



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MÁRMORES ORNAMENTAIS DE MINAS GERAIS, NOVAS
TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO E PROSPECÇÃO
PEDREIRA DO CUMBI – CACHOEIRA DO CAMPO**

AUTOR Frederico Nascimento Mendes Bezerra

ORIENTAÇÃO Prof. Dr. Antônio Gilberto Costa

Nº 37

BELO HORIZONTE

DATA (20/04/1999)

**MÁRMORES ORNAMENTAIS DE MINAS GERAIS,
NOVAS TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO E PROSPECÇÃO
PEDREIRA DO CUMBI – CACHOEIRA DO CAMPO**

**MESTRADO
GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA**

Geol. Frederico Nascimento Mendes Bezerra

**ORIENTADORES: Prof. Dr. Antônio Gilberto Costa
 Prof. Msc. Paulo Roberto Antunes Aranha**

B574m Bezerra, Frederico Nascimento Mendes

Mármore ornamentais de Minas Gerais, novas técnicas de caracterização e prospecção: Pedreira do Cumbi – Cachoeira do Campo/ Frederico Nascimento Mendes Bezerra. – Belo Horizonte, UFMG, 1999.

Xii, 141f.: Il., color. graf.; tabs.; mapas

Orientador: Prof. Dr. Antônio Gilberto Costa

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) / Instituto de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Geologia.

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

1. Rochas ornamentais e de revestimento 2. Cachoeira do Campo
3. Geologia Econômica e Aplicada – Dissertação
- I. Universidade Federal de Minas Gerais II. Título.

CDU: 552.4

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível com o apoio técnico e financeiro da Mineração Minas Pérola, na pessoa do Sr. Carlos Vighini, do CNPq e da Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Geociências / Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa.

Agradeço também aos que influíram na minha decisão de *trilhar* pelo rumo das rochas ornamentais – meu orientador Antônio Gilberto Costa e meus amigos Marcelo Gazire e Antônio Egídeo.

Aos professores que colaboraram neste trabalho e na minha formação acadêmica e, em especial, aos meus orientadores Antônio Gilberto Costa e Paulo Roberto Antunes Aranha.

Ao Geólogo Cid Chiodi, pela contribuição em discussões e no fornecimento de trabalhos.

Aos colegas de mestrado, pelo companheirismo e trocas de experiência, que estão vencendo juntos (mais uma vez), uma nova etapa em nossas vidas profissional e pessoal. Um agradecimento especial à Sirley, que colaborou nas discussões e na revisão deste trabalho.

Aos novos companheiros do curso de especialização, que devido ao caráter multidisciplinar de nossas formações, contribuíram para alcançar uma visão mais ampla do setor das rochas ornamentais.

Aos amigos da graduação, que ajudaram na preparação de amostras.

À minha família e à Cris, pela disponibilidade e apoio em todos os momentos.

SUMÁRIO

RESUMO	11
<i>ABSTRACT</i>	12
PALAVRAS-CHAVE	12
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 - LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO À PEDREIRA DO CUMBI	1
1.2 - ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS	2
1.3 – FISIOGRAFIA	3
2 - OBJETIVOS E METODOLOGIA	4
2.1 – OBJETIVOS	4
2.2 - MÉTODOS EMPREGADOS	6
2.3 - FASES DE TRABALHO	7
3 – ASPECTOS GERAIS DO SETOR DE ROCHAS ORNAMENTAIS	7
3.1 – CONCEITO DE ROCHA ORNAMENTAL	7
3.2 – POTENCIAL GEOLÓGICO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS EM MINAS GERAIS ...	11
3.3 – PROCESSOS DE EXTRAÇÃO	18
3.4 - ETAPAS DO BENEFICIAMENTO	22
3.5 - MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO SEGUNDO A APLICAÇÃO	26
3.6 - TÉCNICAS DE APLICAÇÃO	37
4 – ASPECTOS GEOLÓGICOS	42
4.1 – ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS: QUADRILÁTERO FERRÍFERO	42
4.1.1 – ESTRATIGRAFIA E PETROGRAFIA	45
4.1.2 - GEOLOGIA ESTRUTURAL	48
4.1.3 – METAMORFISMO	50
4.2 – ASPECTOS GEOLÓGICOS LOCAIS: ARREDORES DA JAZIDA DO CUMBI	51
4.2.1 - ESTRATIGRAFIA E PETROGRAFIA	51
4.2.2 - GEOLOGIA ESTRUTURAL	56
4.2.3 - GEOLOGIA ECONÔMICA	63
5 - JAZIDA DE DOLOMITO DO CUMBI	64
5.1 - CARACTERÍSTICAS DA ROCHA	66
5.2 – MÉTODOS DE EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO	68
5.3 – IMPACTOS AMBIENTAIS	73
6 – METODOLOGIA PROSPECTIVA E CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO DOLOMITO DO CUMBI	75
6.1 – PROSPECÇÃO COM O USO DO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (<i>GPR - GROUND PENETRATING RADAR</i>)	75
6.1.1 - DESCRIÇÃO DO MÉTODO E DO EQUIPAMENTO	75
6.1.2 – OBJETIVOS	77
6.1.3 - AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS	77
6.1.4 - INTERPRETAÇÃO DOS PERFIS GEOFÍSICOS EXECUTADOS NO CUMBI	80
6.2 – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	97
6.2.1 – DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	97
6.2.2 - CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA	99
6.2.3 – DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES FÍSICOS	101
6.2.4 – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ÁCIDO SULFUROSO	105
7 - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O DOLOMITO DO CUMBI E COMPARAÇÕES COM OS DADOS DISPONÍVEIS PARA OUTRAS ROCHAS	108
8 – CONCLUSÕES	114
9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
ANEXO I	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa de localização e acesso do distrito de Cachoeira do Campo e da pedreira do Cumbi. Base topográfica: Folha Ouro Preto - IBGE; escala original 1:50.000 (SF-23-X-A-III-4); 1977.

Figura 3.1: Elaboração de blocos com o auxílio de esferas de dolerito (tumba de Tebas, Egito, 1500 a.C.).

Figura 3.2: Transporte de uma escultura de toro (baixo relevo em rocha procedente do Palácio de Nínive, século VII a.C.).

Figura 3.3: Croquis da distribuição das pedreiras ativas no estado e tipologia das rochas extraídas. (FONTE: www.comig.com.br)

Figura 3.4: Croquis da distribuição das pedreiras de mármore ativas (pontos laranjas) no estado. (FONTE: www.comig.com.br)

Figura 3.5: Tipos de lavra de rocha ornamental

Figura 3.6: Tipos de lavra em degraus (modificado de Chiodi, 1995).

Figura 3.7: Perfil de um dispositivo de fixação de placa em fachada aerada (Flain, 1995).

Figura 4.1: Mapa geológico-estrutural simplificado do Quadrilátero Ferrífero.

Figura 4.2: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.

Figura 4.3: Variação do ambiente de formação em função do padrão de cor dos dolomitos do Sinclinal Dom Bosco (modif. Pires & Fraga;1989).

Figura 4.4: Diagrama de contorno da foliação da área do Cumbi (n=224)

Figura 4.5: Eixos de dobras (n=24) representados no diagrama em roseta (seta indica a direção média do eixo) e através de pólos (círculo verde indica a média dos valores=61/29).

Figuras 4.6: Lineação de crenulação (n=7)

Figuras 4.7: Lineação mineral (n=9).

Figura 4.8: Diagrama de contorno de fraturas da área do Cumbi (n=82).

Figura 6.1: Localização dos perfis de *GPR*.

Figura 6.2: Perfil 6 (200 MHz, S-N, 22m)

Figura 6.3: Perfil 3 (100 MHz, N-S, 24m)

Figura 6.4: Perfil 2 (100 MHz, N-S, 74m)

Figura 6.5: Perfil 7 (100 MHz, NE-SW, 41m)

Figura 6.6: Perfil 8.1 (100 MHz, NE-SW, 50m)

Figura 6.7: Perfil 9.2 (100 MHz, horizontal, N-S, 12m)

Figura 6.8: Perfil 11 (100 MHz, NE-SW, 50m)

Figura 6.9: Perfil 12 (100 MHz, NW-SE, 31m)

Figura 7.1: Comparação relativa da perda de resistência para o mármore e o granito ao longo do tempo (Stecich, 1990 *in* Flain, 1995).

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Foto 3.1: Aqueduto romano em Segóvia (Espanha), construído em blocos de granito encaixados há 2.000 anos.

Foto 3.2: Lavra desenvolvida em degraus múltiplos curtos em Alicante.

Foto 3.3: Multiserra na linha de ladrilhos padronizados (Cumbi).

Foto 3.4: Talha-blocos, usado no aproveitamento de blocos menores e não uniformes (Esteve & Mañez, Alicante, Espanha).

Fotos 3.5: Processo de serragem em um tear, usando uma mistura de granalha, cal hidratada e água feita com circulação em sistema fechado; vistas frontal e posterior (pedreira do Cumbi).

Foto 3.6: Travertino submetido à tensões internas devido a cristalização de sais em sua matriz (LOEMCO-Espanha)

Foto 3.7: CP submetidos ao ataque ácido: aurora pérola (dir.) e jacarandá (esq.) – Lab. CPMTIC-IGC-UFMG.

Foto 3.8: Através de pesos e abrasivos, ocorre o desgaste dos CP, que é seguida medido e avaliado (LOEMCO).

Foto 3.9: À direita vê-se a prensa (com tela de proteção) e à esquerda o sistema DATAC e computador com placa e programa de aquisição de dados (Lab. Mecânica Rocas –UPM).

Foto 3.10: Câmara automática de congelamento e degelo (LOEMCO).

Foto 3.11: CP rompido em ensaio de flexão - carregamento por 4 pontos (LOEMCO).

Foto 3.12: Nesta fachada (tipo Granito Verde Ubatuba – charnockito) ocorrem eflorescência, mudança de coloração, alteração do hiperstênio (mineral de alta temperatura de formação) e manchamento pela oxidação dos elementos metálicos fixadores.

Foto 3.13: Dispositivo metálico de retenção na parte superior da chapa.

Foto 3.14: Conjunto de *inserts* na parte inferior de placa pétrea, mostrando ainda o suporte impermeabilizado.

Foto 3.15: Juntas entre placas, que servem para absorver deformações e isolar o sistema.

Foto 4.1: Lentes de dolomito na principal frente de lavra (Lapa). Na parte superior esquerda observa-se um contato difuso entre o filito cinza-azulado e a lente dolomítica.

Foto 4.2: Dolomitos claros intercalados com filito cinza (sul Lapa).

Foto 4.3: Vista de seção basal de estromatólitos de colunas largas, cortados por veios de calcita, envoltos por um dolomito apresentando pequenos intraclastos.

Foto 4.4: Reprodução em escala macroscópica do condicionamento estrutural de amostras analisadas ao microscópio.

Foto 4.5: Relações de contato estrutural entre o filito e o dolomito, com dobras apertadas envolvendo quase todas as lentes de dolomito.

Foto 4.6: Direções de encavernamento associadas a famílias de fraturas. Afloramento tem aproximadamente 30m de altura e se localiza atrás da serraria.

Foto 4.7 : Dobra em filito ferruginoso, com clivagem plano axial penetrativa. Flancos tem atitudes médias de $S_n/S_0=130/80;140/45$, eixo $52/40$.

