatórias	6
F	Três famílias de juntas	9
G	Três famílias de juntas mais juntas aleatórias	12
H	Quatro ou mais famílias de juntas, aleatórias, altamente fraturado	15
I	Rocha cominuída	20

Nota: - para interseções ou galerias utilizar 3,0 x J_n.

3	Número de rugosidade de junta	J_r
	Para contatos em rocha ou com cisalhamento menor que 10 cm	
A	Juntas descontínuas	4
B	Rugosa ou irregular, ondulada	3
C	Suave, ondulada	2
D	Estriada, ondulada	1,5
E	Rugosa ou irregular, planar	1,5
F	Suave, planar	1,0
G	Estriada, planar	0,5
	Sem contato de rocha, onde estiver cisalhada	
H	Zona contendo minerais de argila com espessura que impede contato das paredes de rocha	1,0
I	Arenoso, pedregoso ou zona cominuída com espessura que impede contato entre as paredes de rocha	1,0

Notas: Adicionar 1,0 se o espaçamento principal da família de juntas é maior que 3m;

- J_r = 0,5 pode ser usado para juntas planares ou estriadas com lineações, desde que estas estejam orientadas na direção de resistência mínima;

- As descrições dos itens B a G referem-se a feições na ordem de escalas local a intermediária.

(Tabela 5.9, continuação)

4	Número de alteração de junta	J_a	ϕ_r (aprox.)
	Contato das paredes da rocha		
A	Compacta, dura, não alterada, preenchimento impermeável (quartzo, epidoto, etc...)	0,75	-
B	Paredes de juntas inalteradas, superfícies apenas manchadas	1,0	25° - 35°
C	Paredes levemente alteradas com camada de minerais duros, partículas arenosas, rocha livre de argilominerais, etc.	2,0	25° - 30°
D	Silte, ou camadas argilo-arenosas, com pouca fração de argila	3,0	20° - 25°
E	Camadas de minerais friáveis, ou de argila com baixo atrito: caolinita, mica. Também clorita, talco, gipsita e grafita, etc., e pequenas quantidades de argilas expansíveis (camadas descontínuas, com espessura menor que 1 - 2 mm).	4,0	8° - 16°
	Para contatos em rocha com cisalhamento menor que 10 cm		
F	Partículas arenosas, rocha desintegrada livre de argila	4,0	25° - 30°
G	Fortemente compacta, preenchimento de minerais de argila não friáveis (contínuo, com espessura inferior a 5 mm)	6,0	16° - 24°
H	Média a baixa compactação, friável, preenchimento de minerais argilosos (contínuo, com espessura inferior a 5 mm)	8,0	12° - 16°
I	Preenchimento de argila expansível, por exemplo montmorilonita (contínuo, com espessura inferior a 5 mm). Valor de J_a depende da percentagem de argila expansível e de presença de água.	8,0 - 12,0	6° - 12°
	Sem contato de rocha, onde estiver cisalhada		
J	Zonas ou bandas de rochas desintegradas	6,0	
K	Zona de rocha cominuída	8,0	
L	Presença de argilas, conforme condições G, H e I	8,0 - 12,0	6° - 24°
M	Zonas ou bandas siltosa, ou argilo-arenosa, pequena fração de argila não expansível	5,0	
N	Zonas contínuas e espessas	10,0 - 13,0	6° - 24°
O	Bandas de argilas, conforme condições G, H e I	13,0 - 20,0	6° - 24°

Nota: - os valores de ϕ_r (ângulo de atrito residual) devem ser encarados como um guia aproximado para as propriedades mineralógicas de produtos de alteração, se presentes.

(Tabela 5.9, continuação)

5	Fator de Redução de Água	J_w	Pressão aprox. (Kgf/cm ²)
A	Escavação seca, ou com fluxo menor que 5 litros/minuto, localmente	1,0	< 1,0
B	Pressão ou fluxo médio, preenchimento de juntas carregados ocasionalmente	0,66	1,0 - 2,5
C	Alta pressão ou grandes fluxos em rocha competente com juntas não preenchidas	0,5	2,5 - 10,0
D	Alta pressão ou grandes fluxos, considerável carregamento de material de preenchimento	0,33	2,5 - 10,0
E	Fluxos ou pressão de detonação excepcionalmente elevados, diminuindo com o tempo	0,2 - 0,1	> 10,0
F	Fluxos ou pressão excepcionalmente elevados contínuos	0,1 - 0,05	> 10,0

Nota: - os fatores C e F são estimativas grosseiras.

Fonte: Barton, 1974

Deve-se verificar se os valores obtidos nas Classificações de Bieniawski e Barton guardam uma boa correlação entre si, através das expressões:

$$RMR = 9 \log_e Q + 44 \quad - \text{Bieniawski (1976)} \quad \text{Eq. 5.3}$$

$$RMR = 13,5 \log_{10} Q + 43 \quad - \text{Rutledge (1978)} \quad \text{Eq. 5.4}$$

$$RMR = 15 \log_{10} Q + 50 \quad - \text{Barton (1983)} \quad \text{Eq. 5.5}$$

5.4- Estimativa Conjunta de Classificação, Segundo Bieniawski, Laubscher, Romana e Barton

Com vistas a obter uma estimativa preliminar sobre o comportamento geomecânico do maciço, para o planejamento de lavra de rochas para fins ornamentais podem ser adotados os critérios de classificação, conforme:

- a- Bieniawski (RMR_{base}) - definir o escore de qualidade do maciço, servindo de base para o critério de ruptura de Hoek-Brown;

- b- Laubscher (LAUB.) - análise dos sistemas de juntas para otimização da recuperação da lavra e posicionamento da direção de avanço das frentes de produção;
- c- Romana (RMR_{ajust}) - estimativa de previsão de processos de instabilidade que podem ocorrer durante a lavra;
- d- Barton (Q) - verificar o escore conseguido pela aplicação do RMR, através das equações de correlação (Equações 5.3, 5.4 e 5.5).

Para tanto, durante a fase de pesquisa é necessária a definição dos parâmetros, em campo ou em laboratório, mostrados na Tabela 5.8.

Tabela 5.10- Parâmetros Técnicos para Classificações de Maciços Rochosos (modificada de Barton, 1996)

PARÂMETRO			APLICAÇÃO			
			RMR _{base}	LAUB.	RMR _{ajust}	Q
01	Índice de Qualidade da Rocha	RQD				
02	Número de Famílias de Juntas	J_n				
03	Frequência de Fraturas (n° / m)	F				
04	Índice Volumétrico de Palmström	J_v				
05	Espaçamento de Fraturas (m)	S				
06	Comprimento de Fraturas (m)	L				
07	Grau de Alteração *	W				
08	Atitude das Juntas (Schmidt)	α_j, β_j				
09	Atitude dos Taludes Projetados	α_t, β_t				
10	Índice de Rugosidade	J_r				
11	Índice de Alteração	J_a				
12	Coefficiente de Rugosidade de Junta	JRC				
13	Rugosidade (mm / m)	a / L				
14	Descrever a Superfície das Juntas	-				
15	Dureza de Schmidt	r, R				
16	Ângulo de Atrito Residual	ϕ_r				
17	Fator de Redução de Água	Jw				
18	Resistência à Compressão Simples	σ_c				
19	Tensão Principal Máxima	σ_1				
20	Tipo de Operação	-				

* De acordo com a nomenclatura ISRM.

5.5- Correlações e Aplicação do Critério de Ruptura de Hoek-Brown.

As classificações de maciços rochosos têm sido utilizadas para fornecer estimativas de seus parâmetros de resistência e de deformabilidade, afora servir para análise de estabilidade de taludes em rochas.

Provavelmente a representação mais aproximada do comportamento de rochas fraturadas submetidas a tensões é aquela proposta por Hoek e Brown (1980, 1997). Este critério pode ser aplicado mais diretamente para rochas cujo comportamento se aproxima do isotrópico, ou seja, para materiais com nenhuma ou três famílias de fraturas de mesmas características. Para rochas anisotrópicas, com uma família de juntas, por exemplo, o critério deve ser modificado pela orientação da família de fraturas.

Segundo Barton (1997), o critério de Hoek e Brown não deve ser aplicado para rochas com alta xistosidade ou para maciços onde as propriedades são controladas por uma família de descontinuidades (como planos de acamamento), o que pode ser visualizado na Figura 5.7. Nestes casos, o procedimento é aplicá-lo para as componentes de rocha intacta, devendo a resistência das descontinuidades ser analisada em termos do critério de resistência ao cisalhamento de Barton (1976).

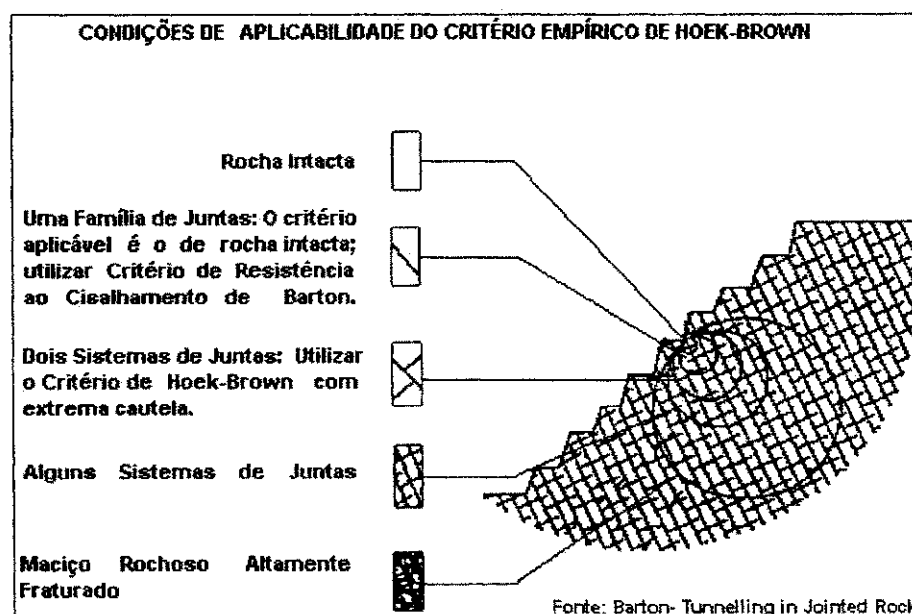


Figura 5.7- Aplicação do critério de Hoek-Brown, segundo Barton, 1997.

Inicialmente, as propriedades do maciço rochoso são sistematicamente caracterizadas pelo sistema RMR de classificação, que captura os elementos maiores das fraturas (frequência, espaçamento, condições de alteração e rugosidade), presença de água e resistência da rocha intacta.

Posteriormente, calcula-se os parâmetros de resistência do maciço, a partir do critério empírico de Hoek-Brown, que torna possível definir as envoltórias de Mohr e o módulo de deformação E^* (correspondente ao módulo de elasticidade de Young, E) a partir do escore RMR. Estes parâmetros, por sua vez, permitem calcular as resistências do maciço fraturado.

O espaçamento de fraturas em afloramentos ocorre geralmente em duas escalas limites: centimétrica e métrica.

O espaçamento centimétrico é estabelecido através de sondagem, utilizando o conceito de RQD (Deere, 1963), ou, no caso de escala de afloramento, através da densidade linear de fratura (N), que é a contagem do número de fraturas que interceptam uma seção de 1 metro do afloramento. Brady e Brown, 1992, conseguiram estabelecer uma correlação estatística entre a densidade linear de fraturas e o RQD (Schultz, 1996), através da expressão empírica:

$$RQD = 100.e^{-0,1N(0,1N+1)} \quad \text{Eq. 5.5}$$

onde e é a base de logaritmos neperianos.

O espaçamento em escalas superiores à anterior é também obtido de maneira similar, mas com medidas de espaçamentos em faixas métricas. Neste caso, os espaçamentos não são normalizados por uma seção transversal mas através da média do número de fraturas, sendo convertidos em unidade métrica. Visto que o sistema RMR de classificação é apenas aproximativo, todas as categorias de seus parâmetros, tal como resistência à compressão, feitos no campo e depois refinados, servem apenas para permitir uma primeira aproximação da resistência e deformabilidade do maciço rochoso.

Também o módulo de deformação (E^*) pode ser computado diretamente do RMR, utilizando-se uma das duas equações específicas, em conformidade com o escore do maciço (superiores e inferiores a 50).

A associação entre RMR e o critério empírico de Hoek-Brown é feita através de seus parâmetros adimensionais, m e s , que refletem o grau de fraturamento e engastamento de blocos do maciço rochoso. As relações de conversão são dadas para dois casos distintos de maciços rochosos:

a) não perturbado (rocha intacta):

$$m = m_i \exp\left[\frac{(RMR - 100)}{28}\right] \text{ e } s = \exp\left[\frac{(RMR - 100)}{9}\right] \quad \text{Eq. 5.6}$$

b) maciço perturbado (taludes ou rocha submetida a desmonte):

$$m = m_i \exp\left[\frac{(RMR - 100)}{14}\right] \text{ e } s = \exp\left[\frac{(RMR - 100)}{6}\right] \quad \text{Eq. 5.7}$$

onde m_i é um valor para rocha intacta, obtido de testes ou de tabela normalizada (Bieniawski, 1989).

O parâmetro m depende do tipo de rocha e diminui com o grau de fraturamento do maciço:

- para $s=1$ e $m_i \gg 1$, m_i aproxima a relação entre a resistência à compressão uniaxial e a resistência à tração da rocha intacta.

Segundo Hoek, 1983, no diagrama de Mohr tem-se as seguintes considerações:

- valores elevados de m ou m_i (15 - 25: rochas cristalinas duras), promovem envoltórias de Mohr apresentando inclinações com elevados ângulos de atrito e baixos níveis de tensão efetiva;
- baixos valores de m ou m_i (3 - 7: rochas sedimentares brandas) propiciam baixos ângulos de atrito.

O parâmetro s é uma função do grau de fraturamento do maciço (s varia de 1 a 0 - rocha intacta a fraturada, respectivamente), e sua redução causa uma suave inclinação, para baixo, na envoltória de Mohr, para valores menores da tensão de cisalhamento, com alteração insignificante na forma da envoltória.

Os diagramas das Figuras 5.8 e 5.9 demonstram a influência do fraturamento, e processos correlatos de alteração, na resistência do maciço e suas implicações:

- com o aumento do fraturamento, ou outros fatores que reduzem o RMR, os parâmetros de Hoek-Brown diminuem;
- a diminuição de m resulta numa redução da inclinação da envoltória de Mohr e no coeficiente de atrito instantâneo associado ao maciço rochoso;
- a diminuição de s implica em valores menores da tensão de cisalhamento para um dado valor da normal.