Foto 5.1: Nome comercial dos litotipos extraídos da jazida do Cumbi. (FONTE: Catálogo Minas Pérola)

Foto 5.2: Frente de lavra Lapa, em degraus múltiplos largos.

Foto 5.3: Carregamento de bloco em “pau de carga”.

Foto 5.4: Corte com fio diamantado em plano vertical.

Foto 5.5: Troca de elemento abrasivo em politriz automática.

Foto 5.6: Trinca ao longo de fina camada de sericita, logo após o processo de polimento.

Foto 5.7: Barragens primária e secundária (vista em segundo plano) de retenção de finos provenientes do processo de beneficiamento.

Foto 6.1: Bancada onde foram realizados os perfis 3 (N-S) e 6 (S-N). As fraturas abertas se prolongam em profundidade, gerando um padrão de reflexão hiperbólico.

Foto 6.2: Padrão de fraturamento na bancada inferior à seção de GPR (Lapa).

Foto 6.3: Afloramento no mesmo nível da bancada estudada, mostrando fraturas abertas e dobras fechadas.

Foto 6.4: Lente de dolomito claro com fraturas persistentes, onde foi feito o perfil horizontal (9-2).

Foto 6.5: Local de execução do perfil 11 e equipamento *GPR*.

Foto 6.6: Local de execução do perfil 12. Vê-se ao fundo contato da lente de dolomito do Cumbi do Meio com o filito.

Foto 6.7: Corpos de prova do dolomito Jacarandá (dimensões 7x7x2cm).

Foto 6.8: Recipiente fechado com 4000cm³ de volume onde é realizado o teste. As amostras são isoladas do ácido por uma plataforma de plástico resistente.

Foto 6.9: Detalhe do dolomito Jacarandá antes do teste com vapores de ácido.

Foto 6.10: Comparação do desgaste com vapores de SO₂ da face não polida e polida do dolomito Jacarandá.

Foto 7.1: Corpos de prova de dolomito submetidos a ataque ácido.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Distribuição das pedreiras cadastradas no “Diagnóstico do setor de rochas ornamentais e de revestimento no estado de Minas Gerais” (COMIG, 1998).

Tabela 3.2: Ocorrências de rochas ornamentais em Minas Gerais e seus domínios geológicos e geocronológicos. (modificado de COMIG, 1998)

Tabela 3.3: Produção estimada de rochas ornamentais no estado. (FONTE: COMIG, 1998)

Tabela 3.4: Produção e comercialização de rochas ornamentais no Brasil. (FONTE: DNPM-Sumário Mineral de Rochas Ornamentais e de Revestimento, 1997-inédito *in* COMIG, 1998)

Tabela 3.5: Oferta mundial de rochas ornamentais e de revestimento. (FONTE: DNPM-Sumário Mineral de Rochas Ornamentais e de Revestimento, 1997-inédito *in* COMIG, 1998)

Tabela 3.6: Tipos de ensaios e necessidades de caracterização de acordo com seu uso.

Tabela 3.7: Recomendações de parâmetros físicos limite para mármore dolomíticos e granitos.

Tabela 6.1: Proporção relativa entre calcita e dolomita para a caracterização de calcários e dolomitos (Carrozi, 1960 *in* Limaverde, 1987).

Tabela 6.2: Determinação de índices físicos no dolomito aurora pérola.

Tabela 6.3: Determinação de índices físicos no dolomito jacarandá.

Tabela 6.4: Resumo dos ensaios de absorção e porosidade nos litotipos da Pedreira do Cumbi.

Tabela 6.5: Resumo dos ensaios de determinação da massa específica aparente.

Tabela 6.6: Perda de massa dos CP submetidos ao ensaio de ataque ácido.

Tabela 7.1 : Quadro comparativo dos valores de porosidade e absorção aparente dos litotipos da Pedreira do Cumbi e outros mármore. FONTES: Frazão e Farjallat (1995); Oliveira (1998); Esteve & Mañez; IPT (1982)

Tabela 7.2: Recomendações de parâmetros físicos mínimos para mármore dolomíticos e granitos. FONTE: ASTM C503 e C615

Tabela 7.3: Parâmetros tecnológicos médios de alguns mármore brasileiros (modificado de Oliveira; 1998 e Frazão e Farjallat; 1995).

Tabela 7.4: Perda de massa dos CP submetidos ao ensaio de ataque ácido.

Tabela 7.5: Parâmetros tecnológicos médios de alguns granitos brasileiros (modificado de Frazão e Farjallat; 1995).

Tabela 7.6: Características tecnológicas de ardósias espanholas segundo normas UNE (Rodríguez *et al.*, 1997).

Tabela 7.7: Índices físicos para quartzitos e limites fixados pela ASTM. FONTES: Andrade e Oliveira (no prelo), Costa (1998); Oliveira (1998).

Tabela 8.1: Durabilidade média (em anos) de materiais pétreos, metais e madeiras (Barros, 1998).

RESUMO

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida como parte do programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Foram estudados os corpos dolomíticos da jazida do Cumbi (município de Ouro Preto-MG), que são extraídos pela Mineração Minas Pérola para aplicação como rocha ornamental, dando-se ênfase para sua caracterização tecnológica e relação estrutural com os filitos adjacentes. Para o dimensionamento destas lentes e suas relações geométricas com os filitos, foi testado uma ferramenta para prospecção e exploração, que é a técnica geofísica *GPR* (*Ground Penetrating Radar*).

Além disso, amostras da jazida foram submetidas a exames petrográficos, índices físicos, ataque ácido e cristalização de sais, para posterior comparação com dados de outras rochas carbonáticas. Utilizou-se no processo de caracterização tecnológica normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), além de adaptações de procedimentos usados na Espanha pelo LOEMCO (Laboratório Oficial para Ensayo de Materiales de Construcción). Foi traçado um pequeno painel do setor e de sua potencialidade em Minas Gerais, além da evolução histórica do uso e aplicação da pedra nas construções.

Os principais resultados obtidos foram a proposição de uma classificação para as rochas ornamentais e de revestimento quanto às suas características técnicas, além de novos procedimentos para os ensaios de índices físicos e ataque ácido. O *GPR* forneceu informações importantes de persistência de descontinuidades, além de detectar feições de dissolução carbonática.

Com os dados obtidos foi possível atestar a destacada qualidade do dolomito do Cumbi em relação a outras rochas carbonáticas.

ABSTRACT

This thesis was developed as part of the Geology Master Program, at Geoscience Institute of Universidade Federal de Minas Gerais. It were studied dolomite bodies at Cumbi quarry (located in Ouro Preto-MG-Brazil), which are extracted by Mineração Minas Pérola for dimension stone use. Special emphasis were taken for its technological characterization and structural relation with the adjacent phyllite. For dimension and geometrical relationship among those bodies, it was tested a tool for prospecting and exploitation, which is the geophysical technique GPR (Ground Penetrating Radar).

Beyond this, quarry samples were submitted to petrographic and technological characterization tests. Data obtained were compared with other carbonatic rocks. It was followed Brazilian normalization committee (ABNT) and Spanish LOEMCO procedures' adaptations. It was compiled a small overview of dimension stone market and its potentiality in Minas Gerais – Brazil and also the historical evolution of stone usage in constructions.

The main results obtained were a classification proposal, based in dimension stone technical characteristics, and also new lab procedures for physical index and acid attack tests. GPR supplied important discontinuity persistency information and detected carbonatic dissolution spots.

Analyzing data obtained, it was possible to attest Cumbi's dolomite quality compared to other carbonatic rocks.

PALAVRAS-CHAVE

Cachoeira do Campo-MG, rochas ornamentais e de revestimento, dolomito, GPR, ensaios tecnológicos.

1 – INTRODUÇÃO

Com o apoio da Mineração Minas Pérola, CNPq e UFMG, foram estudados os corpos dolomíticos da jazida do Cumbi (município de Ouro Preto-MG), extraídos para aplicação como rocha ornamental. Este trabalho surgiu da necessidade de se atualizar e adaptar novas técnicas e métodos de prospecção e caracterização em uso ou implantação, para as particularidades da mineração de rochas ornamentais.

Foi dada ênfase tanto à caracterização tecnológica dos corpos dolomíticos quanto às suas relações estruturais com os filitos adjacentes (através de mapeamento e uso do *GPR*), dimensionamento das lentes e caracterização geológica-petrográfica. Foram ainda enfocados aspectos relacionados à produção (economia mineral, técnicas de extração e beneficiamento), caracterização, aplicação e, por fim, apresentadas novas propostas e procedimentos para a classificação de rochas ornamentais.

1.1 - LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO À PEDREIRA DO CUMBI

Cachoeira do Campo é um distrito da cidade de Ouro Preto-MG e se encontra a 69 km de Belo Horizonte. O acesso a partir da capital é através da BR-040 (sentido RJ) até o trevo para Ouro Preto, onde segue-se pela rodovia BR-356. As cidades de Itabirito e Ouro Preto distam aproximadamente 19km de Cachoeira do Campo (**figura 1.1**). A distância ferroviária de Belo Horizonte a Ouro Preto é de 150 km.

Para chegar à pedreira estudada, pertencente à Mineração Minas Pérola e distante aproximadamente 12 km de Cachoeira do Campo, deve-se usar uma estrada secundária não pavimentada. No sentido Belo Horizonte-Ouro Preto, o início desta estrada se situa à direita, antes da ponte sobre o Córrego Maracujá. Outro ponto de referência é o Colégio Dom Bosco, que em 1779 abrigava o antigo Quartel dos Dragões. No sentido Ouro Preto, o referido colégio se situa depois da ponte supracitada. O caminho até a pedreira é sinalizado por placas indicando a direção “Guarneri”, que é o nome da família detentora dos direitos minerários da área.

1.2 - ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS

A economia de Cachoeira do Campo está concentrada principalmente no turismo, na indústria siderúrgica e na mineração e beneficiamento de rochas ornamentais (dolomito e esteatito) e industriais (brita). Há uma pequena atividade agrícola, de pecuária, comércio e garimpo de topázio imperial.

A população de Ouro Preto é de 66.134 habitantes (censo IBGE-1994), sendo aproximadamente 75% dela urbana. O distrito de Cachoeira do Campo conta com escola de 1º grau e infraestrutura urbana básica, tendo como cidades-referência Ouro Preto, Itabirito e Belo Horizonte.

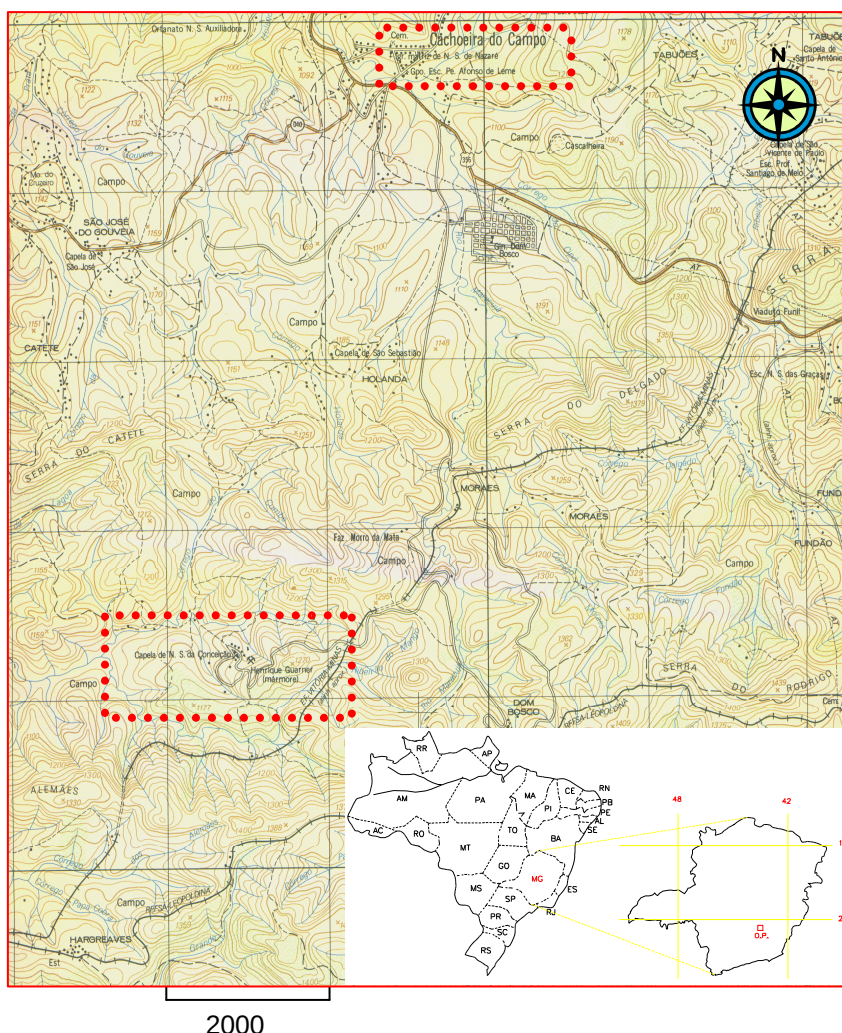


Figura 1.1: Mapa de localização e acesso do distrito de Cachoeira do Campo e da pedreira do Cumbi. Base topográfica: Folha Ouro Preto - IBGE; escala original 1:50.000 (SF-23-X-A-III-4); 1977.

1.3 – FISIOGRAFIA

O município de Ouro Preto tem uma área de 1.274 km² e faz parte do Planalto de Campos das Vertentes, onde se desenvolveram florestas estacionais semidecíduais, refúgios ecológicos campestres montano e alto-montano. Elas se encontram bastante degradadas pela extração mineral e ocupação humana, tendo sido substituídas por formações secundárias, pastagens e reflorestamentos.

A temperatura média anual é de 17°C, com as médias máximas e mínimas entre 22°C e 13°C. O índice pluviométrico médio anual é de 2.018mm.

A rede de drenagem tem padrão dendrítico, apresentando trechos retilíneos controlados por falhas e fraturas. Os principais rios que cortam a região são o Rio das Velhas e o Ribeirão Funil, pertencentes à Bacia do Rio São Francisco.

A altitude máxima da região encontra-se na divisa com o município de Santa Bárbara (1.891m) e a mínima na foz do Córrego Maracujá (989m). O tipo de relevo de cristas contínuas e extensas predomina na área, onde ocorre uma dissecação diferencial, típica de áreas mais elevadas e ligadas diretamente a falhas (normais, no caso da Serra de Ouro Branco). Este tipo de relevo forma extensos paredões, com alguns apresentando formas tabulares com drenagem pouco expressiva, conservando aplanadas parte dos seus topos, que na Serra de Ouro Branco são antigas superfícies de aplanamento alçadas por basculamento de blocos (Projeto Radam Brasil, 1983).

A topografia é plana em 5% da área, ondulada em 40% e montanhosa nos 55% restantes da região.

Nos arredores da cidade de Cachoeira do Campo, ocorre sobre as rochas granitóides do Complexo do Bação, um intenso processo de voçorocamento nos solos originados a partir destas rochas (Parzanese, 1991).

Na área da pedreira a altitude varia entre cerca de 1.000m a 1.300m, sendo o terreno bastante irregular, com acentuada declividade média (entre 10° e 26°) e drenagens bem encaixadas nos filitos das vertentes. A vegetação mais preservada e de maior porte se encontra nos vales dos córregos.

2 - OBJETIVOS E METODOLOGIA

2.1 – OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é testar e adaptar novas técnicas de prospecção e de caracterização tecnológica para materiais pétreos.

Este foi desdobrado nos objetivos listados abaixo, onde foram realizados levantamentos geológicos e geofísicos, além de terem sido desenvolvidos estudos para adaptação de métodos para determinação de índices físicos, testes de ataque ácido e cristalização de sais.

- Traçar um panorama do setor de rochas ornamentais nos seus aspectos técnicos e econômicos:

Através de trabalhos publicados recentemente, procurou-se reunir as informações mais atualizadas no que diz respeito ao mercado de rochas ornamentais e apresentar as potencialidades do Estado de Minas Gerais. Foram também reunidas informações a respeito dos processos de extração, beneficiamento e aplicação.

- Prever encavernamentos, relações de contato litológico e feições estruturais em um maciço de rocha carbonática, com o uso do método geofísico GPR (Ground Penetrating Radar).

A aplicação do GPR nas fases de prospecção e lavra de rochas ornamentais ainda é pouco desenvolvida. Na área estudada, o método foi testado visando a verificação de suas potencialidades e limitações, bem como a formulação de sugestões que possam melhorar os procedimentos de coleta de dados no campo, em função dos objetivos e peculiaridades geológicas do sítio estudado.

Com esse método indireto podem ser obtidas, a custos relativamente baixos, informações da espessura do capeamento sobre um corpo rochoso, da persistência das famílias de fraturas no maciço, presença de encavernamentos em maciços carbonáticos, mudanças litológicas ou de qualidade geral de um maciço. O método GPR será discutido com mais profundidade no item 6.1.

- Analisar o alívio de tensões de um maciço rochoso durante a extração de blocos e seus efeitos:

Devido a inviabilização da lavra de rochas ornamentais em algumas pedreiras da região produtora Centro-Oeste (proximidades das cidades de Candeias e Oliveira-MG) em função do intenso fraturamento relacionado ao alívio de tensões dos maciços, decidiu-se observar se esse fenômeno também ocorria na pedreira do Cumbi. Na área, o relaxamento do maciço rochoso em alguns pontos já pôde ser documentado em fotografia, com deslocamentos

comprovados ao longo de fraturas de até 3cm. Contudo, este fenômeno parece ser lento, progressivo e relacionado à acomodações gravitacionais de blocos isolados, não afetando diretamente a produção, ao contrário do que é visto nos maciços migmatíticos da região Centro-Oeste. Nesta região o maciço em geral apresenta maiores tensões acumuladas (in situ) devido a tectônica que foi submetido e suas condições topográficas. A reologia dos granitóides (comportamento essencialmente rúptil) pode favorecer, especialmente em pedreiras com elevado volume de produção (maior área desconfinada em curto espaço de tempo) um rápido alívio de tensões. Há relatos de estalos ruidosos em maciços com pedreiras, que são relacionados a pequenos abalos sísmicos resultantes da passagem do estado elástico para o plástico (aliviado=over stressed). Pode exercer também grande influência a direção de avanço de lavra. Na abertura de canais, por exemplo, quando sua direção é ortogonal à tensão principal, pode ocorrer um incremento no alívio de tensões ao longo da face livre, aumentando o microfraturamento do maciço.

- Realizar ensaios físicos (porosidade, absorção e peso específico aparente), petrográficos e de resistência aos vapores de ácido sulfuroso, nos laboratórios do CPMTC-IGC-UFMG.

Nos últimos anos tem-se observado uma crescente conscientização dos grandes consumidores de rochas ornamentais quanto à necessidade de uma correta aplicação dos materiais pétreos, levando em conta suas características físico-químicas. Problemas de manchamento, alteração e quebras mecânicas podem ser vistos em revestimentos pétreos de edificações brasileiras de todas as idades e padrões de preço.

Visando contribuir para o correto entendimento dos processos que levam a estas patologias, foram implementados novos procedimentos para a realização de alguns ensaios tecnológicos, seguindo como diretrizes as normas da ABNT e esboços de normas unificadas em implantação na Comunidade Econômica Européia.

Esses ensaios foram realizados em amostras representativas da jazida do Cumbi e seus valores foram comparados com outras rochas carbonáticas.

2.2 - MÉTODOS EMPREGADOS

Para o mapeamento e localização foram usadas as ortofotos da CEMIG na escala 1:10.000 de 1987, números 421213 e 421214, correspondentes à articulação (escala 1:50.000) na folha Ouro Preto. Foram também obtidas cópias das fotos aéreas na escala 1:30.000 da região (CEMIG - 2011C-0246 e -0247; 2010C-0200 e -0201). A base cartográfica utilizada é na escala 1:2.000, abrangendo uma área de 2km², correspondente ao depósito em estudo. Há outras plantas de detalhe das frentes de lavra nas escalas de 1:1.000 e 1:500. Como referência topográfica regional, utilizou-se a Folha Ouro Preto na escala 1:50.000 (IBGE / SF-23-X-A-III-4) de 1977.

Os softwares utilizados foram o Word 7.0 para edição de texto, AutoCad r.14 e MicroStation 95 para digitalização e confecção de desenhos, Access 2.0 (banco de dados), Power Point 4.0 para apresentação, Gradix para interpretação dados GPR e Stereo Net para o tratamento dos dados estruturais.

As medidas estruturais foram feitas com a bússola Clar, com adoção na maioria da vezes da representação em que aparece a direção da reta de maior declividade do plano seguida depois da barra pelo caimento em graus (ex.: 110/40). Foi usada também a convenção que representa as medidas por quadrante (ex.: N20°E/40°SE).

Os trabalhos de campo foram feitas em 4 etapas de aproximadamente 7 dias cada, onde se realizou primeiramente o reconhecimento geológico regional e local, seguido pelo mapeamento geológico-estrutural da pedreira e arredores, coleta de amostras para ensaios e realização de perfis GPR.

Na técnica indireta de prospecção geofísica denominada Ground Penetrating Radar (GPR) pode-se obter informações do subsolo através da interpretação das ondas de radar de alta frequência refletidas. Usou-se o equipamento da marca RAMAC, pertencente à Universidade Federal de Minas Gerais.

Os ensaios de laboratório foram executados com os recursos disponíveis no CPMTCC, usando basicamente microscópio de luz polarizada e acessórios, estufa, balança, capela e outros materiais de uso corriqueiro em um laboratório de química. Para os ensaios tecnológicos foram coletadas amostras diretamente da pedreira e outras já beneficiadas (polidas e cortadas), que objetivaram testar modificações nas metodologias de ensaio. Essas amostragens abrangeram os tipos comercializados pela empresa naquela jazida, estando os procedimentos e resultados discriminados no item 6.2.

Nas análises petrográficas, os dados de microfraturamento mostram-se difíceis de se quantificar em rochas carbonáticas devido a quebras mecânicas durante a preparação das lâminas delgadas. O

cálculo da área fraturada não pôde portanto auxiliar na quantificação da relação fraturamento x absorção das amostras analisadas.

Neste trabalho o termo “rochas carbonáticas” foi empregado para descrever rochas do tipo mármore, travertino e calcários calcíticos, dolomíticos e suas variações. O termo granito foi usado no sentido comercial, bem como o quartzito, que inclui também os arenitos.