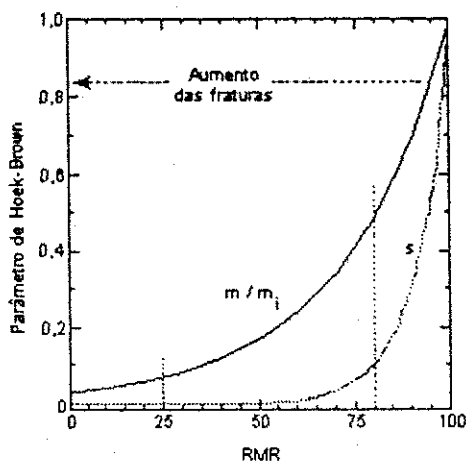


Figura 5.8- Relação dos parâmetros m e s , relativos ao RMR correspondente.

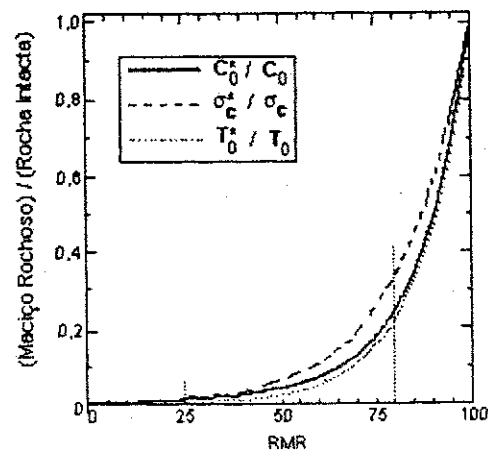


Figura 5.9- Parâmetros de resistência, calculados e medidos, de acordo como escore do maciço rochoso.

De acordo com os vários tipos, condição de rocha e correspondentes RMR, as constantes m e s foram agrupadas e apresentadas na Tabela 5.11, segundo Hoek e Brown, 1988.

Tabela 5.11- Relação Aproximada entre RMR e Constantes Empíricas do Material

ROCHA INTACTA										
Amostra De Mão, Sem Descontinuidades	Rochas Carbonáticas Com Clivagem Bem Desenvolvida		Rochas Argilosas		Rochas Arenosas com Cristais Resistentes e Fraca Clivagem		Rochas Ígneas Cristalinas Poliminerálicas e de Grã Fina		Rochas Cristalinas Ígneas e Metamórficas de Grã Grosseira	
	m = m _i	s	m = m _i	s	m = m _i	s	m = m _i	s	m = m _i	s
RMR = 100	7,00	1,00	10,00	1,00	15,00	1,00	17,00	1,00	25,00	1,00
MACIÇO PERTURBADO										
MACIÇO DE QUALIDADE EXCELENTE										
Rocha não Perturbada com Juntas Compactas e Sem Alteração em 1 - 3 m	Rochas Carbonáticas Com Clivagem Bem Desenvolvida		Rochas Argilosas		Rochas Arenosas com Cristais Resistentes e Fraca Clivagem		Rochas Ígneas Cristalinas Poliminerálicas e de Grã Fina		Rochas Cristalinas Ígneas e Metamórficas de Grã Grosseira	
	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
RMR = 85	2,40	0,082	3,43	0,082	5,14	0,082	5,82	0,082	8,56	0,082
MACIÇO DE BOA QUALIDADE: Rocha Fresca e Levemente Alterada com Juntas em 1 - 3 m										
RMR = 65	0,575	0,00293	0,821	0,00293	1,231	0,00293	1,365	0,00293	2,052	0,00293
MACIÇO DE QUALIDADE MÉDIA : Muitas Famílias de Juntas Moderadamente Alteradas em 0,3 - 1 m										
RMR = 44	0,128	0,00009	0,183	0,00009	0,275	0,00009	0,311	0,00009	0,458	0,00009
MACIÇO DE QUALIDADE RUIM: Numerosas Juntas Alteradas em 30 - 500 mm. Apresenta Gouge										
RMR = 23	0,029	0,00003	0,041	0,00003	0,061	0,00003	0,069	0,00003	0,102	0,00003
MACIÇO DE QUALIDADE MUITO RUIM: Inúmeras Juntas Alteradas, Espaçadas de Menos de 50 mm com Gouge										
RMR = 3	0,007	0,00001	0,010	0,00001	0,015	0,00001	0,017	0,00001	0,024	0,00001

As tensões normal e de cisalhamento podem ser obtidas diretamente das equações de Hoek-Brown considerando-se valores apropriados para resistência à compressão, resistência à tração, e resistência coesiva,. A estimativa da resistência do maciço rochoso é expressa através da relação de tensões, dos parâmetros geométricos e de suas condições de fraturamento, conforme a equação 5.8 abaixo,

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad \text{Eq. 5.8}$$

onde:

- σ_1 é a tensão principal máxima de ruptura;
- σ_3 é a tensão principal mínima aplicada ao espécime;

- σ_c é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta no espécime;
- β e σ_c são constantes que dependem das propriedades da rocha e da área do dano antes de ter sido quebrada pelas tensões σ_1 e σ_3 .

Esta relação pode ser representada, em termos de tensões de cisalhamento e normal, de acordo com a envoltória de ruptura de Mohr, Figuras 5.10 e 5.11.

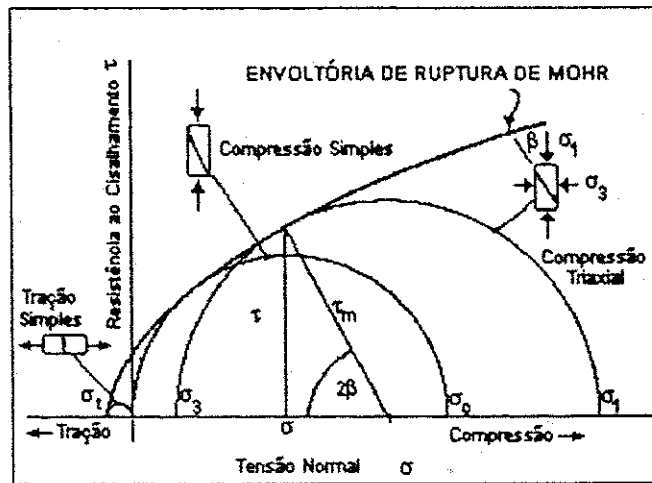


Figura 5.10- Diagrama de Mohr onde tem-se a representação gráfica das condições de tensões para a rocha intacta.

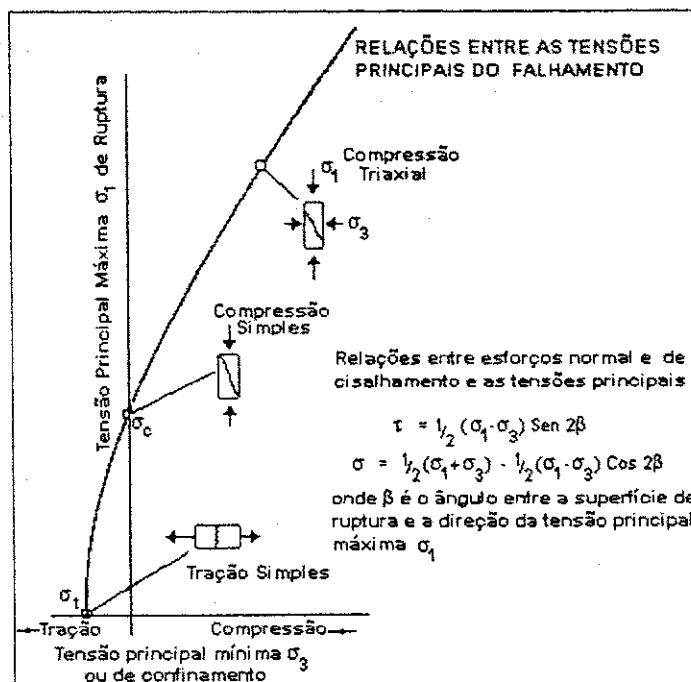


Fig 5.11- Representação gráfica da relação entre as tensões principais associadas ao processo de ruptura da rocha.

A resistência à compressão do material intacto pode ser definida pelo Índice de Carga Pontual, sendo dada por:

$$I_s = P / D^2 \quad \text{Eq. 5.9}$$

onde

- P é a carga necessária para romper o espécime; e,
- D é o diâmetro do testemunho.

Segundo Bieniawski (1975), se o diâmetro D é expresso em milímetros, a relação aproximada entre o Índice de Carga Pontual (I_s) e a resistência à compressão uniaxial é dada por: $\sigma_c = (14 + 0,175 \cdot D) \cdot I_s$

Conhece-se a resistência à compressão uniaxial do espécime fazendo-se $\sigma_3 = 0$, na equação 5.8, ou seja:

$$\sigma_{cs} = \sqrt{s\sigma_c^2} = \sigma_c \sqrt{s} \quad \text{Eq. 5.10}$$

Para uma rocha intacta $\sigma_{cs} = \sigma_c$ e $s = 1$.

A resistência à tração uniaxial do espécime é dada pela substituição de $\sigma_1 = 0$ na Equação 5.8, que passa a ser uma equação quadrática que resolvida para σ_3 , tem-se a equação 5.11:

$$\sigma_t = \frac{1}{2} \sigma_c \left(m - \sqrt{m^2 + 4s} \right) \quad \text{Eq. 5.11}$$

Às vezes é conveniente expressar o critério de ruptura em termos de tensões de cisalhamento e normal, atuando num plano inclinado de ângulo β com a direção da tensão principal máxima.

Balmer (1952), derivou a relação geral entre os esforços normal e de cisalhamento e as tensões principais, que atuam num espécime de rocha isotrópico. A substituição da Equação 5.8, de Hoek-Brown, nas equações de Balmer fornece:

$$\sigma = \sigma_3 + \frac{\tau_m^2}{\tau_m + \frac{m\sigma_c}{8}} \quad \text{Eq. 5.12}$$

e

$$\tau = (\sigma - \sigma_3) \sqrt{1 + \frac{m\sigma_c}{4\tau_m}} \quad \text{Eq. 5.13}$$

onde:

$$\tau_m = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad \text{Eq. 5.14}$$

Para utilização em estabilidade de taludes, onde a resistência ao cisalhamento é exigida para um nível específico de tensão normal, a expressão mais usual para a envoltória de Mohr é:

$$\tau_n = A(\sigma_n - \sigma_{tn})^B \quad \text{Eq. 5.15}$$

onde:

- σ_n e τ_n são as tensões normal e de cisalhamento normalizadas, σ_1 / σ_c e τ / σ_c ;
- σ_{tn} é a resistência que é definida por: $\sigma_{tn} = \frac{\sigma_t}{\sigma_c} = \frac{1}{2} (m - \sqrt{m^2 + 4s})$;
- A e B são constantes empíricas, determinadas pela geração de uma série de valores de σ_n e τ_n para dados valores de m e s .

O ângulo de atrito instantâneo ϕ_i e a coesão instantânea C_i são definidos para um dado valor de tensão, através de:

$$\text{tg}\phi_i = AB \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} - \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \right)^{B-1} \quad \text{Eq. 5.16}$$

$$C_i = \tau - \sigma \text{tg}\phi_i \quad \text{Eq. 5.17}$$

Para definir as relações, tanto para rocha intacta, quanto para maciços fraturados, entre a tensão principal e as envoltórias de Mohr, são definidas as equações aproximativas, de acordo com o tipo de rocha.

5.6- Estimativa das Equações do Maciço Rochoso

O módulo de elasticidade ou de Young é estritamente apropriado para amostras de rocha intacta, e varia inversamente com a densidade de trincas (Kachanov, 1992). Então, o módulo de deformação (E^*) de um maciço é inferior ao módulo de Young para o material intacto (exceto para os casos de rocha intacta, onde E^* não é bem definido). As relações empíricas entre RMR e E^* foram encontradas por Bieniawski (1989). Em seus estudos de casos, este autor encontrou um erro de $\pm 20\%$, entre o valor calculado e o medido, para rochas com módulos superiores a 10 GPa.

A representação gráfica da variação do módulo de deformação (E^*) com o escore RMR, de acordo com as correlações de Bieniawski, evidenciam que com o aumento do fraturamento há uma redução do módulo (Figura 5.12).

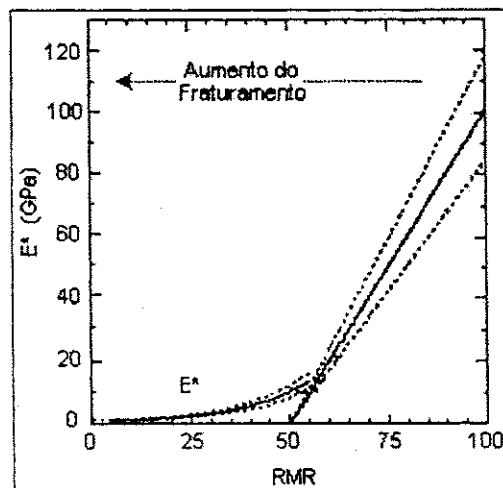
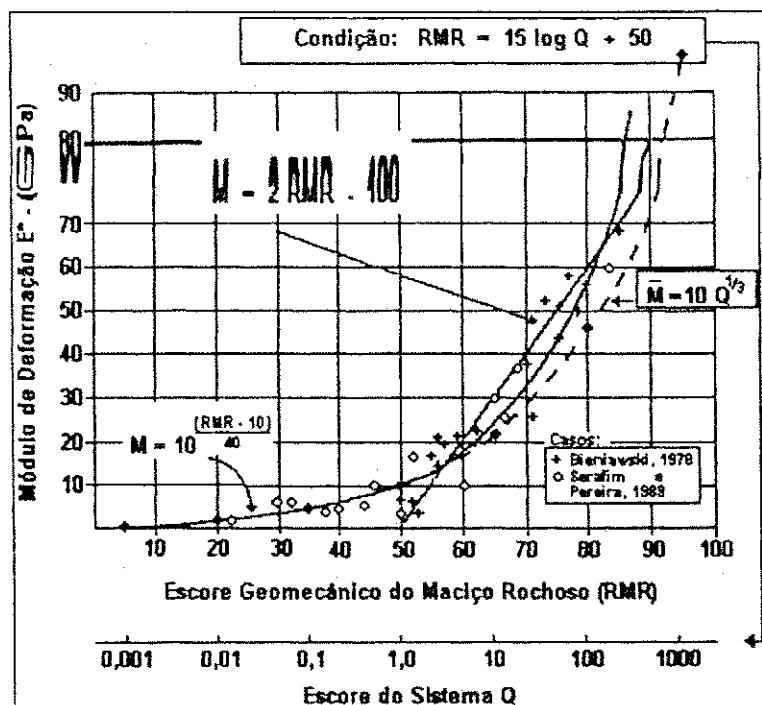


Figura 5.12- Representação das equações empíricas de deformação

Utilizando-se a correlação entre os escores de classificação de Bieniawski (RMR) e de Barton (Q), $RMR = 9 \log_e Q + 44$, Barton (1983) conseguiu encontrar uma aproximação de valores do módulo de deformação *in situ* (mínimo, médio e máximo) a partir de escores de classificação, que permite eliminar ou reduzir a necessidade de realização de testes, apresentando também uma nova condição de correlação, Figura 5.13.



Fonte: Barton - 1983.

Figura 5.13- Correlações entre módulos de deformação, baseados nos escores RMR e Q

A relação de Poisson (ν) não é definida porque varia sistemática e substancialmente com o RMR, de acordo com medidas similares *in situ*. O módulo de cisalhamento (G^*), para o maciço rochoso, deve também ser inferior a G , para material intacto (isotrópico), dado $G = E / 2(1 + \nu)$, para uma carga elástica e relações similares para materiais anisotrópicos.

Considerando-se que os parâmetros de resistência e deformabilidade do maciço rochoso (coesão, ângulo de atrito interno e módulo de deformabilidade) representam características intrínsecas do maciço, independentes das condições estruturais (orientação e mergulho das descontinuidades) Bieniawski (1978) conseguiu relacionar tais parâmetros com o índice RMR denominado de base (cinco parâmetros).

A Tabela 5.11 agrupa as equações para os maciços rochosos, a partir do critério empírico de Hoek-Brown, e de correlações de Bieniawski e de Barton.

Tabela 5.12- Equações de Maciços Rochosos

Propriedades	Símbolo	Equação
Resistência da Rocha	σ_1 , MPa	$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2}$ (Hoek-Brown)
Parâmetro de Hoek-Brown	m	$m = m_i \exp\left[\frac{(RMR - 100)}{28}\right]$ (Hoek-Brown)
Parâmetro de Hoek-Brown	s	$s = \exp\left[\frac{(RMR - 100)}{9}\right]$ (Hoek-Brown)
Resistência à Compressão Uniaxial	σ_{cs} , MPa	$\sigma_{cs} = \sqrt{s\sigma_c^2}$ (Hoek-Brown)
Resistência à Tração	T_0^* , MPa	$T_0^* = \frac{1}{2}\sigma_c(m - \sqrt{m^2 + 4s})$ (Schultz)
Tensão Normal	σ , MPa	$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{\tau_m^2}{\tau_m + \frac{m\sigma_c}{8}}$, $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$, (Schultz)
Tensão de Cisalhamento	τ , MPa	$\tau = \left(\frac{\tau_m^2}{\tau_m + \frac{m\sigma_c}{8}}\right) \sqrt{1 + \frac{m\sigma_c}{4\tau_{max}}}$ (Schultz)
Resistência Coesiva ($\sigma_n = 0$)	C_0^* , MPa	$C_0^* = \sigma_c \left(\frac{\sqrt{m^2 + 16s} - m}{4}\right) \sqrt{\sigma_c^2 + \frac{16m\sigma_c}{(4\sqrt{s} - m + \sqrt{m^2 + 16s})^2}}$ (Schultz)
Intercepção Coesiva ($\sigma_n > 0$)	C_0^* , MPa	$C_0^* = \tau - \sigma_n \operatorname{tg}\phi^*$ (Schultz)
Coesão	C_0^* , KPa	$C_0^* = 5 \times RMR$ (Bieniawski)
Ângulo de Atrito Interno	ϕ^* (°)	$\phi^* = (5 + RMR) / 2$ (Bieniawski)
Atrito (σ_n arbitrária)	ϕ^* (°)	$\phi^* = \operatorname{tg}^{-1} \left\{ \left[4h \cos^2 \left(30^\circ + \frac{1}{3} \operatorname{sen}^{-1}(h^{-3/2}) \right) - 1 \right]^{1/2} \right\}$, $h = 1 + \frac{16(m\sigma_n + s\sigma_c)}{3m^2\sigma_c}$ (Schultz)
Tensão de Transição Junta-Fratura	σ_{3trans} , MPa	$\sigma_{3trans} = \frac{1}{4} \left(m\sigma_c - \sqrt{m^2\sigma_c + 16\sigma_1^2} \right)$ (Schultz)
Módulo de Deformação	E^* (GPa)	$E^* = 2 \times RMR - 100$ (RMR > 50), (Bieniawski) $E^* = 10^{(RMR - 10)/40}$ (RMR < 50) (Serafim e Pereira)
Módulo de Deformação	E^* (GPa)	$E_{min} = 10 \log Q$; $E_{medio} = 25 \log Q$; e, $E_{max} = 40 \log Q$ (Barton)

CAPÍTULO 6

OBSERVAÇÕES E PROCEDIMENTOS EM ÁREAS DE ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS

6.1- Introdução

Durante o desenvolvimento do trabalho visitou-se um total de oito áreas voltadas ao setor de rochas para fins ornamentais, paralisadas ou em atividade, em que se buscou correlação de feições específicas, principalmente aquelas relacionadas com o estado de tensão *in situ*. Estas áreas estão distribuídas nos Estados do Ceará (quatro áreas), Rio Grande do Norte (uma área) e Paraíba (três áreas).

Todas as visitas buscaram também a identificação de aspectos geomorfológicos que possam subsidiar a previsão de problemas na exploração, sejam a partir da existência de tensões (naturais ou induzidas), seja devido à presença de inclusões, diques, veios e outras feições naturais.

Como geralmente não há pesquisas geológica / geotécnica nas áreas de produção, a quantidade de dados de cada área é variável, de acordo com sua disponibilidade, quando da visita, mas a utilização destes exemplos permite uma visualização mais realística sobre o setor.

Para uniformidade das informações, elaborou-se uma ficha de reconhecimento de área, trazendo dados gerais sobre: identificação do local; geologia; estadio de tensões e observações operacionais.

6.2- Serra da Meruoca – Ceará

IDENTIFICAÇÃO

Local	Santo Antônio / Serra da Meruoca (Granitos Verde Meruoca, Meruoca Clássico e Verde Ventura – CE)		
Coordenadas	Lat. 3° 32',78 / S	Long. 40° 23',17 / W	Cota (m) 200
Ref. Cartográfica	Sobral – DSG / MEX	SA.24-X-D-IV	1 : 100.000
Data - 15.08.1996			

GEOLOGIA

Litologia	<ul style="list-style-type: none"> - Batólito de granito, com leves variações a tipos monzonítico, granodiorítico e sienítico, equigranular médio a grosseiro, em forma próxima à losangular, aflorante em área aproximada de 400 Km², caracterizado pelo pequeno percentual de máficos e caráter alcali-potássico (Na₂O / K₂O médio = 0,57). - As rochas apresentam elevado grau de deformação, contendo várias fraturas e juntas, em consonância com a tectônica regional.
Domínio Estrutural	<p>Médio Coreau. Apresenta contatos tectônicos: NW – Falha da Tangente; NE – falha sem denominação; SW – inflexão da Falha de Arapá; SE – Falha Café-Ipoeiras (normal).</p> <p>A rocha apresenta plano de clivagem sub-horizontal.</p>
Geomorfologia	Trata-se de planalto isolado como resultado de relevo residual, com limites em forma de escarpas e cotas relativas aproximadas variando de 200 a 1000 metros acima do nível do mar.
Idade / Eventos	<ul style="list-style-type: none"> - Encontra-se no domínio entre o Proterozóico Superior e o Paleozóico, com idades absolutas de 490 ± 27 a 713 ± 104 milhões de anos, sendo associado ao Ciclo Brasileiro. - Segundo o Projeto Jaibas a idade do granito Meruoca é 512 ± 10 Ma.

TENSÕES

Tipos previstos	Estima-se a existência de tensões horizontais elevadas devido a influência topográfica e dos processos de denudação.
Observações	<ul style="list-style-type: none"> - Foi informada a propagação de fraturas no maciço durante a exploração. - Na frente em lavra ocorrem dois planos sub-horizontais de alívio, que apresentam superfícies levemente alteradas, sem preenchimento, demonstrando existirem anteriormente à atividade de lavra. - Os contatos são tectônicos podendo o corpo encontra-se aliviado de tensões residuais nas proximidades de suas bordas, ou limites.

OPERAÇÕES

Método de lavra	Em bancadas baixas, apresentando duas praças sub-horizontais, que acompanham planos de fraturas de alívio existentes, na área Verde Meruoca.
Tecnologia usada	Utiliza tecnologia conjugada (mista), sendo os cortes primários, perpendiculares ao talude natural, realizados com maçarico. O outro plano é feito através de perfuração coplanar, paralela. Os furos são raiados e o desmonte é através de explosivos.

A Figura 6.1 evidencia a topografia acidentada da região onde o corpo granítico funciona como um ressalto topográfico.

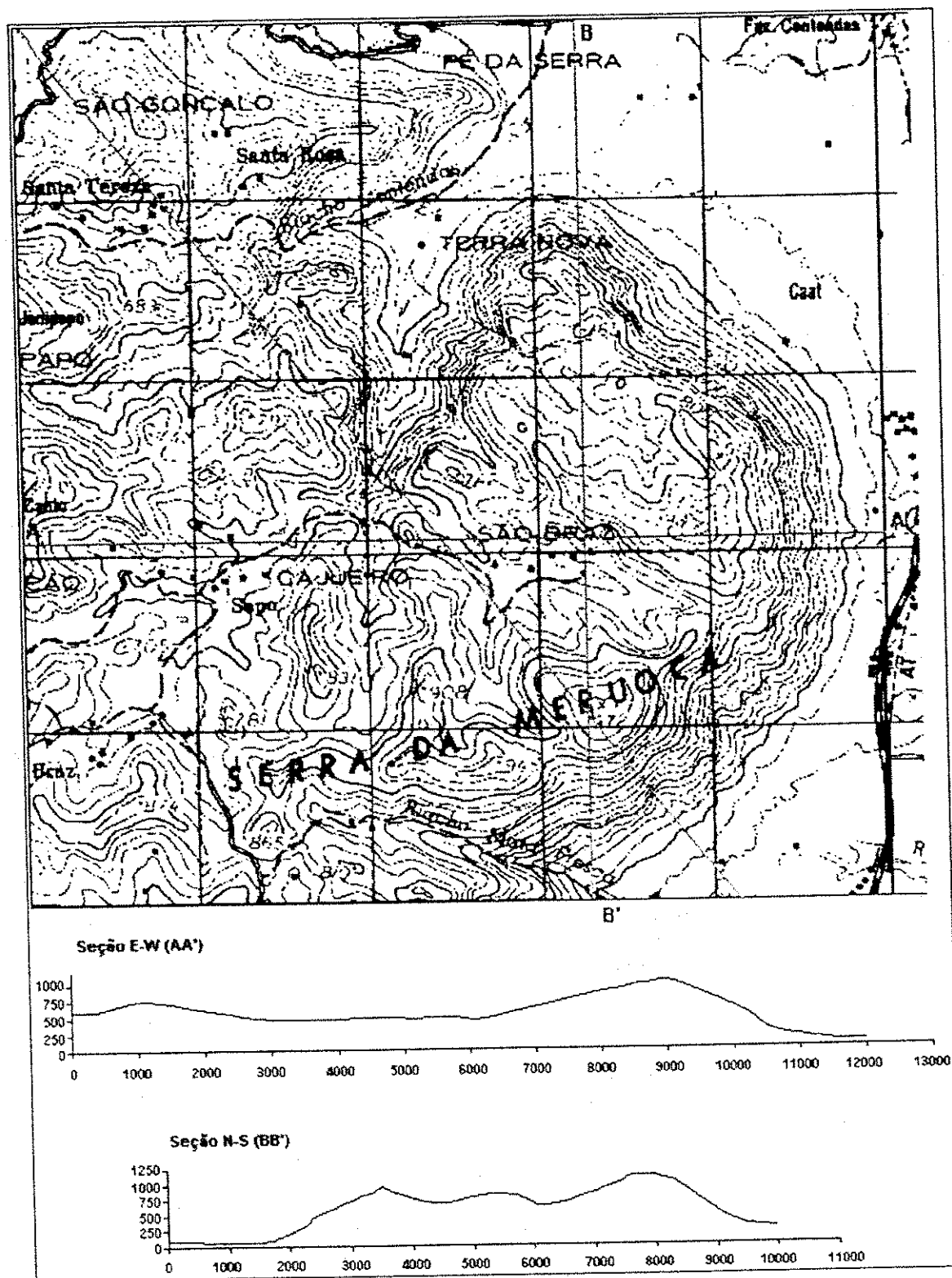


Figura 6.1- Mapa topográfico da Serra da Meruoca. Os perfis A e B foram utilizados para se estimar tensões resultantes do gradiente topográfico da serra.

A planta é baseada na Folha Sobral, 1:100.000, executada pela Divisão de Serviço Geográfico, do Ministério do Exército e a partir dela foram confeccionados perfis E-W (AA') e N-S (BB').

Foram visitadas três áreas no setor NNE do batólito, sendo que todas apresentaram feições diferentes:

- a área A (Verde Meruoca) que se encontra identificada apresenta duas feições de alívio sub-horizontais, anteriores aos trabalhos de exploração, devido à superfície leve de alteração que apresentam;
- a área B (Meruoca Clássico) é uma lavra de grandes matacões que não apresentam alterações no direcionamento das orientações da rocha. Utiliza-se desmonte a explosivos;
- a área C (Verde Ventura) é uma lavra de matacões, com dimensões variando de 2 a 10 metros, que se dispõem justapostos ao maciço rochoso, alguns empilhados, com planos de faces aproximadamente tri-ortogonais.

Testes laboratoriais de caracterização do granito Meruoca apresentam índices compatíveis com as exigências de mercado, estando agrupados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1- Propriedades Físicas do Granito Meruoca

Propriedades Físicas	Ensaio de Laboratório	Estimativa para o Maciço
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	140	44
Ângulo de atrito interno (°)	35	35
Coesão (MPa)	36	11
Módulo de elasticidade (GPa)	45	45
Relação de Poisson	0,3	0,3

Com vistas a estimar o estado de tensão, foi definido o índice RMR, de acordo com a classificação de Bieniawski, que atingiu escores individuais contidos na Tabela 6.2.

Tabela 6.2- Parâmetros e Escores de Definição do RMR para o Granito Meruoca.

Parâmetro	Resultado	Escore
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	140	12
RQD (%)	100	20
Espaçamento entre juntas (m)	2,6	20
Condições das juntas	Rugosa, <1 mm	25
Presença de água	Úmida	7
Índice RMR	-	84

De acordo com o escore alcançado, o parâmetro s do critério de Hoek-Brown é igual a 0,1 e a resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso é 36 MPa. Estes dados foram usados para as estimativas expressas na Tabela 6.1.

Em escala de amostra de mão e de laboratório a rocha apresenta um comportamento isotrópico para a resistência à compressão e módulo de elasticidade. Contudo a existência de plano de clivagem sub-horizontal conjugado com a orientação preferencial de minerais tabulares reduz a resistência à tração da rocha naquela direção.

Os processos de denudação são os responsáveis pela origem das fraturas de alívio permitindo ainda a perda de confinamento lateral, o que gerou o campo de matacões, citados como Área C.

Podemos inferir que a desnudação e o elevado gradiente topográfico são os fatores mais significativos sobre a natureza de tensões nas áreas visitadas da Meruoca.