2.3 - FASES DE TRABALHO

Resumidamente, podemos citar a sequência das etapas deste trabalho:

- Levantamento e análise bibliográfica.
- Interpretação das ortofotos.
- Programação dos estudos de campo.
- Mapeamento/reconhecimento geológico da área da pedreira e seus arredores.
- Cadastramento dos recursos minerais da região.
- Confeccção e estudo de lâminas delgadas.
- Campanha geofísica (usando o *GPR*) e interpretação dos dados.
- Ensaio tecnológicos.
- Interpretação dos dados obtidos em campo e laboratório.
- Modelagem geológico estrutural.
- Finalização e editoração da tese.
- Preparação de material para apresentação.

3 – ASPECTOS GERAIS DO SETOR DE ROCHAS ORNAMENTAIS

3.1 – CONCEITO DE ROCHA ORNAMENTAL

Rochas ornamentais são aquelas extraídas em placas ou blocos, cortadas de formas diversas e que podem ou não receber beneficiamento para uso em revestimento ou em placas e peças isoladas.

As pedras naturais fazem parte da história da humanidade, registrando a evolução da técnica, organização e cultura das sociedades. Na pré-história temos o exemplo da primeira manifestação religiosa na arquitetura, que são os megalitos de Stone henge (Salisbury Plain, Wiltshire, Inglaterra).

Contudo, o aparecimento das pedreiras com produção em grande escala se deu no Egito, por volta do ano 2.600 a.C. Foram necessárias expedições geológicas, que permitiram descobrir jazidas de ardósia, brechas, calcários arenosos, granito, diorito, serpentinito,

basalto, alabastro, etc. O mapa geológico mais antigo que se tem conhecimento (López, 1996) é o da pedreira de Bekhen, da época de Seti I (1312-1292 a.C.).

A maior pirâmide construída foi a de Keops, nas proximidades de Gizeh. Nela haviam por volta de 2.300.000 blocos, com aproximadamente 2,5 toneladas cada (Rosa, 1997).

Para a lavra se utilizava o fogo, cunhas de madeira e instrumentos feitos de diorito, sílex e cobre (**figura 3.1**). Para auxiliar o corte com os instrumentos de cobre, utilizava-se um abrasivo a base de grãos de quartzo molhados. A fundição local do ferro se deu somente por volta dos séculos VII e VI a.C. (Rosa, 1997). As pedreiras mais importantes eram as de granito de Asuán (mais de 1000 km de Gizeh) e a de calcário de Tura (15 km de Gizeh).

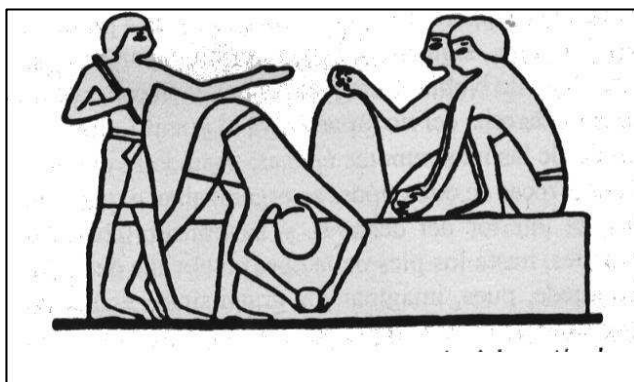


Figura 3.1: Elaboração de blocos com o auxílio de esferas de dolerito (tumba de Tebas, Egito, 1500 a.C.). (López, 1996)

O transporte era feito em geral através do rio Nilo, empregando para os deslocamentos em terra uma espécie de trenó puxado a tração humana (**figura 3.2**). Para diminuir o atrito com a superfície, eram empregados madeira molhada ou o recobrimento do caminho com argila (Rosa, 1997).

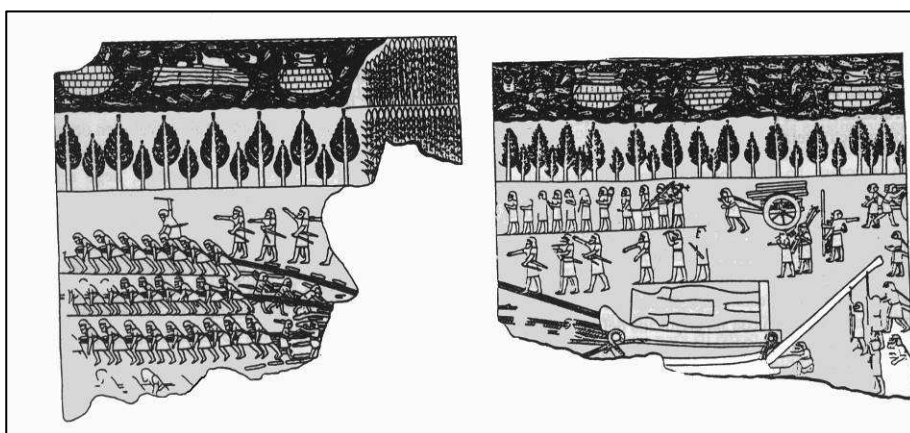


Figura 3.2: Transporte de uma escultura de toro (baixo relevo em rocha procedente do Palácio de Nínive, século VII a.C.). (López, 1996)

Por volta da metade do século VI a.C os gregos começaram a lavrar as pedras para a construção de templos. Os suntuosos Farol, a Biblioteca e o Museu de Alexandria marcam a utilização das pedras neste período. A partir do século VI a.C. os romanos marcaram a civilização ocidental com uma intensa atividade construtiva (López, 1996). A ruína romana mais conservada na Península Ibérica é a do aqueduto em Segóvia (Espanha). Construída há 2.000 anos, com estrutura em blocos de granito encaixados (sem qualquer cimentação), formando vãos em arco (**foto 3.1**).

O apogeu do uso da pedra se deu no século XIV, onde começaram a construção das grandes catedrais em estilo gótico. As pedras são empregadas dentro de conhecimentos construtivos avançados, usando colunas e abóbadas para dissipar e decompor os esforços estruturais dessas monumentais obras (López, 1996). Apesar do domínio de avançadas técnicas de engenharia, o transporte continuava a ser um grande problema. Um carregamento de pedra valia o mesmo que seu transporte terrestre por uma distância de 18 km (Rosa, 1997). Uma das soluções encontradas era o uso das pedras encontradas no local da obra. Na catedral de Notre-Dame, como vários outros exemplos também em Paris, foram usadas as rochas do subsolo. Na cidade são documentados 600 hectares de galerias, que se prolongam por aproximadamente 300 km.

Com o desenvolvimento de outros materiais, as pedras naturais perderam praticamente a função de elemento estrutural da obra, se prestando mais ao seu acabamento. Contudo, devido ao avanço tecnológico e ao aumento da escala de produção, é possível um amplo acesso das mais variadas camadas da população ao leque de possibilidades de materiais pétreos.



Foto 3.1: Aqueduto romano em Segóvia (Espanha), construído em blocos de granito encaixados há 2.000 anos.

3.2 – POTENCIAL GEOLÓGICO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS EM MINAS GERAIS

Na região sudeste do Brasil está concentrada aproximadamente 70% da produção e 80% do consumo nacional de rochas ornamentais (COMIG, 1998). O Estado de Minas Gerais é atualmente o maior produtor brasileiro de rochas ornamentais, com diversificada produção de granitos, ardósias, quartzitos, mármore, serpentinitos, pedra sabão, esteatito (talco) e outros.

Segundo levantamentos feitos por Chiodi (inédito), Minas Gerais movimenta 225 milhões de dólares anualmente com extração e beneficiamento de rochas ornamentais (excluindo marmorarias), em um setor que investiu aproximadamente 275 milhões de dólares (incluindo marmorarias). Os empregos diretos desta indústria são de aproximadamente 21.100, envolvendo em sua maioria mão de obra pouco qualificada. As regiões que mais empregam no estado são Papagaios (ardósia), São Tomé das Letras (quartzito) e centro produtor de granitos Candeia.

A distribuição destas pedreiras é apresentada na **figura 3.3**, onde é ainda possível observar os principais pólos produtores de rochas ornamentais e sua concentração espacial nas regiões centro-sul e nordeste do estado.

Apesar da rigidez locacional da mineração, observa-se que nos projetos implantados de rochas ornamentais, além da influência básica relacionada ao potencial geológico de cada região, tem papel fundamental na escolha da área a ser lavrada a sua localização em relação aos principais eixos de transporte rodoviário e ferroviário. Devido ao pequeno porte dos projetos das mineradoras de rochas ornamentais, é imperativo a existência de infra-estrutura básica ou incentivos para viabilizar o desenvolvimento das regiões com potencial geológico ainda não explorado.

São mostradas nos pontos laranjas da **figura 3.4** as lavras de mármore em atividade (Ouro Preto e Córrego D'anta). A região de Mar de Espanha, no centro-leste de Minas Gerais, foi a pioneira na extração de mármore no estado, encontrando-se hoje paralisada.

A tabela 3.1 apresenta o cadastro mais recente das pedreiras em atividade no estado, dividido por município e bem mineral explotado (COMIG, 1998).

NATUREZA DA ROCHA	PEDREIRAS CADASTRADAS	MUNICÍPIOS (nº de pedreiras)
GRANITO	82	Candeias (11), Cachoeira do Pajeú (11), Itapecerica (10), São Francisco de Paula (5), Medina (4), Águas Vermelhas (3), Caldas (3), Camacho (3), Cláudio (3), Comercinho (3), Mantena (3), Piracema (3), Aimorés (2), Alfenas (2), Carmo da Mata (2), Novo Oriente de Minas (2), Oliveira (2), Serrania (2), Campestre (1), Campo Belo (1), Dolores de Gunhães (1), Itueta (1), Passa-Tempo (1), Pavão (1), Santa Cruz de Salinas (1), Santa Rita de Caldas (1).
ARDÓSIA	28	Papagaios (11), Felixlândia (5), Paraopeba (4), Curvelo (3), Pompéu (2), Caetanópolis (1), Leandro Ferreira (1), Martinho Campos (1).
QUARTZITO	54	São Tomé das Letras (15), Luminárias (10), Mariana (8), Alpinópolis (7), Capitólio (3), São João Batista da Glória (3), Datas (2), Diamantina (2), São José da Barra (2), Gouveia (1), Ouro Preto (1).
MÁRMORE	3	Córrego D'anta (2), Ouro Preto (1).
PEDRA LAGOA SANTA	9	Pedro Leopoldo (8), Funilândia (1).
PEDRA SABÃO	5	Gouveia (2), Acaiaca (1), Datas (1), Mariana (1).
SERPENTINITO	3	Conselheiro Lafaiete (1), Sacramento (1), Piranga (1).
PEDRA PRETA MARIANA	1	Mariana (1).
TOTAL	185	53

Tabela 3.1: Distribuição das pedreiras cadastradas no “Diagnóstico do setor de rochas ornamentais e de revestimento no estado de Minas Gerais” (COMIG, 1998).

Os tipos de rochas extraídas no estado, bem como a região onde ocorrem e suas respectivas unidades geológicas correspondentes, são apresentados na **tabela 3.2** Com base nestas ocorrências, pode-se estabelecer critérios prospectivos regionais através do estudo do zoneamento geotectônico e de mapas geológicos. Com o uso de mapas em escalas maiores, relatórios e publicações, ortofotos, fotografias aéreas e finalmente com a

coleta de amostras e inspeção das características estruturais locais, pode-se determinar a potencialidade de uma determinada ocorrência.