6.3- Lagoa D'Anta – Rio Grande do Norte

IDENTIFICAÇÃO

Local	Lagoa d'Anta / Margem Leste de Reservatório / RN		
Coordenadas	Lat. 6° 23',14 / S	Long. 35° 35',72 / w	Cota (m) 138
Ref. Cartográfica	S. José do Campestre	MEx – SB.25.Y-A-I	1 : 100.000
Data - 23.02.1998			

GEOLOGIA

Litologia	Gnaisse migmatito do Complexo Presidente Juscelino, apresentando foliação gnáissica e com mergulho 60° SE.
Domínio Estrutural	Cinturão metamórfico-sedimentar do Proterozóico Inferior. Rocha está sob domínio de estrutura sinforme de flanco invertido, com caimento para sudeste.
Geomorfologia	Planalto sertanejo que apresenta formas tabulares e relevo de topo contínuo.

TENSÕES

Tipos previstos	
Observações	Trata-se de estrutura onde há evidências de tensões residuais horizontais que impediram o corte de planos verticais perpendicularmente às lineações gerando grande deslocamento.

OPERAÇÕES

Método de lavra	Bancada baixa, com extração de bloco único. Praça horizontalizada.
Tecnologia usada	Utiliza tecnologia conjugada (mista), sendo os cortes primários, perpendiculares ao talude natural, realizados com maçarico, sendo o outro plano feito através de perfuração coplanar, paralela. Os furos são raiados e o desmonte é através de explosivos.

Realizou-se levantamento expedito de dados do afloramento de migmatito, bem como se registrou estar o mesmo submetido a fortes tensões residuais que geraram trincas que impediram a saída de blocos (Figuras 6.2 e 6.3).

O interessante neste caso é que se o corte no sentido E-W, na parte Sul do afloramento, não acusou a existência de estrutura tão submetida à tensão residual, como o que ficou evidenciado pelos cortes W-E, efetuados nos setores central e norte do corpo.

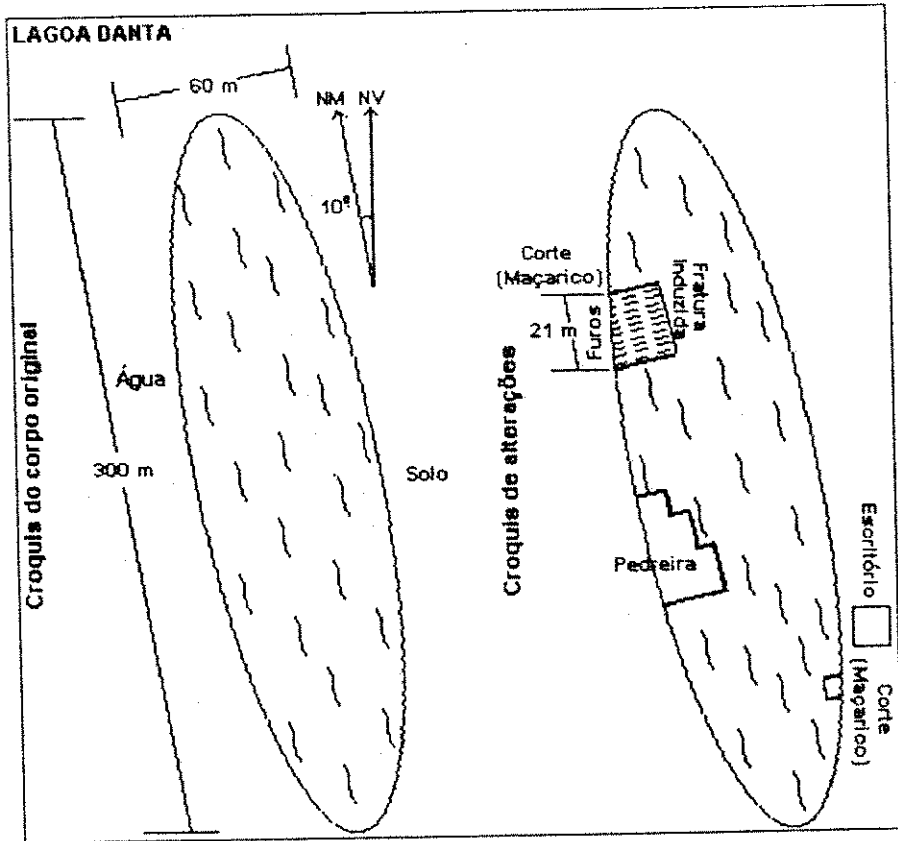


Figura 6.2- Croquis esquemático do afloramento de Lagoa D'Anta.

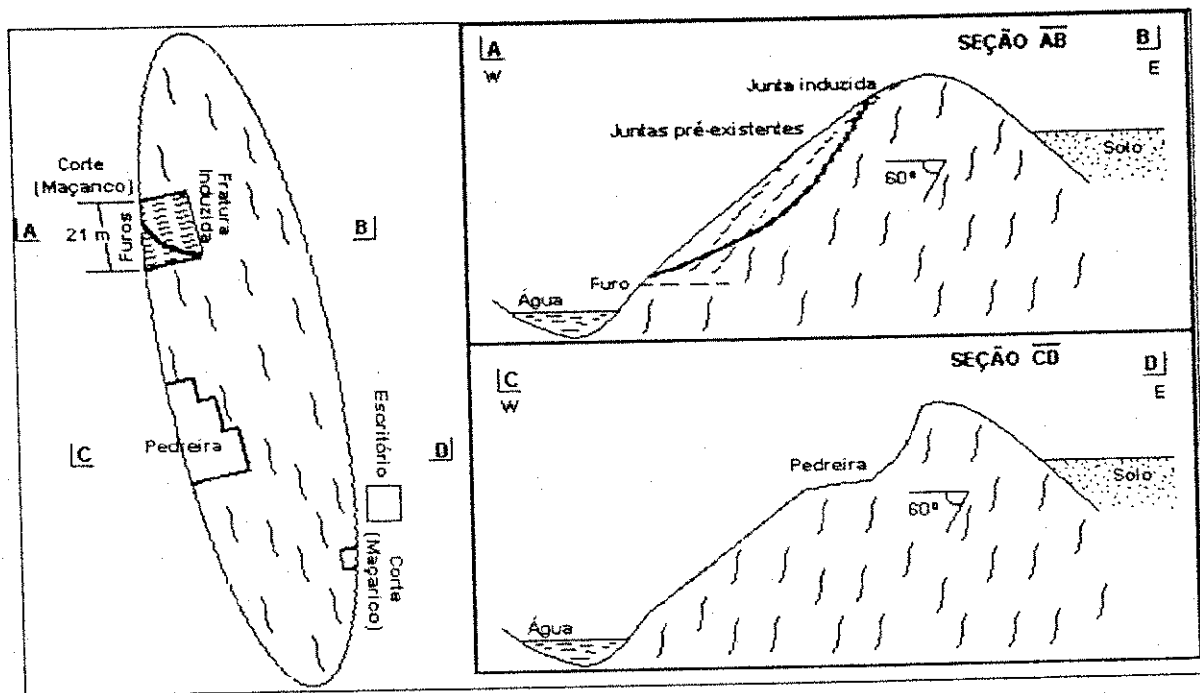


Figura 6.3- Perfis esquemáticos do corpo posicionando as lineações da rocha e o desenvolvimento das fraturas pré-existentes e induzida pelo alívio de tensões.

Sendo assim, o processo de fraturamento que ocorreu, neste caso, pode ser definido como de deslocamento, a partir do alívio de tensões residuais em planos paralelos à foliação da rocha.

Na busca de subsídios passou-se a investigar as estruturas regionais, em mapa de autoria da CPRM - Cia. de Recursos Minerais, na escala 1 : 250.000 (Figura 6.4), que poderiam auxiliar na identificação da natureza das tensões existentes.

Por fim, a Figura 6.4 mostra o arqueamento sofrido pelas rochas gnáissicas e migmatíticas da região de Lagoa D'Anta, devido à intrusão de rocha granítica de formato retangular (entre Umbuzeiro e Araruna), com datações do ciclo Brasileiro (642 e 724 Ma), que pode ser indicativo para o dobramento sinforme de eixo invertido posicionado a oeste da área.



Figura 6.4- Mapa geológico-estrutural da área Lagoa D'Anta.

Como se vê, o que ocorreu foi um reflexo da falta de conhecimento do corpo, relativamente aos seus aspectos de geologia estrutural e geotécnico:

- a- a direção de tensão máxima é NE-SW, que ocorreu em ambiente compressional e permitiu que o corpo assumisse uma configuração elipsoidal;
- b- o sentido de mergulho da foliação é NW, o que explica a maior superfície do setor oeste;
- c- o corpo apresenta um perfil concordante com a foliação: flanco leste com mergulho mais pronunciado que o oeste.

6.4- Cacerengo – Paraíba

IDENTIFICAÇÃO

Local	Serra da Cachexa - Cacerengo / PB		
Coordenadas	Lat. 6° 53',78 / S	Long. 35° 56',48 / W	Cota (m)
Ref. Cartográfica	Cabedelo - CPRM	SB.25-Y-A	1 : 250.000
Data - 23.02.1998			

GEOLOGIA

Litologia	Trata-se de granito equigranular da suite magmática, de coloração cinza esbranquiçada passando a róseo e esverdeado (quando alterado), apresenta-se concordante com a Falha do Cacerengo (transcorrente) e encaixado em micaxisto da Formação Seridó, do cinturão metamórfico sedimentar do Proterozóico Médio.
Domínio Estrutural	Extremo Nordeste.
Geomorfologia	Superfície de ressaio topográfico do planalto sertanejo, com fraco aprofundamento de drenagem. Apresenta relevo convexo e vales em forma de "v".
Idade / Eventos	Proterozóico Superior a Paleozóico Inferior, sendo associada ao maciço de Caldas Brandão.

OBSERVAÇÕES

	Boulders são indicadores de sistema de juntas e o principal subsídio extraído desta área é que neste tipo geomorfológico, há possibilidade de se estimar o espaçamento de juntas a partir dos matacões.
--	---

OPERAÇÕES

Método de lavra	Desmoronamento
Tecnologia usada	Furos isolados e uso de explosivo de baixa velocidade

6.5- Batólito de Pocinhos – Paraíba

IDENTIFICAÇÃO

Local	Pocinhos / PB		
Coordenadas	Lat. 7° 04',845 / S	Long. 36° 03',694 / W	Cota (m) 669
Ref. Cartográfica	Patos – CPRM	SB.24-Z-D	1 : 250.000
Data - 24.02.1998			

GEOLOGIA

Litologia	Granito médio a grosseiro da suite magmática, isotrópico, com veios de quartzo pouco espessos mas persistentes, espaçados de cerca de 10 m, sem clivagem preferencial aparente, apresentando deslocamento paralelo à superfície do terreno.
Domínio Estrutural	Extremo Nordeste.
Geomorfologia	Configuração do planalto sertanejo que apresenta fraco aprofundamento de drenagem, dissecação convexa e vales em forma de "v".
Idade / Eventos	Pré-Cambriano Superior, intrudido em rochas do Complexo Gnáissico-migmatítico.

TENSÕES

Tipos previstos	Como inexistem ressaltos topográficos acentuados não se prevê tensões de efeito topográfico. Podem existir tensões residuais de formação.
Observações	<ul style="list-style-type: none"> - Não há evidência de tensões residuais. - Em um afloramento inspecionado foram observados dois planos de deslocamento, paralelos à superfície do terreno, espaçados em 70 cm de altura. - A rocha obedece a cortes conchoidais. - Exposição de corpo quilométrico, intrudido concordantemente com grandes falhamentos, pode se apresentar aliviado em suas regiões de contato. - Espaçamento médio entre diques de quartzo de 10 m. Na superfície de batólitos de pouca anisotropia deve-se estimar o espaçamento de feições como inclusões e diques. - Como regra geral, grandes batólitos podem apresentar pouca, ou nenhuma, anisotropia em determinados setores.

OPERAÇÕES

Método de lavra	<ul style="list-style-type: none"> - Houve corte de blocos a partir de alguns poucos matacões mas os trabalhos foram paralisados. - Serviços de corte de blocos de tamanho reduzidos em bancos de 70 cm de altura aproveitando dois planos de deslocamento.
Tecnologia usada	Lavra de matacões até o presente

6.6- Migmatito de Santa Luzia – Paraíba

IDENTIFICAÇÃO

Local	Fazenda Chico Granjeiro / Santa Luzia - PB		
Coordenadas	Lat. 6° 53',21 / S	Long. 36° 52',54 / W	Cota (m)
Ref. Cartográfica	J. do Seridó DSG/MEx	SB.24-Z-B-V	1 : 100.000
Data - 24.02.1998			

GEOLOGIA

Litologia	Migmatito róseo a cinza, apresentando inclusões de biotita-xisto, dispersos na superfície do afloramento e nos cortes verticais.
Domínio Estrutural	Domínio Transnordestino.
Geomorfologia	Região de transição entre formas aguçadas e convexa de dissecação em fundo de vale de forma plana do Planalto da Borborema.
Idade / Eventos	Ciclo Brasileiro atuando em rochas do Complexo Nordestino. Cinturão metamórfico vulcano-sedimentar. Falha Jardim do Seridó.

TENSÕES

Tipos previstos	Sem previsão da existência de tensões: terreno arrasado de planalto, com comportamento suave, e sem nenhum acidente geográfico nas proximidades.
Observações	<ul style="list-style-type: none"> - Não há evidências de existência de tensões residuais. O problema crucial desta pedreira consiste na existência de paleossomas de xisto friável. - Se houvesse feito um mapeamento de superfície haveria possibilidade de prever o comportamento da distribuição dos xenólitos, descartando a área por completo ou elegendo faixas para exploração (lavra seletiva).

OPERAÇÕES

Método de lavra	Bancada baixa
Tecnologia usada	Perfuração contínua com slot-drill e fio diamantado para corte verticais. Cortes testemunho demonstra o uso de furos horizontais para corte deste plano, utilizando-se de explosivos de baixa velocidade. A direção da bancada principal é normal à foliação.

6.7- Metasedimento de Pedra Branca – Ceará

IDENTIFICAÇÃO

Local	Tróia / Serra da Pedra Branca (Granito Branco Casablanca) - CE		
Coordenadas	Lat. 5° 31',36 / S	Long. 39° 54',80 / W	Cota (m) 657
Ref. Cartográfica	Quixeramobim	CPRM - SB.24-V-D	1 : 250.000
Data - 20.07.1998			

GEOLOGIA

Litologia	Ortognaisse leucocrático do Complexo Independência, apresentando veios pegmatítico com concentrações de muscovita e quartzo concordantes com a foliação.
Domínio Estrutural	Domínio Cearense no Sistema Dobrado Independência, com interferência da Falha Sabonete-Inharé (transcorrente). Localiza-se na aba leste de antiforma Santa Quitéria.
Geomorfologia	Relevo residual de planalto
Idade / Eventos	Proterozóico inferior (± 2.000 Ma), remobilização dos Ciclos Transamazônico e Brasileiro

TENSÕES

Tipos previstos	Tensões gravitacional (gradiente topográfico) e residual (sobreposição de eventos sucessivos).
Observações	<ul style="list-style-type: none">- Há evidências de alívio de tensões horizontais, com deslocamento estimado em até 5 mm, em remanescente de corte de fio diamantado.- Segundo informações do gerente de operações, alguns blocos "sãos" apresentam trincas um dia após cortados.- Os planos de corte não coincidem nem com as juntas nem com a foliação.- Foi informado que durante certa fase do desenvolvimento foi utilizado dinamite para corte.

OPERAÇÕES

Método de lavra	Bancadas baixas em quatro frentes com praças horizontalizadas.
Tecnologia usada	Corte contínuo: fio diamantado (notadamente em cortes horizontais), maçarico e desmonte com explosivos. Nota: citado que desta área já foram produzidos cerca de 1.000 m ³ de blocos que foram comercializado e/ou serrados.

6.8- Granito da Serra do Barriga –Ceará

IDENTIFICAÇÃO			
Local	Serra do Barriga (Granito Rosa Iracema) - CE		
Coordenadas	Lat. 3° 42',37 / S	Long. 40° 08',00 / W	Cota (m) 185
Ref. Cartográfica	Sobral – DSC/MEx	SA.24-X-D-IV	1 : 100.000
Data - 21.07.1998			
GEOLOGIA			
Litologia	<ul style="list-style-type: none"> - Inselberg granítico, com cerca de 6 Km de diâmetro, e desnível de 800 m, isotrópico, com granulação média, textura porfirítica, aflorante também em boulders de centenas de metros que apresentam relevo suave, situados em torno do corpo principal. - Trata-se de granito pós-tectônico inserido no Complexo Nordestino. 		
Domínio Estrutural	Domínio Cearense, bordejando a margem oeste do maciço de Santa Quitéria.		
Geomorfologia	Zona de transição entre o limite do inselberg da Serra do Barriga e superfície pediplanada de depressão periférica.		
Idade / Eventos	Paleozóico inferior. Magmatismo ácido do Ciclo Brasileiro (560 Ma).		
TENSÕES			
Tipos previstos	Como a exploração está prevista para matacões individualizados, com superfície suave, não se prevê problemas de tensões.		
Observações	Foram detectados dois planos de alívio, paralelos entre si, espaçados de 1,10 m, com mergulho 16°S que não são aproveitados na lavra: tenta-se horizontalizar os planos.		
OPERAÇÕES			
Método de lavra	Bancadas baixas, de bloco único, com praças horizontalizadas.		
Tecnologia usada	Corte primário com maçarico, seguido da formação de blocos com perfuração coplanar e explosivos.		

6.9- Migmatito do Caracará – Ceará

IDENTIFICAÇÃO

Local	Caracará (Granito Red Ceará) - CE		
Coordenadas	Lat. 3° 42',82 / S	Long. 40° 01',87 / W	Cota (m) 125
Ref. Cartográfica	Sobral – DSC/MEx	SA.24-X-D-IV	1 : 100.000
Data - 21.07.1998			

GEOLOGIA

Litologia	<ul style="list-style-type: none"> - Afloramento em três corpos individualizados de migmatito alongado com cerca de 200 m e comprimento, por 50 m de largura e desnível máximo de 20 m. - Migmatização de rochas do Complexo Tamboril-Santa Quitéria, do pré-Cambriano indiviso, através de vulcanismo do Brasileiro. - A rocha apresenta estrutura de fluxo e orientação plano paralela ao alinhamento estrutural.
Domínio Estrutural	Domínio Cearense, no maciço de Santa Quitéria.
Geomorfologia	Afloramento decamétrico em superfície pediplanada.
Idade / Eventos	Rocha brasileira, proveniente de rejuvenescimento de rochas arqueanas.

TENSÕES

Tipos previstos	
Observações	<ul style="list-style-type: none"> - Matacões individualizados pelos sistemas de juntas que já aliviaram as tensões possivelmente existentes. - A existência de juntas sub-verticais de grande persistência e denso espaçamento representa o fator crítico para a extração de blocos em padrões comerciais. - Observa-se também um sistema complexo de fraturas e diques secundários.

OPERAÇÕES

Método de lavra	Bancadas baixas, com bloco único e praça horizontalizada. Procurando seguir a orientação estrutural do corpo.
Tecnologia usada	<ul style="list-style-type: none"> - Maçarico e perfuração com desmonte a explosivos. Há possibilidade de iniciar-se o uso de fio diamantado. - Não foi realizado serviço de pesquisa mas a idéia do corpo técnico da empresa é que o corpo é parte superior de um lacólito que possibilitaria a formação de lavra em cava.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante do exposto vê-se que os técnicos envolvidos com rochas para fins ornamentais devem balizar seu trabalho a partir de informações litológico-estruturais, e geomorfológicas a partir de elementos bibliográficos que irão orientar a busca de dados específicos de cada área. Contudo, de maneira geral, pode-se concluir que:

1- Tensões:

- O estudo da geologia estrutural em escala regional adequada pode fornecer indicações sobre a ordem de grandeza e direção do campo de tensões
- Análises petrográficas de amostras orientadas são de suma importância na estimativa de direcionamento e intensidade de processos de deformações que a rocha sofreu, através de seus constituintes e do estado microfissural.
- Em corpos que imprimem feição de resalto acentuado de relevo deve-se procurar trabalhar em setores próximos às bordas, dando-se preferência a corpos menores de mesma composição (se existentes), onde tensões de efeito topográfico são desprezíveis.
- Quando da efetivação de programas de sondagem analisar, afora os aspectos petrográficos, a formação de discos, anéis ou trincas, típicos de tensões horizontais elevadas.

2- Classificação de maciços rochosos:

- Tendo em vista as suas concepções, utilizar com a devida ressalva o índice RQD, indispensável para utilização dos Sistemas RMR e Q.
- Para rochas para fins ornamentais os critérios de classificação de maciços rochosos servem apenas para estimativa do estado de tensão máximo suportado pelo maciço, através de correlações e do Critério de Ruptura de Hoek-Brown.
- O escore de espaçamento de sistemas de fraturas de Laubscher pode ser utilizado para o planejamento da lavra, podendo-se estimar o tamanho médio dos blocos que o maciço pode produzir, desde que sejam consideradas as alterações das superfícies das fraturas e seu grau de sanidade.

3- Áreas de rochas gnáissicas e migmatíticas:

- Planejar os cortes no sentido perpendicular, ou oblíquos, à foliação para evitar problemas de deslocamento.
- Observar em zonas de concentração de minerais placosos se ocorre o entumescimento destes, que pode ser indicativo da presença de tensões residuais.
- A concentração de minerais de alta (granadas, quartzo) e baixa resistência ao deslocamento pode gerar perdas de material e / ou qualidade nos processos de corte de blocos e polimento de chapas.
- Nos afloramentos onde frequentemente ocorrem xenólitos, mapeá-los, já na fase inicial da pesquisa, buscando-se definir seu comportamento espacial, podendo-se usar as técnicas de geoestatística básica.

4- Áreas de grandes intrusões graníticas

- Caso haja presença de “campo de matacões” utilizá-los para inferir o espaçamento dos sistemas de juntas do maciço, principalmente nos matacões menos ovalados por intemperismo.
- Nos afloramentos de corpos de aparência isotrópica deve-se mapear os diques e inclusões, para permitir um processo de lavra mais seletivo, orientado e dimensionado de acordo com estas feições.
- Em superfície, as zonas próximas a contatos tectônicos são as de menor confinamento e apresentam-se mais aliviadas de tensões.

Como indicação para trabalhos futuros fica sugerido a elaboração de um sistema de classificação próprio para as rochas para fins ornamentais, envolvendo os cinco aspectos básicos de sua definição:

- estético;
- composição mineral e petrográfica;
- características físicas da rocha;
- condicionantes geológicos e geotécnicos do maciço; e
- questões mercadológicas.

BIBLIOGRAFIA

- Amadei, B.** (1996) Importance of Anisotropy When Estimating and Measuring In Situ Stresses in Rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech.* Vol 33, Nº 3, 293-325
- Amadei, B. e Pan, E.** (1992) Gravitational stresses in anisotropic rock masses with inclined strata. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech.* Vol 9, 225-236
- Amadei, B., Savage, W.Z e Swolfs, H. S.** (1987) Gravitational stresses in anisotropic rock masses. . *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech.* Vol 24, 5-14
- Amadei, B. e Stephansson, O.** (1997) *Rock Stress and its Measurement.* First Edition – ISBN - 0-41244-700-2 - Chapman & Hall
- American Society for Testing and Material – ASTM – 1989 (ASTM C 503).**
Standard Specification for Marble Dimension Stone (Exterior) 2p.
- American Society for Testing and Material – ASTM – 1989 (ASTM C 568).**
Standard Specification for Limestone Dimension Stone. 2p.
- American Society for Testing and Material – ASTM – 1992 (ASTM C 615).**
Standard Specification for Quartz-Based Dimension Stone. 2p.
- American Society for Testing and Material – ASTM – 1995 (ASTM C 616).**
Standard Specification for Granite Dimension Stone. 2p.
- Arcoverde, W. L.** (1997) *Competitividade Determina o Futuro das Empresas.*
Rochas de Qualidade - Edição 132 - 60 – 68
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT – 1990 (MB - 3379).**
Argamassa de alta resistência mecânica para pisos. 2p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT – 1990 (EB - 2100).**
Materiais inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão. 3p.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT – 1992 (NBR 12763).**
Rochas para revestimento - Determinação da resistência à flexão. 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT – 1992 (NBR 12764).**
Rochas para revestimento - Determinação da resistência ao impacto de corpo duro. 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT – 1992 (NBR 12765).**
Rochas para revestimento - Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear. 4p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT – 1992 (NBR 12766).**
Rochas para revestimento - Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. 2p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT – 1992 (NBR 12767).**
Rochas para revestimento - Determinação da resistência à compressão uniaxial. 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT – 1992 (NBR 12768).**
Rochas para revestimento - Análise petrográfica. 2p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT – 1992 (NBR 12769).**
Rochas para revestimento - Ensaio de congelamento e degelo conjugado à verificação da resistência à compressão. 2p.
- Atkinson, B. K. (1989) Fracture Mechanics of Rock. Academic Press Limited - ISBN 0-12-066266-3**
- Aumond, J. J. (1996) Os minerais industriais e o quarto ciclo da mineração brasileira. Minérios. Ano 8, nº 213, 16-19**
- Aytmatov, I. T. (1986) On virgin stress state of a rock mass in mobile folded area. Symp. Rock Stress and Rock Stress Measurements**
- Bandis, S. C., Lumsden, A. C. e Barton, N. (1983) Fundamentals of rocks joint deformation. Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.**

- Barbero, M., Barla, G. e Zaninetti, A. (1996)** Dynamic Shear Strength of Rock Joints Subjected to Impulse Loading. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech.* Vol 33, Nº 2, 141 – 151
- Barton, N.(1976)** Recent experiences with the Q-System of tunnel support design. *Balkema*, 107-115
- Barton, N. (1996)** Influência das propriedades das fraturas na modelação dos maciços rochosos. *ABGE*, traduzido por Quadros, E. F.
- Barton, N. (1997)** Tunnelling in Jointed Rock. Notas de curso ministrado na Bahia.
- Barton, N., Lien, R. e Lunde, J. (1974)** Engineering Classifications of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics.* Vol. 6, 183-236
- Baud, P., Reuschlé, T. e Charlez P. (1996)** An Improved Wing Crack Model for the Deformation and Failure of Rock in Compression. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech.* Vol 33, Nº 5, 539 – 542
- Bieniawski, Z. T. (1973)** Engineering Classifications of Jointed Rock Masses. *Trans. S. African Institute of Civil Engineering.* Vol. 15, 335-344
- Bieniawski, Z. T. (1989)** Engineering rock mass classifications. *John Wiley & Sons, Inc.*
- Bilenstein, H. U. e Baron, K. (1971)** In-situ stresses. *Conference of Structural Geology to Rock Mechanics Problems.*
- Bortolussi, A., Ciccu, R., Agus, M., Fiamminghi, A. e Careddu, N. (1996)** Deep Slotting Tests Waterjet on a Japanese Granite. *Mine Planning and Equipment Selection - 337 - 343 - ISBN 90 5410 827 4*
- Bortolussi, A., Ciccu, R., Fiamminghi, M. A. e Careddu, N. (1996)** Deep Slotting Tests With Waterjet on a Japanese Granite. *Mine Planning and Equipment Selection - 337 - 343 - ISBN 90 5410 827 4*
- Brady, B. H. G. e Brown, E. T. (1992)** *Rock Mechanics for Underground Mining.* Ed. George Allen & Unwin. Lodon

- Bulin, N. K.** (1971) The present stress field in the upper parts of the crust. *Geotectonics*, nº 3, 133-139
- Calaes, G. D.** (1997) O setor de rochas ornamentais diante do novo cenário econômico nacional. *Techoje*, www.techoje.com.br
- Caranassius, A., Stellin Jr., A. e Ayres da Silva, L. A.** (1993) Considerações Acerca do Estado de Tensões dos Maciços na Lavra de Rochas Ornamentais. II Congresso Ítalo-Brasileiro de Engenharia de Minas.
- Caruso, L.G.** (1990) Catálogo de Rochas Ornamentais do Estado de São Paulo. IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – Publicação nº 1820
- Caruso, L.G., Braga, T. de O., Rodrigues, E. de P. e Ens, H. H.** (1996) Estudo de Avaliação Técnico-Econômica Para Exploração de Rochas Ornamentais. Granitóides Agudos Grandes e Guaraú. IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – Publicação nº 2446
- Caruso, L.G.** (1996) Pedras Naturais - Extração, Beneficiamento e Aplicação. *ROCHAS & Equipamentos* - nº. 43 - 3º. Trimestre / XI Ano - Lisboa / Portugal - p 98 – 156
- CDRM – Cia. de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba** (1982) Mapa Geológico do Estado da Paraíba.
- Chiodi Filho, C.** (1994) Pesquisa geológica: o primeiro passo. *Rochas de Qualidade* – nº. 117 – 2º. Trimestre
- Ciccu, R.** (1993) Curso de Lavra de Mármore e Granitos. Belo Horizonte – 9-10 e 13-14 de Setembro.
- Ciccu, R.** (1993) Waterjet in Ornamental Stone Engineering. II Congresso Ítalo-Brasileiro de Engenharia de Minas - 405 – 423
- Constanzo Jr., J.** (1982) Síntese metodológica dos estudos geológico-geotécnicos aplicados ao projeto de taludes de mineração. USP-São Carlos