Caso o local da ocorrência seja adequado e o material apresente as propriedades estéticas e mineralógicas desejadas, defini-se os limites da área a ser investigada e segue-se os procedimentos legais para o requerimento de pesquisa. Em seguida devem ser executados os ensaios e análises tecnológicas, além dos testes de lavra e de mercado.

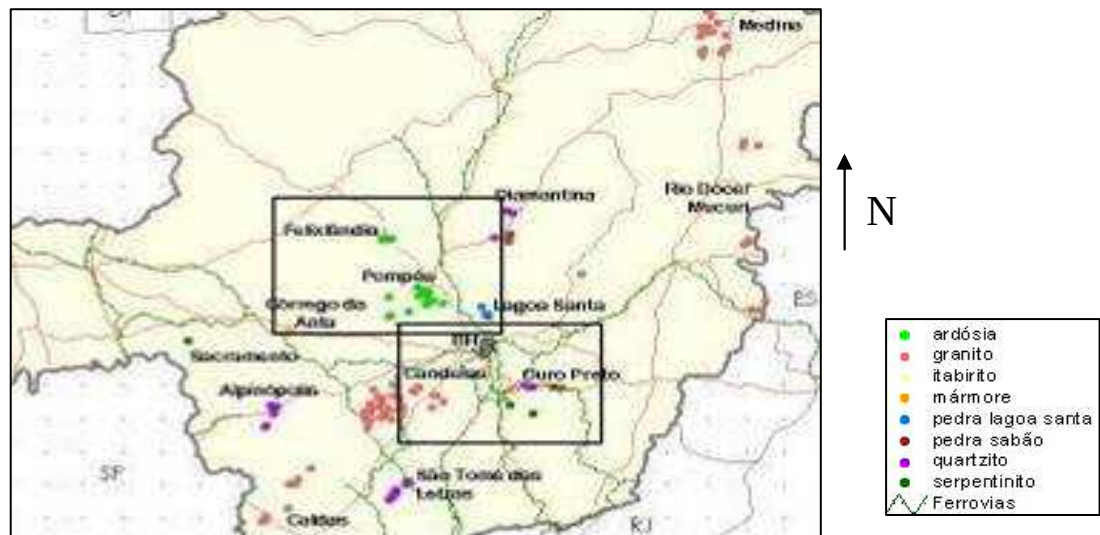


Figura 3.3: Croquis da distribuição das pedreiras ativas no estado e tipologia das rochas extraídas. (FONTE: www.comig.com.br)



Figura 3.4: Croquis da distribuição das pedreiras de mármore ativas (pontos laranjas) no estado. Região de Ouro Preto (a) e Córrego D'Anta (b). (FONTE: www.comig.com.br)

TIPO DE ROCHA	PROCEDÊNCIA	UNIDADE GEOLÓGICA ASSOCIADA	ENQUADRAMENTO GEOCRONOLÓGICO
Granitos marrons	Centro Produtor Caldas	Cp. Alcalino Poços de Caldas	Mesozóico (~75Ma)
Ardósias	Papagaios/Felixlândia	Fm. Santa Helena / Sg. Bambuí	Neo Proterozóico (~500-700Ma)
Mármore	Campos Altos	Fm. Serra da Saudade / Sg. Bambuí	
Pedra Lagoa Santa	Pedro Leopoldo/Funilândia	Fm. Vespasiano-Sete Lagoas / Sg. Bambuí	
Granitos homogêneos	Centro Produtor Medina	Granitóides porfiríticos / Fx. Araçuaí	
Quartzitos	São Tomé das Letras	Sq. Quartzíticas / Gr. Andrelândia	Meso Proterozóico (~1.400-1.700Ma)
Quartzitos	Alpinópolis	Gr. Canastra	
Quartzitos	Diamantina	Gr. Diamantina / Sg. Espinhaço	
Granitos verdes homogêneos, claros granatíferos, porfiróides	Centro Produtor Rio Doce / Mucuri / Leste MG	Cp. Juiz de Fora e corpos granitóides diferenciados	Paleo Proterozóico (~2.100-2.200Ma) *
Mármore Aurora	Quadrilátero Ferrífero	Fm. Fecho do Funil / Gr. Piracicaba / Sg. Minas	Paleo Proterozóico (~2.400-2.600Ma)
Quartzitos	Ouro Preto/Mariana	Gr. Caraça / Sg. Minas	
Serpentinitos, pedra sabão, pedra talco	Quadrilátero Ferrífero	Sg. Rio das Velhas	Arqueano (~2.700-3.100Ma)
Pedra sabão, pedra talco	Serro/Datas	Sq. Serra da Serpentina, Sq. Mata Cavalo e Sq. Rio Paraúna	
Serpentinitos	Sacramento	Rochas correlativas ao Cp. Morro do Ferro e Cp. Fortaleza de Minas	
Granitos verdes e multicores movimentados	Centro Produtor Candeias	Cp. Barbacena / Cp. Campos Gerais	Arqueano / Proterozóico indiviso (terrenos gnáissico-migmatíticos de evolução policíclica)
Granitos movimentados rosados e avermelhados	Centro Produtor Caldas	Cp. Varginha e corpos granitóides diferenciados	
Granitos movimentados marrom amarelados	Guanhães	Cp. Guanhães indiviso	

Cp.(Complexo) Fm. (Formação) Fx. (Faixa) Gr. (Grupo) Sg. (Supergrupo) Sq. (Seqüência) *Fischel *et al.*; 1998.

Tabela 3.2: Ocorrências de rochas ornamentais em Minas Gerais e seus domínios geológicos e geocronológicos. (modificado de COMIG, 1998)

A produção de granitos do estado corresponde a quase 40% da produção nacional e a aproximadamente 50% das exportações brasileiras, sendo que cerca de 58% dos blocos produzidos são exportados (Comig, 1998). Em relação à produção de ardósias, quartzitos, pedra sabão e serpentinitos, o estado representa a quase totalidade da produção e exportação. Os números apurados desta produção são apresentados na **tabela 3.3**.

PRODUÇÃO ANUAL				
TIPO DE ROCHA	m ³	TONELADAS	m ² (*)	OBSERVAÇÕES
GRANITO	202.800	608.400	340.000	58% é exportado
ARDÓSIA	136.667	410.000	15.000.000	Chapas de 1cm de espessura
QUARTZITO	77.200	220.000	3.850.000	Chapas de 2cm de espessura
MÁRMORE	7.200	21.600	90.000	
PEDRA SABÃO	3.600	11.000	-	Não inclui pedra talco
SERPENTINITO	1.500	4.500	45.000	
PEDRA LAGOA SANTA	2.000	6.000	100.000	
PEDRA PRETA MARIANA	240	864	12.000	
TOTAL	431.207	1.282.364	19.437.000	

* desdobrados em Minas Gerais

Tabela 3.3: Produção estimada de rochas ornamentais no estado. (FONTE: COMIG, 1998)

O Estado de Minas Gerais possui variados ambientes geológicos, vasto território, disponibilidade de mão de obra, água, energia e uma malha de transporte que cobre boa parte do território. Embora já ocupe uma posição destacada nacionalmente, deve-se agregar valor à produção do estado através do melhor conhecimento das jazidas e das características tecnológicas das rochas, do beneficiamento de blocos e da melhoria da qualidade dos materiais extraídos com o uso de técnicas de lavra adequadas.

Na **tabela 3.4** pode-se acompanhar os dados da produção brasileira de mármore e granitos de 1994 a 1997, incluindo informações de importação e exportação. Dados preliminares indicam uma produção de 2.100.000 toneladas em 1997, sendo 903.300 toneladas exportadas (Cid Chiodi, comunicação verbal).

Com este esperado salto em produção e qualidade, o Brasil poderá ocupar uma posição mais condizente com seu mercado interno, potencial geológico e extensão territorial. Atualmente o Brasil possui a sexta posição no comércio internacional de mármore e granitos, com uma participação de 5,6%. A **tabela 3.5** apresenta os níveis de produção internacionais de rochas brutas e processadas e a participação dos países produtores no mercado internacional.

Em relação à exportação de mármore e granitos processados, o Brasil deverá triplicar sua participação atual (1,3%) para alcançar o nível ocupado pela Índia e Portugal, que participam com 3,8% do mercado de rochas processadas.

		1994 (r)		1995 (r)		1996 (p)	
		toneladas	US\$ x 10 ³	toneladas	US\$ x 10 ³	toneladas	US\$ x 10 ³
Produção	Blocos de granitos e mármore	1.993.007		1.887.532		2.060.000	
Importação	Mármore em bruto	2.586,1	1.241,9	4.287,8	2.300,6	2.705,7	1.493,1
	“Granitos” em bruto	31,0	25,1	315,3	318,0	154,0	130,7
	Rochas processadas	10.496,5	5.489,1	26.685,4	14.211,9	40.371,2	19.945,7
	TOTAL	13.113,6	6.756,1	31.288,5	16.830,5	43.230,9	21.569,5
Exportação	Mármore em bruto	14.350,9	2.347,7	14.308,6	2.520,4	12.230,9	2.249,9
	“Granitos” em bruto	550.273,4	80.068,6	606.826,1	88.226,6	668.225,8	98.504,5
	Rochas processadas	57.848,8	40.369,5	69.492,9	45.401,1	71.634,0	51.844,6
	TOTAL	622.473,1	122.785,8	690.627,6	136.148,1	752.090,6	152.599,0
Consumo aparente *	Blocos de granitos e mármore	1.431.000		1.271.000		1.384.403	

* estimado (r) revisado (p) preliminar

Tabela 3.4: Produção e comercialização de rochas ornamentais no Brasil.

FONTE: DNPM-Sumário Mineral de Rochas Ornamentais e de Revestimento, 1997-inédito in COMIG, 1998.

Para exemplificar, a Espanha, com um território um pouco menor do que o de Minas Gerais, tem uma produção duas vezes maior que a do Brasil, detendo 7,3% do mercado mundial de rochas processadas e 7,7% do mercado global (rochas brutas e processadas), sendo ainda líder no setor de ardósias.

Em vista desses dados, é claro que há um longo caminho de investimentos em tecnologia, política de produção e vendas, em indústrias de beneficiamento e transporte. O Estado de Minas Gerais, devido ao seu perfil essencialmente exportador de rochas não processadas, sua diversidade de materiais, capacidade e volume de produção, poderá alavancar o processo de conquista de fatias mais rentáveis do comércio mundial.