- Cumerlato, C. L., Stachura, V. J. e Tweeton, D. R. (1996)** Application of Refraction Tomography to Map the Extent fo Blast-Induced Fracturing Mine Planning and Equipment Selection - 691 - 698 - ISBN 90 6191 835 9
- Curran, J. H. e Corkum, B. T. (1991)** EXAMINE 2D - Excavation Analysis for MINEs - Version 3.1
- Deere, D. U. (1963)** Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes. Rock Mechanics and Engineering Geology. Vol. 1, 16-22
- Deketh, H. J. R. (1995)** Wear of rock cutting tools Balkema. Rotterdam.
- Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM (1996)** DNPM Divulga o Desempenho do Setor de Rochas Ornamentais - Rochas de Qualidade - Edição 130 - setembro/outubro - 84 - 91
- Diehl, M., Rapp, M. e Schuller, H. (1996)** New developments to improve the in-situ value of granite dimension stone Mine Planning and Equipment Selection - 13 - 18 - ISBN 90 5410 827 4
- Dunn, M. L., Suwito, W., Cunningham, S. e May C. W. (1997)** Fracture initiation at sharp notches under mode I, mode II and mild mixed mode loading. International Journal of Fracture - n 84 - p 367 - 381
- Duncan, J. M. e Goodman, R. (1968)** Finite element analysis of slopes in jointed rocks
- Fairhurst, C. (1986)** In-situ stress determination - an appraisal of its significance in rock mechanics. Int. Symp. Of Rock Stress and Rock Stress Measurements
- Fisher, M. P., Elsworth, D., Alley, R. B. e Engelder, T. (1996)** Finite Element Analysis of the Modified Ring Test for Determining Mode I Fracture Toughness. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Vol 33, Nº 1, 1 - 15
- Flain, E. P. (1997)** Recomendações Para Revestimentos de Fachadas de Rochas Ornamentais. Rochas de Qualidade - Edição 132 - janeiro / fevereiro - 60 - 68

- Fomaro, M., Cardu, M. e Mancini, R. (1993)** Aspetti Tecnologici e Micromeccanici del Taglio Delle Pietre com Microutensili. Il Congresso Ítalo-Brasileiro de Engenharia de Minas - 425 - 446
- Franklin, J. A. e Dusseault, M. B. (1989)** Rock Engineering / Ground Characterization. Measurement, Prediction and Monitoring of Rock Behavior. McGraw-Hill International - ISBN 0-07-100737-7
- Frazão, E. B. (1993)** Catálogo de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo – IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – Publicação nº 2048
- Frazão, E. B. e Farjallat, J. E. S. (1993)** Características tecnológicas de rochas silicáticas brasileiras de revestimento. Rochas de Qualidade - Ed. 128. p 56 – 60
- Friedman, M. (1964)** Petrographic techniques for the determination of principal stress directions in rocks. Int. Conference on State of Stress in the Earth's Crust.
- Gama, E. M. e Rusilo, L. C. (1992)** Cálculo Automático de Rupturas Circulares. Caso Prático de Aplicação. Coletânea de Trabalhos Técnicos - 5º. Seminário Nacional: O Computador e Sua Aplicação no Setor Mineral - 123 - 136 - Belo Horizonte, 17 a 19 de agosto
- Gerrard, C.M. (1975)** Background to mathematical modeling in geomechanics: the roles of fabric and stress history. International Symp. On Numerical Methods. Balkema, 33-120
- Ghanmi, A., Hadjigeorgiou, J. e Paraszczak, J. (1996)** Modelling of the Action of a Radial -Axial Splitter. Mine Planning and Equipment Selection - 361 - 368 - ISBN 90 5410 827 4
- Gonçalves, P. (1996)** Importância Social e Econômica do Setor das Pedras Naturais. ROCHAS & Equipamentos - nº. 44 - 4º. Trimestre / XI Ano - Lisboa / Portugal - p 38 - 48

- Goodman, R. E.** (1989) Introduction to Rock Mechanics. Second Edition - John Wiley & Sons
- Grasmueck, M.** (1996) 3-D Ground-Penetrating Radar Applied to Fracture Imaging in Gneiss. *Geophysics*, Vol 61, N° 4, July-August, 1050-1064
- Hashida, T., Oghikubo, H., Takahashi, H. e Shoji, T.** (1993) Numerical simulation with experimental verification of the fracture behavior in granite under confining pressures based on the tension-softening model. *International Journal of Fracture* - vol 59 - p 227 - 244
- Hashida, T. e Takahashi, H.** (1993) Significance of AE Crack Monitoring in Fracture Toughness Evaluation and Non-linear Rock Fracture Mechanics. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech.* Vol 30, N° 1, 47 – 60
- Hast, N.** (1958) The measurements of rock pressures in mines. *Sveriges Geol. Undersokning. Série C* - 560
- Haxby, W. F. e Turcotte, D. L.** (1976) Stresses induced by addition or removal of overburden and associated thermal effects. *Geology.* Vol. 4, 181-184
- Heald, S. R.** (1992) Peering Beneath the Surface. *Pollution Engineering* – October
- Herget, G.** (1980) Regional stresses in Canadian shield. 13th. Symp. Of Rock Mechanics.
- Herget, G.** (1986) Changes of ground stresses with depth in the Canadian shield. *International Symp. Of Rock Stress and Rock Stress Measurements*
- Hoek, E.** (1983) Strength of jointed rock masses. *Geotechnique.* Vol. 33, 187-223
- Hoek, E. e Bray, J. W.** (1981) *Rock Slope Engineering.* 3rd. Edition. Institution of Mining and Metallurgy
- Hoek, E. e Brown, E. T.** (1980) *Underground Excavations in Rock.* The Institution of Mining and Metallurgy, London

- Hoek, E. e Brown, E. T. (1988)** The Hoek-Brown failure criterion. 15th.
Canadian Rock Mechanics Symp. J. C. Curran, 31-38
- Hoek, E. e Brown, E. T. (1997)** Practical estimates of rock mass. Int. J. Rock
Mech. Min. Sci. & Geomechanics. Vol 34, 1165-1186
- Hudson, J. A. e Cooling, C.M. (1988)** In-situ rock stresses and their
measurements in the United Kingdom. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. &
Geomechanics. Vol 25, 363-370
- Hyett, A. J., Dyke, C. G. e Hudson, J.A. (1986)** A critical examination of basic
concepts associated with the existence and measurements of in-situ stress.
International Symp. Of Rock Stress and Rock Stress Measurements
- Ishida, T. e Saito, T. (1995)** Observation of Core Discing and In Situ Stress
Measurements; Stress Criteria Causing Core Discing.
- Jaegger, J. C. e Cook, N. G. W. (1976)** Fundamentals of Rock Mechanics.
Second Edition - Chapman and Hall, London
- Jefferson, D. P. (1993)** Building Stone. The Quaterly Journal of Engineering
Geology, 26, 305/ 319
- Junge, T. (1996)** Design and Mine Planning of a Massive Deposit in the
Dimensional Stone Sector Taking as an Example the Kinawa Quarry in Minas
Gerais, Brazil. Mine Planning and Equipment Selection - 13 - 18 - ISBN 90
5410 827 4
- Kachanov (1992)** Effective elastic properties of cracked solids: Critical review of
some basic concepts. Applied Mechanics. Vol. 45, 304-335.
- Karakin, A.V., Kuznetsov, O. L. e Mukhamediyev, Sh. A. (1992)** Theoretical
Principles for Calculation of the Stress-Tensor Distribution in Rock Masses.
International Geology Review - vol. 34, nº. 7, 720 - 735
- Lana, M. S. (1992)** Uma Aplicação do Método de Elementos Finitos à Análise da
Estabilidade de Escavações Subterrâneas Mineiras - Coletânea de Trabalhos
Técnicos - 5º. Seminário Nacional : O Computador e Sua Aplicação no Setor
Mineral - 107 - 122 - Belo Horizonte, 17 a 19 de agosto

- Laubscher, D. H.** (1977) Geomechanics Classification of Jointed Rock Masses. Trans. Inst. Mining and Metallurgy. Vol. 86, A1-A7
- Lauffer, H.** (1958) Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau. Geol. Bauwesen. Vol. 74, 46-51
- Leijon, B. A.** (1989) Relevance of pointwise rock stress measurements: an analysis of overcoring data. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Vol 26 - 61 - 68
- Li, F.** (1986) In situ stress measurements, stress state in the upper crust and their application to rock engineering. Symp. Rock Stress and Rock Stress Measurements
- Liao, J. J., Savage, W. Z. e Amadei, B.** (1992) Gravitational stresses in anisotropic ridges and valley with small slopes. Journal of Geophysic. Vol 97, 25 - 36.
- Lim, H. U. e Lee, C. I.** (1995) Fifteen years experience on rock stress measurements in South Korea. 8th. Int. Society of Rock Mechanics Congress
- Lima, A. de A., Macêdo, A. J. B. de e Gopinath, T. R.** (1997) Effects of Rock Stress on the Extraction of Dimension Stones Granitics Rocks. - não publicado.
- Lin, C.T., Amadei, B., Jung, J. e Dwyer, J.** (1996) Extensions of Discontinuous Deformation Analysis for Jointed Rock Masses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Vol 33, Nº 7, 671 - 694
- Mancini, R., Bianchini, S., Cardu, M. e Fornaro, M.** (1993) Hard Dimension Stone Quarrying by Detonating Cord and by Diamond Wiresaw. II Congresso Ítalo-Brasileiro de Engenharia de Minas - 380 - 391
- Martin, C. D. e Chandler, N. A.** (1993) Stress heterogeneity and geological structures. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Vol 30, 993 - 999
- Martin, C. D. e Simmons, G. R.** (1993) The atomic energy of Canada Limited URL - Underground Research Laboratory. Comprehensive Rock Engineering. Peragamon

- McGuire, W.J. e Pullen, A. D. (1989)** Location and orientation of eruptive fissures and feeder-dykes at Mount Etna; influence of gravitational and regional tectonic stress regimes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* - vol. 38, 325 – 344
- McTiger, D. F. e Mei, C. C. (1981)** Gravity induced stresses near topography of small slopes. *Journal of Geophysics*. Vol. 86, 9268-9278
- McTiger, D. F. e Mei, C. C. (1987)** Gravity induced stresses near axisymmetric topography of small slopes. *Int. J. Num. Anal. Math.* Vol. 11, 257-268
- Merril, R. H. (1964)** In situ determination of stress by relief techniques. *International Conference of State of Stress in the Earth's Crust*. Elsevier, 343-369
- Merrit, A. H. (1972)** Geologic Prediction for Underground Excavations. *Procedure of Rapid Excavation Tunneling Conference*. AIME, 115-132
- Ministério das Minas e Energia – MME (1993)** Mapa Geológico do Estado do Ceará. Escala 1:500.000
- Mishnaevsky Jr., L. L. (1996)** Determination for the time-to-fracture of solids. *International Journal of Fracture* - Vol 79, nº 4 - p 341 – 350
- Nieble, C.M., Fujimura, F., Brito, S. e Orlandi, P.; Pena, L. (1992)** Utilização de Métodos Computacionais em Mecânica de Rochas e Modelamento Numérico na Mina da Fazenda Brasileiro. *Coletânea de Trabalhos Técnicos - 5º. Seminário Nacional : O Computador e Sua Aplicação no Setor Mineral* - 137 - 149 - Belo Horizonte, 17 a 19 de agosto
- Pan, E. e Amadei, B. (1994)** Stresses in an anisotropic rock mass with irregular topography. *Journal Eng. Mech*. Vol 120, 97 – 119
- Pan, E. e Amadei, B. (1996)** Fracture mechanics analysis of cracked 2-D anisotropic media with a new formulation of the boundary element method. *International Journal of Fracture* - vol 77 - p 161 – 174

- Pan, E., Amadei, B. e Savage, W. Z. (1994)** Gravitational stresses in long symmetric ridges and valleys in anisotropic rock. . Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Vol 31, 293 – 312
- Pan, E., Amadei, B. e Savage, W. Z. (1995)** Gravitational and Tectonic Stresses in Anisotropic Rock with Irregular Topography. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Vol 32, Nº 3, 201 – 214
- Penteado, M. M. (1978)** Fundamentos de Geomorfologia. 2ª Edição. Fundação IBGE - Rio de Janeiro
- Piccolo, M., Illich B. e De Paquale, G. (1993)** Application of S.A.R Technique and Direct Wave Measurements to Mining Exploration. 55th. E.A.E.G. Meeting - 7 - 11 June
- Pipkin, B. (1997)** Geology and the Environment. West Publishing Company – ISBN 031402834-X.
- Priest, S. D. (1993)** Discontinuity Analysis for Rock Engineering. Chapman & Hall. London
- Priest, S. D. e Hudson, J. A. (1981)** Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. . Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Vol 18, 183 – 197
- Reddish, D. J. e Yasar, E. (1996)** A New Portable Rock Strength Index Test Based on Specific Energy of Drilling. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Vol 33, Nº 5, 543 – 548
- Romana, M. (1985)** New adjustment ratings for applications of Bieniawski Classification to slopes. Int. Symp. Rock Mechanics, Excavation Mining and Civil Works. ISRM, 59-68
- Rossi Jr., B. (1996)** Aumenta a Importação de Mármore no Brasil. ROCHAS & Equipamentos - nº. 43 - 3º. Trimestre / XI Ano - Lisboa / Portugal - p 06 - 13
- Ruggieri, C. e Dodds Jr., R. H. (1996)** A transferability model for brittle fracture including constraint and ductile tearing effects: a probabilistic approach. International Journal of Fracture - Vol 79, nº 4 - p 309 - 340

- Ruggieri, C., Minami, F. e Toyoda, M. (1995)** A Statistical Approach for Fracture of Brittle Materials Based on the Chain-of-Bundles Model. Transactions of the ASME - June - vol 62 - p 320/328
- Rutqvist, J. e Stephansson, O. (1996)** A Cyclic Hdraulic Jacking Test to Determine the in situ Stress Normal to a Fracture. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Vol 33, Nº 7, 695 – 711
- Savage, W. Z. e Swolfs, H. S. (1986)** Tectonic and gravitational stress in long symmetric ridges and valleys. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Vol 22, 291 - 302
- Savage, W. Z., Swolfs, H. S. e Amadei, B. (1992)** On the State of Stress in the Near-Surface of the Earth's Crust. Pageoph. - vol. 138, Nº. 2, 207 - 228
- Schultz, R. A. (1996)** Relative Scale and the Strength and Deformability of Rock Masses. Journal of Structural Geology, Vol 18, Nº 9 - 1139 /1149
- Sellers, E. e Scheele, F. (1996)** Prediction of Anisotropic Damage in Experiments Simulating Mining in Witwatersrand Quartzite Blocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Vol 33, Nº 7, 659 - 670
- Shah, S. P., Swartz, S. E. e Ouyang, C. (1995)** Fracture Mechanics of Concrete. John Wiley & Sons
- Shen, B. e Stephansson, O. (1993)** Numerical Analysis of Mixed Mode I and Mode II Fracture Propagation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Vol 30, Nº 7, 861 – 867
- Schobbenhaus, C., Queiroz, E. T. de, e Coelho, C. E. S. (1991)** Principais Depósitos Minerais do Brasil. v 4 - Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, Brasília
- Schobbenhaus, C. (1991)** Geologia do Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM – Brasília
- Simão, J.A.R.S. e Silva, Z.C.G. (1996)** Composição Mineral e Alteração de Rochas Silicatadas. O "Granito" Negro de Angola. Um Caso em Estudo.

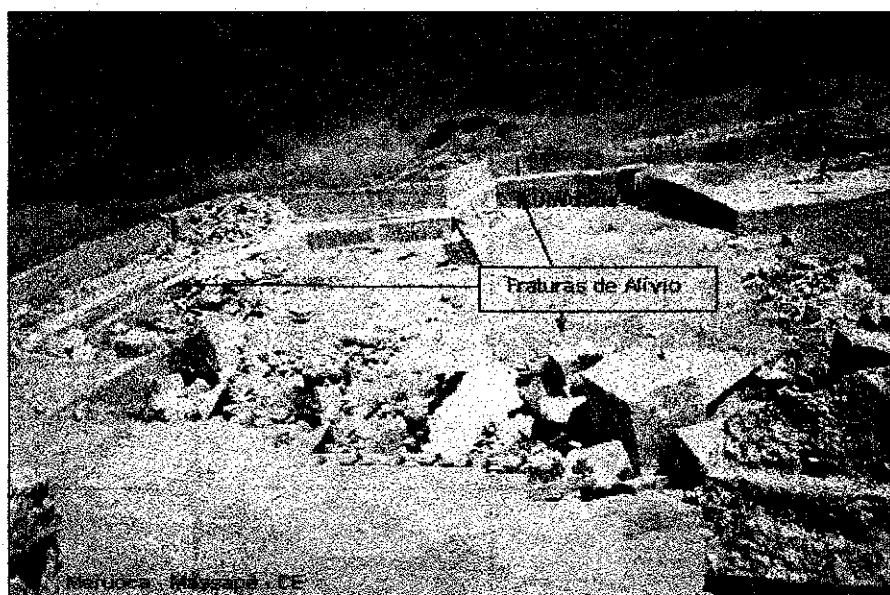
- Simmons, G. e Richter D.** (1993) Cracks in Building Stone. Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Vol 30, Nº 7, 1553-1557
- Stacey, T. R.** (1982) Contribution to the mechanism of core discing. J. South Africa Inst. Mining and Metallurgy, 269-274
- Stephansson, O., Ljunggren, C. e Jin, L.** (1991) Stress measurements and tectonics implications for Fennoscandia. Tectonophysics, Vol. 189, 317-322
- Swenson, D. e James, M.** (1996) A Crack Propagation Simulator for Plane Layered Structures. FRANC2D/L - Version 1.3
- Terzaghi, K.** (1946) Rock defects and loads on tunnel support. Editor R. V. Proctor and T. White.
- Toshioka, T., Tsuchida, T. e Sasahara, K.** (1995) Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes. Journal of Applied Geophysics - Vol 33 - p 119 – 124
- Vale, E.** (1997) Aspectos legais e institucionais do setor de rochas ornamentais. Instituto Euvaldo Lodi. Vol. 1
- Voight, B.** (1966) Interpretation of in-situ stress measurements. 1st Congress Int. Soc. of Rock Mechanics. Vol. III, 332-348
- Wickham, G. E., Tiedemann, H. R. e Skinner, E. H.** (1972) Support Determination Based on Geologic Predictions. Procedure of Rapid Excavation and Tunneling Conference. AIME, 43-64
- Wickham, G. E., Tiedemann, H. R. e Skinner, E. H.** (1974) Ground Support Prediction Model: RSR Concept. Procedure of Rapid Excavation and Tunneling Conference. AIME, 691-707
- Williams, H., Turner, F.J. e Gilbert, C.M.** (1970) – Petrografia: Uma Introdução ao Estudo das Rochas em Seções Delgadas. Ed. Polígono – São Paulo.

- Wong, H. C., Chau, K.T. e Wang P. (1996)** Microcracking and Grain Size Effect in Yuen Long Marbles. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech.* Vol 33, N° 5, 478 - 485
- Xueli, H. e Tzuchiang, W. (1996)** A General Method for Solving the Problem of Both Open and Closed Multiple Cracks. *International Journal of Fracture* - Vol 79, n° 4 - p R69 -R72
- Zhang, Q. e Yun-bin, M. (1996)** An Expert System for Classification of Rock Masses. *Mine Planning and Equipment Selection* - 283-288 - ISBN 90 6191 835 9
- Zoback et al. (1989)** Global patterns of tectonics stress. *Nature*. Vol. 341, 291-298

APÊNDICE - REGISTRO DE ALGUMAS OBSERVAÇÕES EM ÁREAS VISITADAS

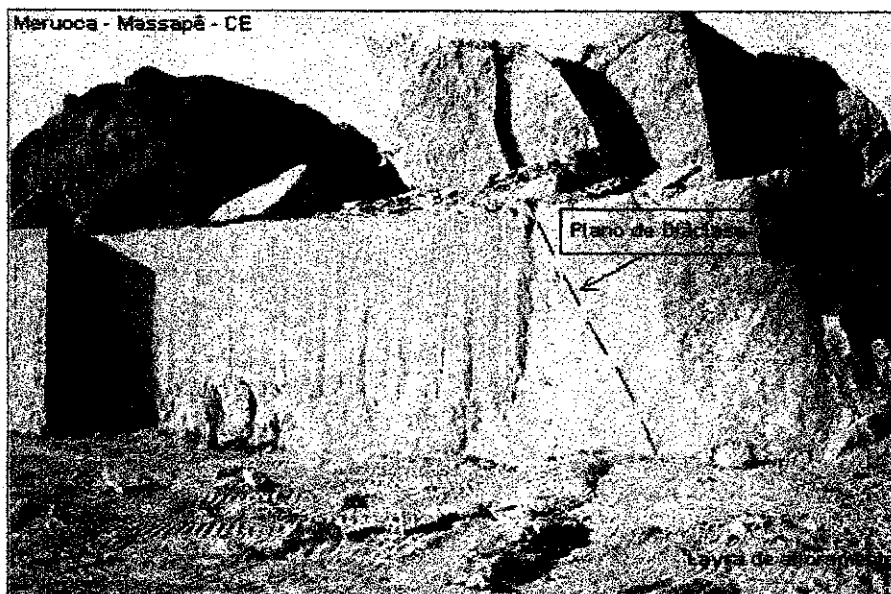
Dentre as oito áreas visitadas destacam-se algumas feições que podem subsidiar a previsão de situações adversas, ou servir de base para planejamento da exploração.

1. Serra da Meruoca - CE -



A-1 - Lavra do granito denominado Verde Meruoca realizada próxima a um vale, onde nos foi informado sobre propagação de fraturas durante a exploração. Foram observados dois planos sub-horizontais de alívio, com superfícies levemente alteradas, sem preenchimento, uma delas úmida, ficando definida sua preexistência aos trabalhos de lavra. Esta é procedida em duas praças semi-

horizontais que acompanham as fraturas de alívio. É utilizada tecnologia mista com corte lateral a chama e o principal com explosivos.

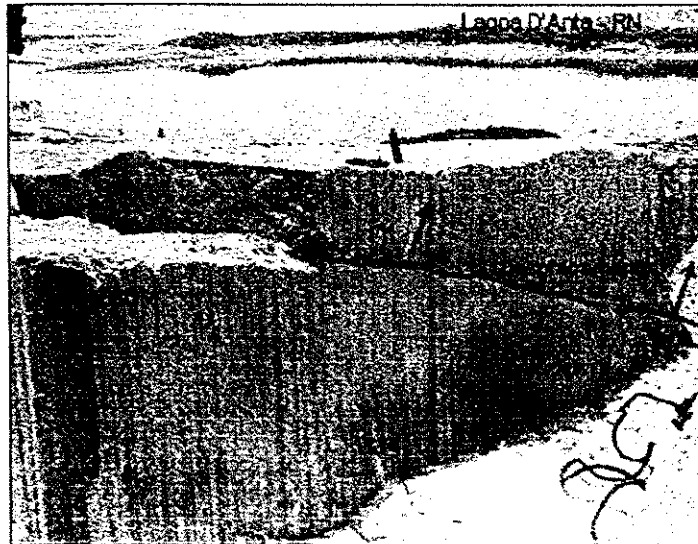


A-2 - Lavra de matacão (Granito Meruoca Clássico) que não apresenta alterações nas direções de orientação da rocha. Utiliza-se desmonte com explosivos e não há informação sobre problemas de trincas e fraturas.

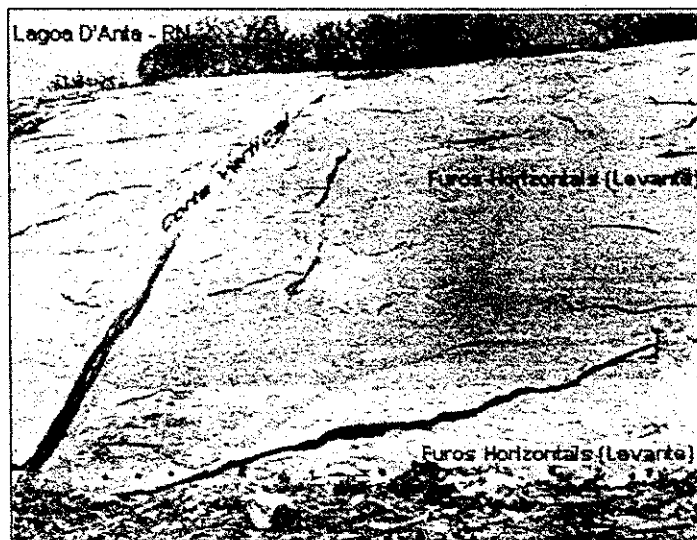


A-3 - Lavra de um campo de matacões, com dimensões variando de 2 a 10 m (Verde Ventura), havendo blocos dispostos sobre o maciço rochoso, alguns empilhados e com planos aproximadamente triortogonais.

2. Lagoa D'Anta - RN



A-5 - A propagação da fratura ocorreu em forma de deslocamento, a partir do alívio de tensões residuais em planos paralelos à foliação da rocha.

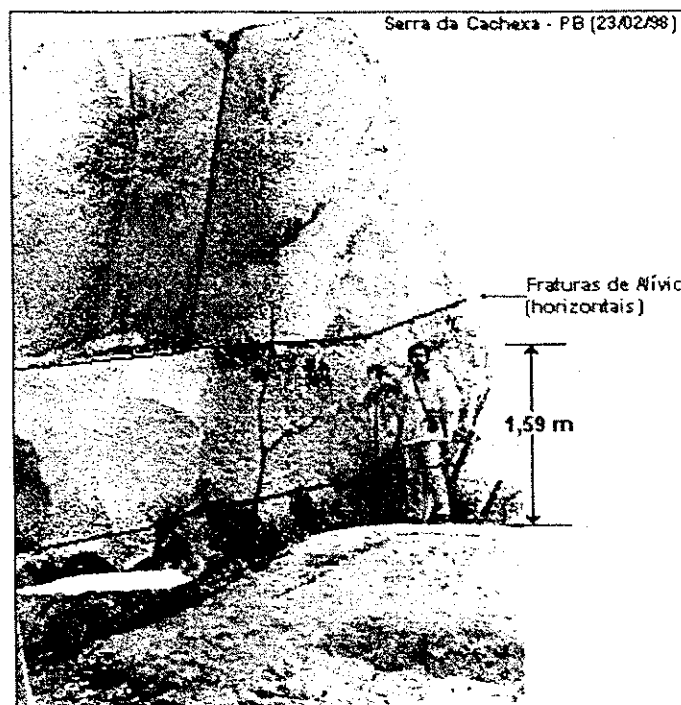


A-6 - Vê-se a tentativa de horizontalizar a praça, através da execução de furos que formam planos discordantes com as condições geomecânicas da rocha.

3. Cacerengo - PB

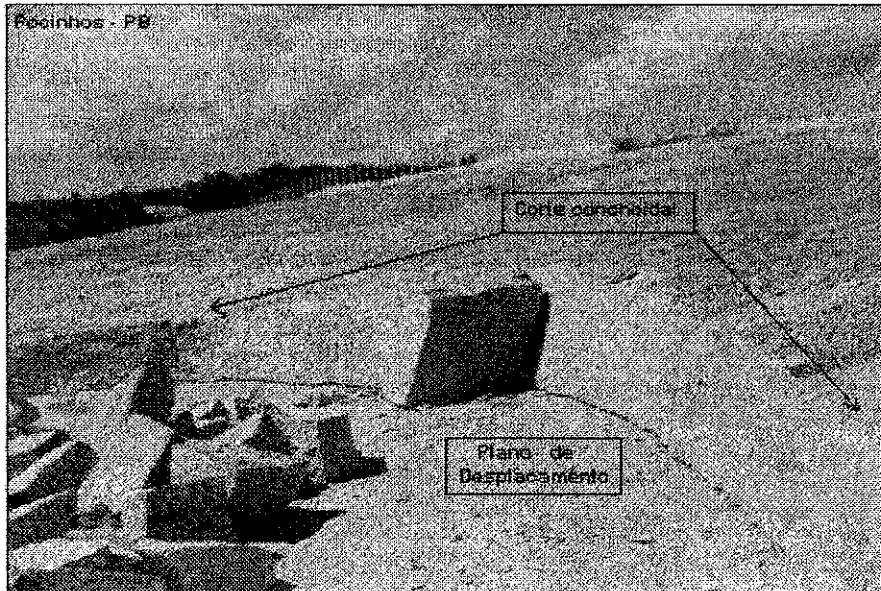


A-7 - A foto nos sugere que, dentro destas condições, os matacões são indicadores dos sistemas de juntas, havendo possibilidade de se estimar seu espaçamento a partir das faces dos matacões.



A-8 - Nesta outra evidencia-se a fratura de alívio existente em um matacão retirado por escorregamento.

1. Pocinhos - PB

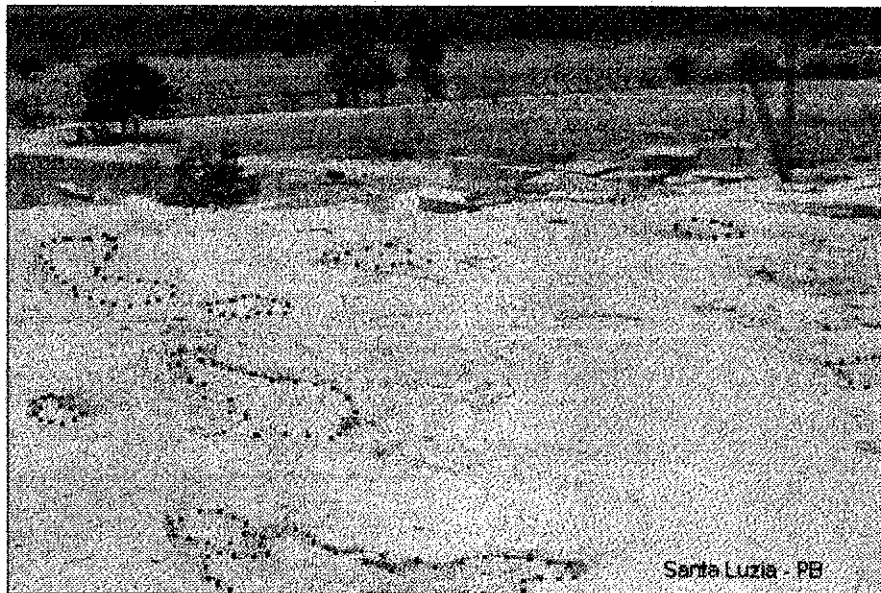


A-9 - A rocha apresenta boa isotropia, permitindo corte conchoidal. Foram observados planos de esfoliação dois locais distintos.