PRODUÇÃO TOTAL			PARTICIPAÇÃO NO MERCADO INTERNACIONAL							
PAÍSES			ROCHAS CARBONATADAS EM BRUTO		ROCHAS SILICATADAS EM BRUTO		ROCHAS PROCESSADAS		TOTAL	
	x 10 ³ t	%	x 10 ³ t	%	x 10 ³ t	%	x 10 ³ t	%	x 10 ³ t	%
Brasil	2.062	4,8	12,2	0,8	668,2	10,8	71,6	1,3	752	5,6
<i>Itália</i>	7.500	17,5	635	40,9	170	2,7	2.384	41,9	3.189	23,8
<i>China</i>	5.800	13,5	-	-	1.128	18,3	1.217	21,4	2.345	17,5
<i>Espanha</i>	4.000	9,3	154	9,9	465	7,5	413	7,3	1.032	7,7
Portugal	1.500	3,5	108	7,0	174	2,8	215	3,8	497	3,7
<i>Índia</i>	1.900	4,4	43	2,8	1.204	19,5	215	3,8	1.462	10,9
Grécia	2.050	4,8	51	3,3	-	-	206	3,6	257	1,9
Turquia	1.200	2,8	61	3,9	-	-	140	2,5	201	1,5
Coréia do Sul	1.350	3,1	-	-	78	1,3	92	1,6	170	1,3
França	1.600	3,7	46	3,0	-	-	89	1,6	135	1,0
Taiwan	350	0,8	2	0,1	5	0,1	60	1,1	67	0,5
EUA	1.450	3,4	11	0,7	204	3,3	48	0,8	263	2,0
Alemanha	600	1,4	28	1,8	-	-	45	0,8	73	0,5
<i>África do Sul</i>	900	2,1	-	-	777	12,6	-	-	777	5,8
Finlândia	450	1,0	-	-	238	3,9	-	-	238	1,8
Noruega	300	0,7	-	-	222	3,6	-	-	222	1,6
Canadá	400	0,9	-	-	110	1,8	-	-	110	0,8
Outros	9.488	22,1	399,8	25,7	720,8	11,7	487,4	8,5	1.608	12,0
TOTAL	42.900	99,8	1.551	100	6.164	100	5.683	100	13.398	99,9

Tabela 3.5: Oferta mundial de rochas ornamentais e de revestimento. FONTE: DNPM-Sumário Mineral de Rochas Ornamentais e de Revestimento, 1997-inédito in COMIG, 1998.

3.3 – PROCESSOS DE EXTRAÇÃO

A lavra de rochas ornamentais pode ser feita tanto a céu aberto como subterrânea. Na lavra a céu aberto ela pode ser feita em matacões ou em maciços rochosos. A escolha do método de extração varia muito em função da morfologia do terreno e do tipo, valor e disponibilidade do material. No organograma da **figura 3.5** estão resumidos os tipos de lavra existentes.

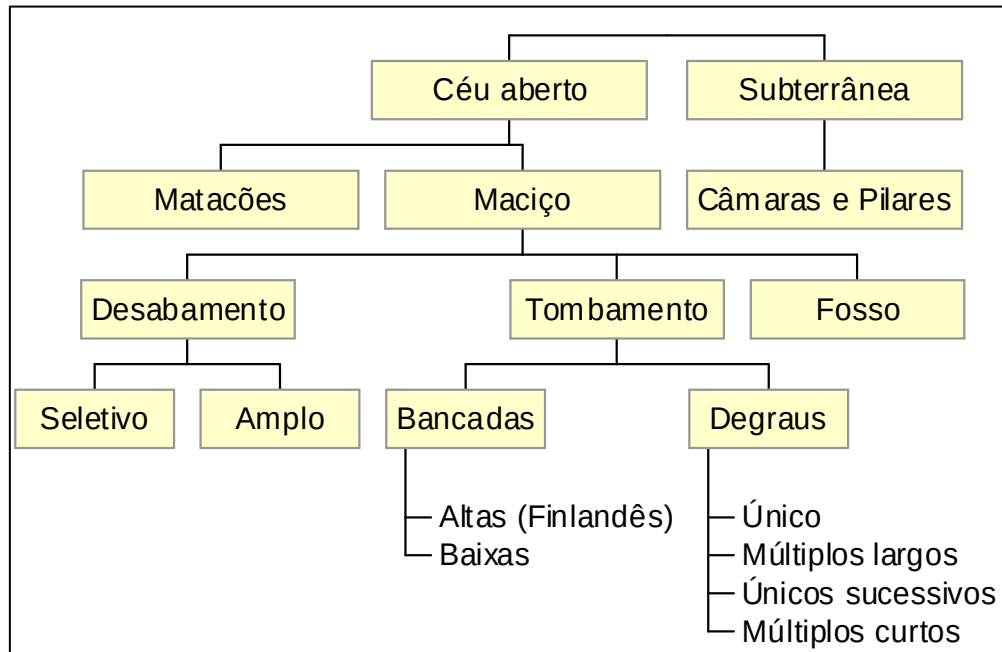


Figura 3.5: Tipos de lavra de rocha ornamental

A lavra a céu aberto em maciço pode ser feita por desabamento, tombamento ou em fosso. O método de lavra por desabamento pode ser seletivo ou amplo, enquanto que na lavra de tombamento o trabalho pode ser feito em bancadas ou em degraus. A lavra em fosso é feita em terrenos planos e pode ser executada com o auxílio de guias ou através da construção de rampas de acesso.

A lavra por desabamento amplo foi um método muito aplicado antes do advento dos fios helicoidais na década de 20. O maciço, geralmente situado em terrenos acidentados, recebe grandes cargas de material explosivo em uma galeria situada na sua porção inferior, gerando fragmentos de todos os tamanhos. Os blocos maiores são serrados e os menores aproveitados como material para calçamento, gerando ainda uma enorme quantidade de rejeito. Este método ainda é praticado em Palma, Itália (Chiodi, 1995). O desabamento seletivo é feito em porções limitadas do maciço, com a colocação de cargas de explosivo em furos horizontais convergentes na porção inferior do maciço, sendo usadas ainda

trincheiras para a perfuração de furos laterais. Este método é praticado na Finlândia (Chiodi, 1995).

Na lavra em bancadas pode ser utilizado o método finlandês (bancadas altas) ou o de bancadas baixas, com até 3m de altura. Para as bancadas baixas, sua altura corresponde a uma das dimensões do bloco final. Este método permite que as bancadas sejam extensas e articuladas. No método finlandês as bancadas podem ter até 6m de largura, 16m de altura e 40m de comprimento. Após o corte desta bancada, são tombados e desmembrados blocos secundários e terciários (finais), utilizando-se diferentes técnicas de corte.

A lavra em degraus pode ser em degrau único, múltiplos curtos (foto 3.2), múltiplos largos e únicos sucessivos. Os degraus únicos sucessivos, por exemplo, são ideais para o nivelamento em terrenos montanhosos (figura 3.6).

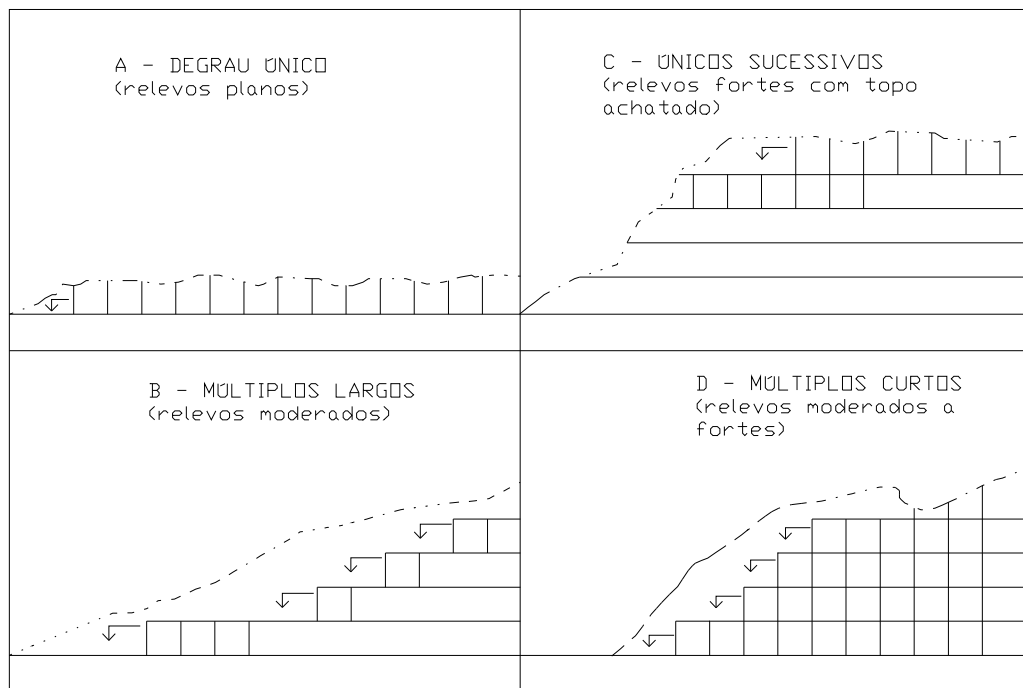


Figura 3.6: Tipos de lavra em degraus (modificado de Chiodi, 1995).

A lavra subterrânea é usualmente feita em rochas carbonáticas, como por exemplo nas cidades de Candoglia, Lasa, Marquina e Carrara, na Itália. Recentemente, ela já é executada também em quartzitos, como em Oliveira dos Brejinhos-BA. As experiências relatadas de lavra subterrânea em rochas graníticas não foram positivas, devido a problemas de adequação de equipamentos para corte, fraturamento do maciço e custos bem mais elevados.

Uma das vantagens deste método é a possibilidade de diminuir um dos principais problemas ambientais da lavra de rochas ornamentais, que é o impacto visual, além de reduzir em algumas situações a quantidade de estéril removido. Há também a possibilidade de se fazer uma exploração mais seletiva e viabilizar pedreiras com reservas explotáveis (baseadas em métodos de lavra a céu aberto) consideradas já exauridas.

Com relação às técnicas de corte da rocha, ela pode ser feita em costura, com uso de explosivo, massa expansiva, martetele e cunha, ou então através de corte contínuo. Neste pode-se empregar o fio helicoidal (técnica já ultrapassada), fio diamantado, correia diamantada, correia dentada, disco diamantado, jato de chama (*flame jet*) e jato d'água (*water jet*). Contudo, o jato d'água é uma técnica de uso restrito a poucas rochas (sienitos e arenitos, principalmente) e não está plenamente desenvolvida. Seus maiores problemas são relacionados ao desgaste do bico injetor de água (no caso de corte com jatos abrasivos), à obtenção de elevadas pressões e ao demasiado gasto energético para aumentá-la a partir de um certo nível de pressão.



Foto 3.2: Lavra desenvolvida em degraus múltiplos curtos em Alicante – Espanha.

3.4 - ETAPAS DO BENEFICIAMENTO

O beneficiamento da rocha ornamental inicia na pedreira, quando é feito o esquadrejamento do bloco para a alimentação do tear. No tear o bloco é serrado em chapas, que são em seguida enviadas para acabamento (polimento, apicoamento, etc). As chapas acabadas são então cortadas em (multi)serras diamantadas em tamanhos padronizados (**foto 3.3**) ou de acordo com as especificações do cliente, dependendo de seu uso final.

Os blocos desdobrados, quer a partir de bancadas tombadas, de matacões ou de outro tipo de técnica de lavra, têm em geral de 5 a 10m³. Os blocos irregulares perdem parte do material que não pode ser alcançado lateralmente pelas lâminas do tear, sendo então importante um esquadrejamento ótimo do bloco antes destes deixarem a pedreira.

Os blocos menores e não uniformes podem ser cortados em talha-blocos, que é uma espécie de grande serra diamantada, evitando o aumento do rejeito nas pedreiras, já que o aproveitamento médio nestas é de 50% (**foto 3.4**).

Os blocos são transportados para os teares e cortados em placas com espessuras de 2 a 3cm, que são depois lavadas para evitar o manchamento do material pela oxidação da granalha.

Nos teares, as lâminas de aço são auxiliadas por uma mistura de água, cal e granalha para garantir o corte dos blocos e o resfriamento das lâminas (**fotos 3.5** – vistas frontal e posterior). Essa mistura abrasiva passa pelo bloco, cai em um tanque e em seguida é bombeada para o chamado “chuveiro”, onde volta a auxiliar a lâmina de aço no processo de serragem. Dependendo do tipo de tear, bem como do material serrado, a velocidade média de corte é grosseiramente em torno de 20cm/h para mármore e 2cm/h para granitos. Para revestimentos de pisos e paredes já estão sendo produzidas placas de 1cm, que vão competir no mercado brasileiro principalmente com os pisos de madeira (tábua corrida).

O consumo de granalha para granitos médios (Cinza Mauá, por exemplo) é de 2 a 2,5kg/m². O consumo do cal é estimado em 50% do peso de granalha utilizado (Kalman, 1993).

Este autor aponta quatro defeitos principais na etapa de serragem:

- Riscos de granalha: a granalha se encontra em excesso e/ou é muito grossa.
- Riscos alternados com áreas lisas: entupimento de bico do chuveiro.
- Efeito “eternit”: descontrole no tensionamento do quadro de lâminas.
- Espessura variável das chapas: má distribuição das lâminas e mau tensionamento das mesmas.

O acabamento pode ser feito através de levigamento, polimento, lustro, apicoamento e flamejamento, além do tingimento. O elemento abrasivo para esta etapa final é o carbureto de silício, que é fixo nos cabeçotes rotativos (Chiodi, 1995).

No levigamento é obtida uma chapa plana e áspera. Já no polimento, a chapa obtida é perfeitamente lisa, porém sem brilho. No lustro é usado um material de mais baixa abrasividade e constituído por óxido de estanho, carbureto de silício e outros materiais. Este pode ser medido através de um aparelho chamado *glossmeter*. O processo completo pode ser executado em politrizes manuais ou automáticas, estas com múltiplos cabeçotes com elementos abrasivos em seqüência.

No apicoamento a chapa recebe golpes de uma ponteira metálica, que resulta em uma superfície rugosa, ideal para aplicação em áreas externas.

No flamejamento a chapa de granito é atacada por um jato de maçarico, que provoca a dilatação diferencial dos cristais de quartzo, resultando em uma superfície áspera, antiderrapante.

Para as rochas calcáreas é comum o preenchimento de fendas e outras irregularidades com uma massa elaborada pelo pó da própria rocha. Este processo é conhecido como masticagem.



Foto 3.3: Multiserra na linha de ladrilhos padronizados (pedreira do Cumbi).



Foto 3.4: Talha-blocos, usado no aproveitamento de blocos menores e não uniformes (Esteve & Mañez, Alicante, Espanha).



Fotos 3.5 a,b: Processo de serragem em um tear, usando uma mistura de granalha, cal hidratada e água feita com circulação em sistema fechado; vistas frontal e posterior (pedreira do Cumbi).

3.5 - MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO SEGUNDO A APLICAÇÃO

Com a crescente competitividade por qualidade e preço nos mercados interno e externo, a demanda aumenta para os materiais que apresentam, além do padrão estético (que possivelmente ainda será o fator de maior peso nas decisões de compra), qualidades físico-químicas, que permitam sua melhor aplicação para o uso demandado.

Para tanto, é necessário que os produtos pétreos disponíveis no mercado tenham sido analisados através de diversos procedimentos, possibilitando uma correta escolha do material segundo as condições exigidas no local de aplicação. Pode-se assim garantir suas características estéticas por um longo período, ao mesmo tempo assegurando a segurança da obra e mantendo baixos os custos de manutenção.

De posse dos dados técnicos, de preço e disponibilidade do produto, o especificador poderá analisar o custo-benefício dos produtos disponíveis para o uso projetado. Ele ainda estará mais resguardado de suas responsabilidades legais com bases técnicas, caso ocorra problemas com o material e ele venha a ser (co)responsabilizado pelos prejuízos causados. A caracterização tecnológica pode ser feita com os seguintes ensaios e análises, de acordo com sua aplicação (**tabela 3.6**).

ENSAIOS	REV. EXT	REV. INT	PISO EXT.	PISO INT.	DEGRAUS	TAMPOS
ANÁLISE PETROGRÁFICA	A	A	A	A	A	A
ALTERABILIDADE (crist. sais / ácido)	A	C	A	B	A	A
VELOC. PROPAG. ONDAS	B	B	B	B	B	B
ÍNDICES FÍSICOS (absorção, porosidade)	A	A	A	A	A	A
DESGASTE AMSLER (atrato)	B	B	A	A	A	B
DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR	A	B	A	B	A	C
RESIST. IMPACTO DE CORPO DURO	C	C	B	B	B	B
RESIST. COMPRES. UNIAXIAL	A	A	A	A	A	A
CONGELAMENTO/ DEGELO / UNIAXIAL	C	C	C	C	C	C
MÓDULO DEFORMABILIDADE	B	C	C	C	C	C
RESIST. FLEXÃO / MÓDULO RUPTURA	A	A	A	A	A	A

A: NECESSÁRIO B: DESEJÁVEL C: RECOMENDÁVEL EM CASOS ESPECIAIS

Tabela 3.6: Tipos de ensaios e necessidades de caracterização de acordo com o uso pretendido (modificado a partir de notas de aula).

Os resultados das análises petrográficas, de índices físicos e de alterabilidade dos dolomitos do Cumbi se encontram no **ítem 6.2**. Abaixo são descritos e indicados alguns ensaios e análises, incluindo informações a respeito de suas limitações.

- **Análise petrográfica** – NBR 12.768/92

Classificar corretamente a rocha sob o ponto de vista petrográfico, fornecendo informações concretas aos consumidores a respeito de seu grau de alteração e possibilidade de aparecimento de patologias.

- **Ensaio de ciclagem (alterabilidade):** Pode-se simular efeitos de tração, dilatação, remoção iônica (lixiviação) e de reações químicas. Abaixo são apresentados os de cristalização e ataque ácido.

1. **Teste de cristalização por imersão total** – esboço de norma da Comunidade Econômica Européia (CEE) – CEN/TC246-WG2 N170E.

O princípio deste ensaio é pesar os corpos de prova (CP) após secagem, saturá-los em uma solução de sulfato de sódio anidro e água deionizada, secá-los e quantificar a mudança de massa em cada um dos 15 ciclos a que eles são submetidos. Deve-se fazer este teste com no mínimo 6 CP.

O objetivo básico é dar uma idéia preliminar do comportamento da rocha (carbonática e arenito, principalmente) submetida à tensões internas devido a cristalização de sais em sua matriz (foto 3.6). É indicada principalmente para rochas de elevada porosidade. Simula adequadamente ambientes sujeitos a temperaturas abaixo de 0°C, evitando se fazer os demorados testes tradicionais de congelamento e degelo.

2. **Teste de decaimento acelerado por temperatura, umidade e dióxido de enxofre** – esboço de norma da CEE – CEN/TC246-WG2 N385.

O objetivo básico deste ensaio é simular a exposição de materiais pétreos a ambientes poluídos, sendo útil na especificação adequada das rochas ornamentais (foto 3.7). Este ensaio é recomendado para rochas que serão utilizadas como revestimentos e pavimentos externos e é particularmente importante para as ardósias usadas como telhas e calcários e arenitos porosos. Neste teste é simulado a alteração de minerais e suas mudanças físicas quando submetidos a ambientes agressivos.



Foto 3.6: Travertino submetido à tensões internas devido a cristalização de sais em sua matriz (LOEMCO-Espanha)



Foto 3.7: CP submetidos ao ataque ácido: aurora pérola (dir.) e jacarandá (esq.) – Lab. CPMTIC-IGC-UFG.

- **Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas – ASTM D2845**

É um ensaio não destrutivo que estabelece uma relação inversamente proporcional entre o grau de alteração, porosidade e presença de descontinuidades com a velocidade das ondas P (compressivas). Exemplificando, para rochas mais alteradas teremos menores velocidades de propagação.

- **Determinação de índices físicos** (massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente) - NBR 12.766/92 e ASTM C97

A determinação dos índices físicos consiste em verificar os parâmetros de massa específica aparente, absorção d'água aparente e porosidade aparente de uma rocha, que podem fornecer informações importantes a respeito de suas possibilidades de aplicação em relação a manutenção de seus padrões físicos, estéticos e de segurança.

- **Determinação do desgaste por abrasão / atrito (Amsler) - NBR 12.042/92**

Este ensaio quantifica a resistência de uma rocha ao desgaste, que é função da dureza de seus minerais constituintes, seu grau de alteração e arranjo textural. O ensaio é realizado submetendo corpos de prova ao desgaste por areia quartzosa sobre uma placa de aço rotativa, onde se avalia a redução das alturas dos CP após percurso de 1000m (**foto 3.8**).

- **Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear - NBR 12.765/92**

A dilatação de uma rocha depende mais uma vez dos minerais constituintes, grau de alteração, porosidade e arranjo textural. No IPT-SP (Frazão & Farjallat, 1995), são usados para a sua determinação dois tubos coaxiais de sílica. No interior do tubo externo é acondicionado o CP e sobre seu topo é colocado o tubo interno, o qual tocará pela sua extremidade externa um dispositivo para medir as deformações provocadas pela circulação de água (entre 0-55°C).

- **Determinação da resistência ao impacto de corpo duro – NBR 12.764/92**

Este ensaio visa determinar a capacidade da rocha em receber impactos diretos. São anotados os valores individuais e médios das alturas em que uma esfera de aço (1 kg massa) fissura, lasca ou rompe uma placa pétrea de 20x20x3cm assentada sobre colchão de areia.

- **Determinação da resistência à compressão uniaxial simples** – NBR 12.767/92 e ASTM C170-90

Apesar das rochas ornamentais não serem atualmente usadas com finalidades estruturais e, portanto, não serem submetidas à altas compressões, este ensaio permite correlacionar os valores de resistência à compressão com a sanidade da rocha, porosidade e características texturais. Pode-se observar à direita da **foto 3.9** a bomba hidráulica, controles da prensa (com tela de proteção), ao centro o sistema DATAC e à esquerda o computador com placa de aquisição de dados.

- **Ensaio de congelamento e degelo conjugados à verificação da resistência à compressão** – NBR 12.769/92

Para verificar a resistência de materiais sujeitos ao congelamento e degelo, os CP são submetidos a 25 ciclos e, em seguida, determina-se sua resistência à compressão uniaxial. Finalmente é feita a comparação de sua resistência com a dos CP não submetidos ao teste, permitindo avaliar a ação de afrouxamento da matriz da rocha durante a cristalização do gelo (**foto 3.10**).

- **Determinação do módulo de deformabilidade estático** – NBR 10.341 e ASTM D3148

Este ensaio permite determinar o módulo de deformabilidade através da relação entre a tensão uniaxial aplicada e sua correspondente deformação. Apesar de não se usar rochas ornamentais com fins estruturais, os valores obtidos dão uma idéia da sanidade da rocha, porosidade e de suas características texturais.

- **Determinação da resistência à flexão (módulo de ruptura/3 pontos)** – NBR 12.763/92 e ASTM C99-87 (1993)e1

As tensões fletoras ocorrem em geral nas placas fixadas por *inserts* metálicos (fachadas aeradas), materiais usados como bancadas, pisos suspensos e nas operações de descarga do tear, polimento e transporte.