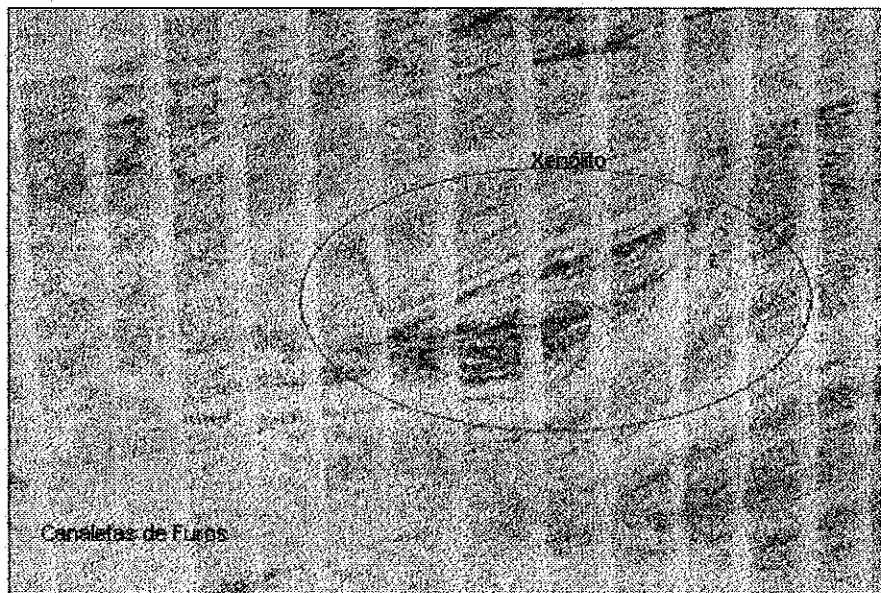


A-10 - Em outro local vê-se regiões de veios decimétricos que orientam a formação de sulcos de erosão. Estas feições podem auxiliar a orientação do planejamento da lavra.

2. Santa Luzia - PB

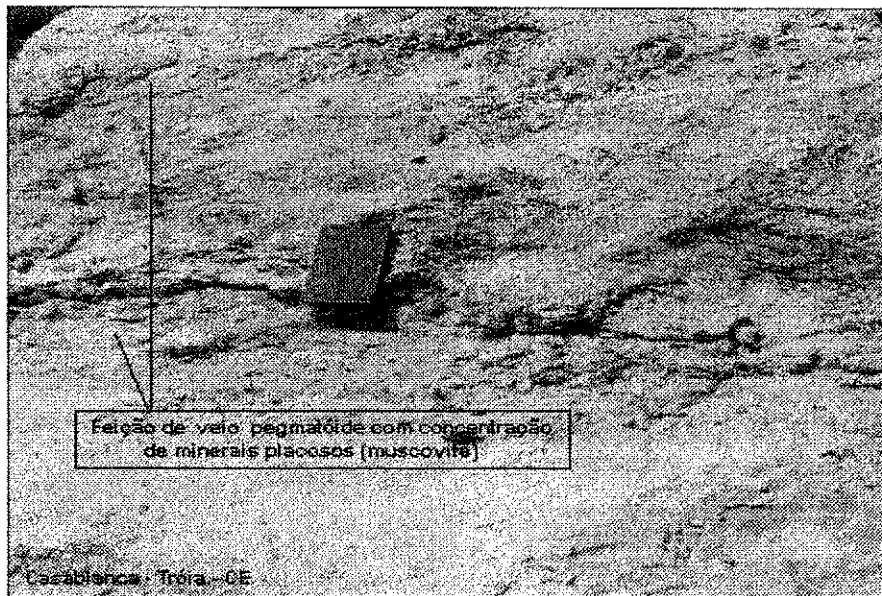


A-11 - Afloramento de migmatito que apresenta inclusões de biotita-xisto dispersas em superfície e nos cortes. . Também no afloramento vê-se superfícies de alterações de minerais.

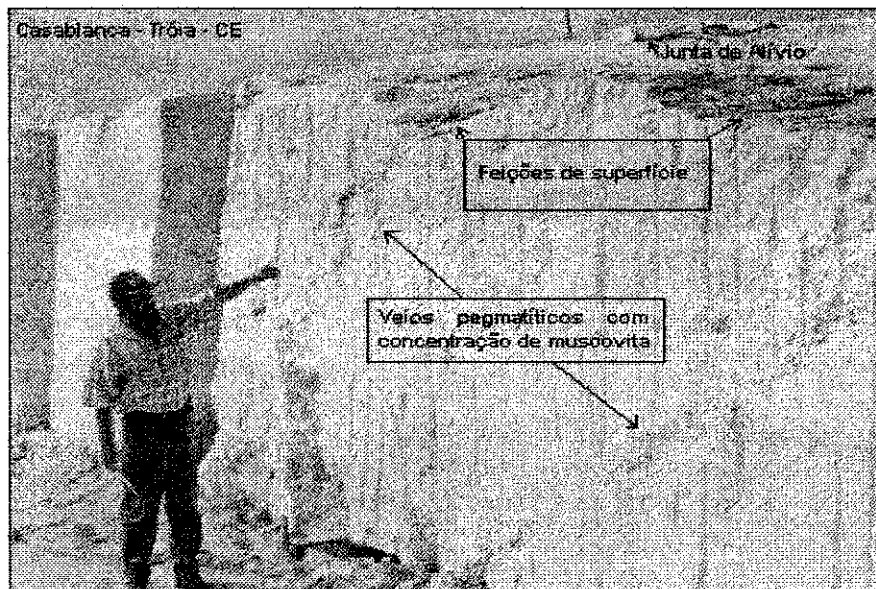


A-12 - A existência destes xenólitos tem conduzido a elevadas perdas na lavra, pois a biotita é destacável ao contato manual.

3. Pedra Branca – CE

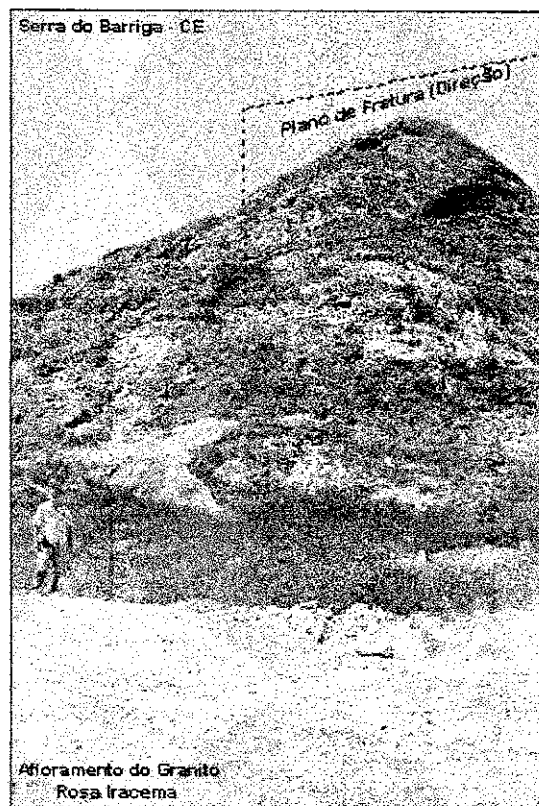


A-13 - Esta foto destaca um detalhe da feição ondulada de superfície, produzida pela interseção dos planos de afloramento de veio rico em muscovita e da superfície.

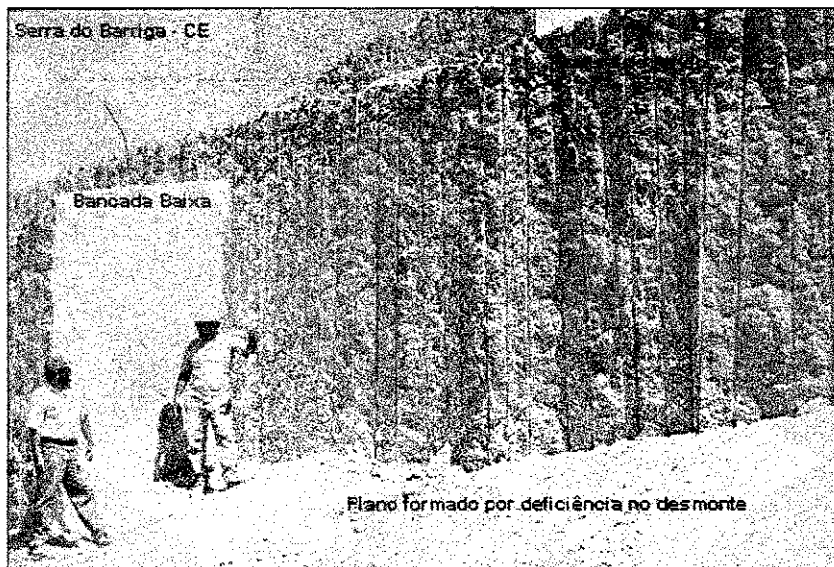


A-14 Corte, numa das quatro praças de exploração, onde são evidenciados dois veios paralelos; a feição da superfície e resquício de plano de fratura de alívio.

7. Serra do Barriga – CE

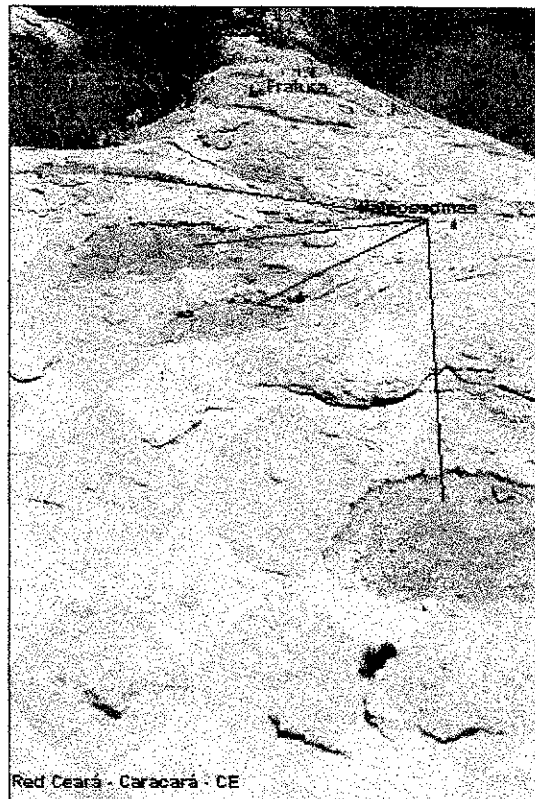


A-15 - A Foto procura dar uma idéia da superfície suave do matacão que está sendo lavrado, tendo ao fundo a Serra do Barriga e plano de fratura existente.

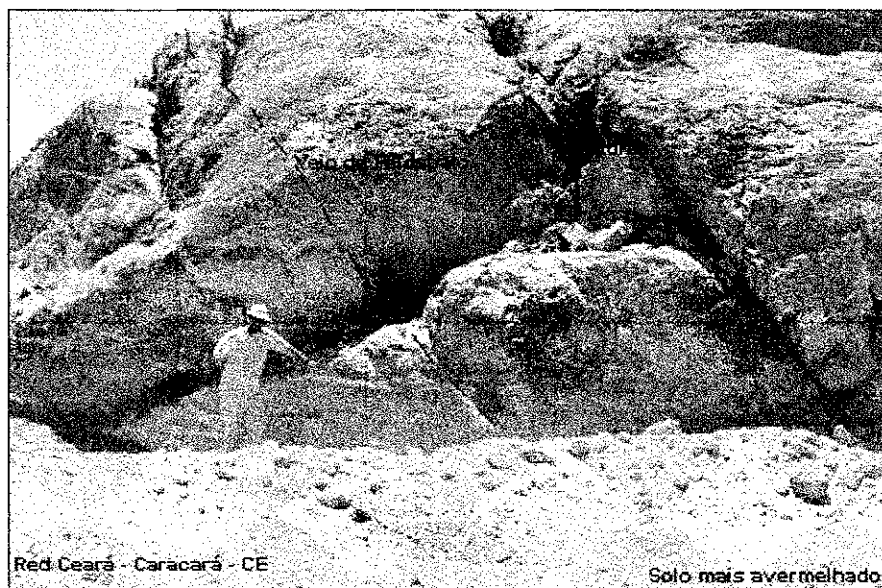


A-16 - Nesta outra evidencia-se problemas gerados por deficiência operacional (formação de repé devido a êrros na furação) e uma superfície de alívio.

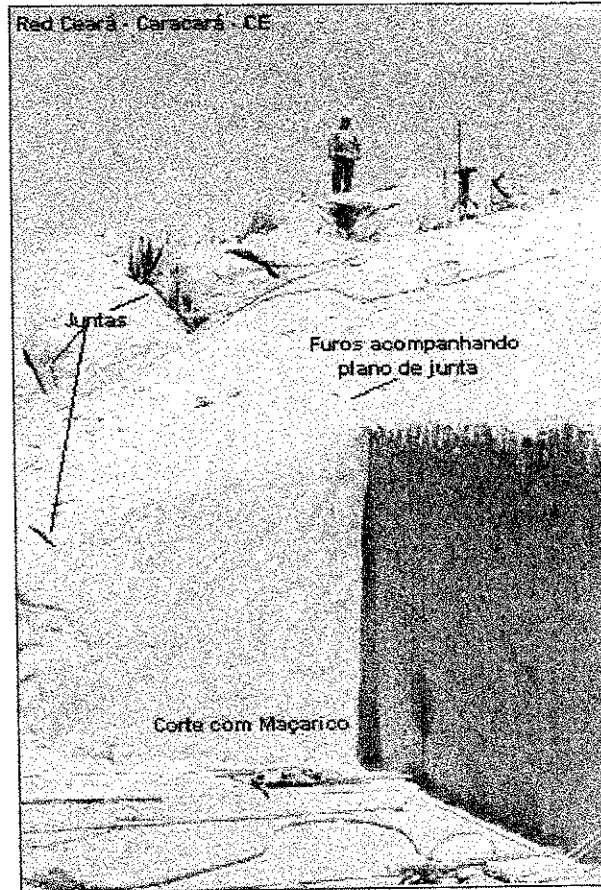
8. Caracará – CE



A-17 - A Foto dá uma idéia sobre a forma do corpo de migmatito neste setor, e sua complexidade para planejamento devido aos bolsões de paleossoma e os sistemas de descontinuidades.



A-18 - Nesta outra evidencia-se as fraturas, veios de feldspato e o solo típico.



A-19 - Corte efetuado com maçarico e vegetação evidenciando as direções dos planos de partição da rocha.