Os ensaios podem ser realizados com CP de 5cm de espessura e através de carregamento por 3 pontos (conhecido como Módulo de ruptura) ou então com CP de no mínimo 2,5cm de espessura (**foto 3.11**) e carregamento por 4 pontos (ensaio de flexão). Este último, por ter espessuras mais próximas às usualmente utilizadas, representa melhor as características dos materiais comercializados.



Foto 3.8: Através de pesos e abrasivos, ocorre o desgaste dos CP, que é seguida medido e avaliado (LOEMCO).



Foto 3.9: À direita vê-se a prensa (com tela de proteção) e à esquerda o sistema DATAC e computador com placa e programa de aquisição de dados (Lab. Mecânica Rocas –UPM).

Foram definidos valores limites para os parâmetros físicos para vários grupos de rochas ornamentais, visando garantir padrões de qualidade e segurança na aplicação destes materiais (**tabela 3.7**). Estes valores se encontram nas seguintes normas *ASTM* (*American Society for Testing and Materials*):

- *Standard Specification for marble dimension stone* (ASTM-C503-97) - mármore
- *Standard Specification for slate dimension stone* (ASTM-C629-97) - ardósia
- *Standard Specification for granite dimension stone* (ASTM-C615-96) – granito
- *Standard Specification for quartz-based dimension stone* (ASTM-C616-97) – rochas quartzosas

Frazão e Farjallat (1995) também sugerem parâmetros limite para os granitos.

PROPRIEDADES	ASTM		Frazão e Farjallat
	DOLOMITO	GRANITO	GRANITO
Massa específica aparente (g/cm ³)	≥2,800	≥2,563	≥2,550
Porosidade aparente (%)	-	-	≤1,0
Absorção d'água aparente (%)	≤0,75	≤0,40	≤0,4
Velocidade propagação de ondas (m/s)	-	-	≥4000
Dilatação térmica linear (10 ⁻³ mm/m°C)	-	-	≤12,0
Desgaste Amsler (mm)	-	-	≤1,0
Compressão uniaxial (MPa)	≥52	≥131	≥100
Flexão (MPa)	-	≥8,27	-
Módulo de ruptura / flexão (MPa)	≥7	≥10,3	≥10
Modulo de deformabilidade estático (GPa)	-	-	≥30
Impacto de corpo duro (m)	-	-	≥0,4

Tabela 3.7: Recomendações de parâmetros físicos limite para mármore dolomíticos e granitos. FONTES: Frazão e Farjallat (1995) e normas ASTM C503, C615.



Foto 3.10: Câmara automática de congelamento e degelo (LOEMCO).

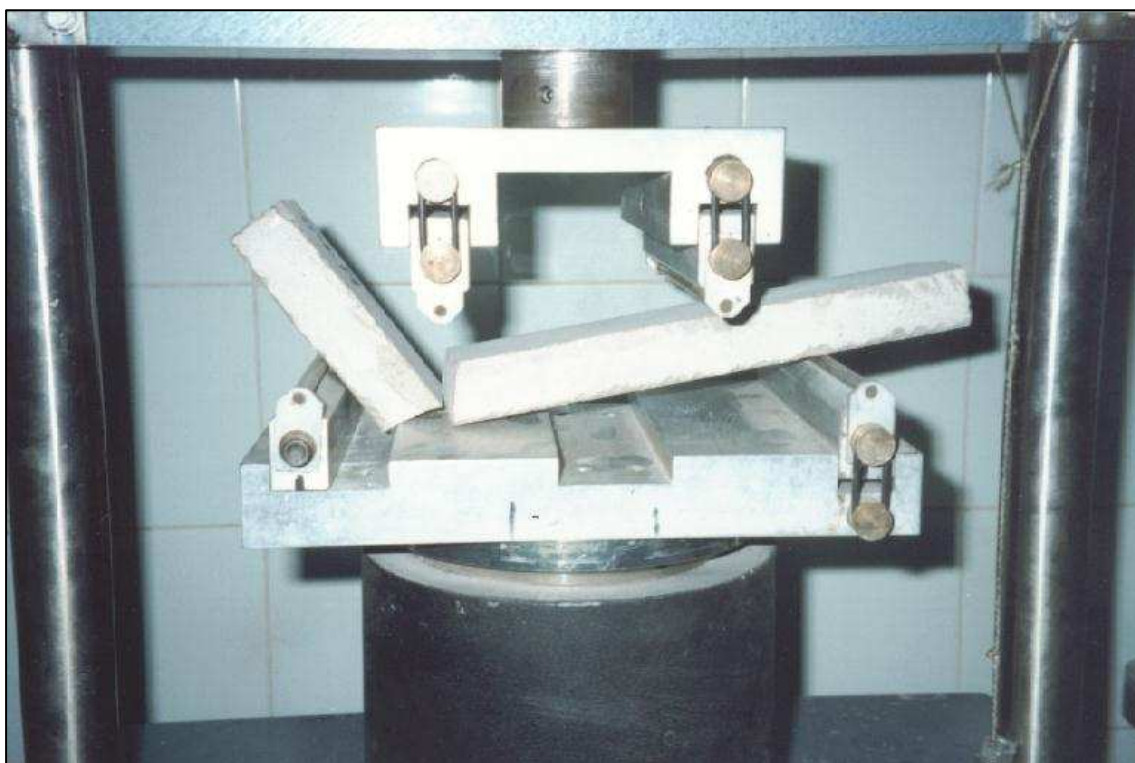


Foto 3.11: CP rompido em ensaio de flexão - carregamento por 4 pontos (LOEMCO).

Além dos ensaios descritos acima, pode-se fazer o teste de Dureza Knoop (Quilete, 1998) que, através da relação entre a carga aplicada e a área de microindentação produzida, fornece valores de dureza do mineral (expresso em MPa). Pode-se com estes valores prever a serrabilidade de uma rocha, seu grau de resistência ao desmonte e ainda o desgaste do material por abrasão.

PROCESSOS DE ALTERAÇÃO:

Especificamente em relação aos dolomitos e outras rochas carbonáticas, o intemperismo físico e químico são muito atuantes. O primeiro tipo de processo está ligado ao desgaste principalmente devido a menor dureza de seus minerais constituintes. O processo químico se relaciona também às suas características petrográficas, onde os carbonatos são sujeitos a reações de dissolução em presença de ácidos.

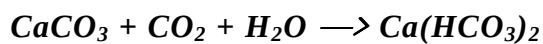
Portanto, para as rochas carbonáticas podem ocorrer principalmente reações de descoloramento por raios ultra-violeta, decomposição pelos ácidos carbônicos (atmosferas úmidas saturadas em CO₂), húmicos e orgânicos (produzidos pelo metabolismo de plantas e microrganismos) e sulfúrico (decomposição de sulfetos).

A reação de uma rocha carbonática, como o calcário, com o ácido carbônico produz bicarbonato de cálcio; com o ácido sulfúrico, sulfato de cálcio (gipsita ou anidrita) e com o ácido clorídrico, cloreto de cálcio.

O bicarbonato de cálcio é muito mais solúvel do que o carbonato, facilitando a ação da água em conjunto com outros agentes intempéricos.

Abaixo relacionamos algumas das reações químicas simplificadas descritas:

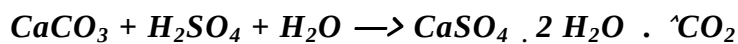
Ácido carbônico:



Ácido acético (simplificação da reação com ácido húmico):



Ácido sulfúrico:



As reações físicas, químicas e biológicas que afetam os materiais pétreos são a principal razão para o esforço de caracterização e previsão do comportamento destes materiais.

Abaixo são listados seus agentes e alguns dos resultados destas reações (patologias):

- Ação eólica – perda de brilho e da camada protetora (polimento).
- Ação da radiação solar / altas amplitudes térmicas – enfraquecimento da estrutura da rocha, alterações na cor e descolamentos por dilatação.
- Ação de gelo / degelo e cristalização de sais – enfraquecimento da estrutura da rocha com a cristalização de água ou sais nos seus poros.
- Ação de águas de escorrência – migração de materiais coloridos adjacentes à rocha.
- Dissoluções e hidrólise – alteração de minerais, com perda de brilho, cor e coesão.
- Sulfatações, nitrificações e gênese de crostas – além dos efeitos das alterações mineralógicas, ocorrem os processos de fixação de poeira, fuligem, eflorescências (**foto 3.12**), outras camadas salinas e fungos.
- Reações da pedra com o cal, argamassa, cimento, estuque e ferro – alteração mineral, eflorescências, destacamento de placas, manchamentos.
- Há ainda problemas relacionados com a influência da água subterrânea, da ação física e organo-química (dejetos) de animais e ainda do homem (vandalismo, desgaste físico e organo-químico).



Foto 3.12: Nesta fachada (tipo Granito Verde Ubatuba – charnockito) ocorrem eflorescência, mudança de coloração, alteração do hiperstênio (mineral de alta temperatura de formação) e manchamento pela oxidação dos elementos metálicos fixadores. Nesta mesma fachada ocorreram quedas de placas, causando danos materiais na área externa comum (localização: edifício comercial no município de Nova Lima-MG).

3.6 - TÉCNICAS DE APLICAÇÃO

As rochas ornamentais podem ser utilizadas em peças isoladas, arte funerária e no revestimento interno e externo de edificações.

Cada tipo de rocha tem um perfil ideal de aplicação de acordo com suas características físico-químicas. Para isso é necessário que o especificador consulte os dados disponíveis para os materiais que se adequem às suas especificações estéticas e de preço, para que não ocorram patologias durante a vida útil da edificação. Contudo; nenhuma iniciativa resultará em resultados significativos se a mão de obra não receber instrução com relação aos cuidados com o transporte, aplicação e proteção do material durante a obra.

Como exemplo, podemos citar algumas rochas de alta temperatura de formação (presença de minerais facilmente alteráveis), calcários e mármore de alta absorção/porosidade, que não são aconselhados para uso em fachadas externas e locais sujeitos à poluição, umidade elevada e desgaste mecânico por atrito. Patologias relacionadas às reações químicas nestes tipos de materiais ocorrem com mais frequência devido à ação de agentes químicos, físicos e biológicos (liquens e fungos).

Para utilização como revestimento de fachadas, as placas de rochas ornamentais podem ser fixadas basicamente por colagem (com ou sem tirantes de segurança) ou por componentes metálicos. Para a colocação de pisos a colagem é a única técnica utilizada. Patta Flain (1995) apresenta um trabalho abrangente sobre as técnicas de aplicação de revestimentos pétreos em fachadas.

No Brasil a técnica mais utilizada para fachadas ainda hoje é a de colagem, que consiste na fixação das placas por argamassa convencional ou com aditivos e colas especiais, geralmente auxiliada por grampos. Esse sistema de fixação com argamassa é constituído de suporte, tela, camada de fixação e placa pétrea. É recomendável que os grampos necessários à fixação da tela ao suporte sejam de aço inoxidável ou galvanizado.

A tela tem a função de aumentar a aderência entre a camada de fixação e o suporte, servindo também como ancoragem para as placas pétreas. A camada de fixação é lançada no espaço vazio entre a placa pétrea e o suporte, que deve ter entre 1 e 3cm. A argamassa deve ter uma consistência que garanta o preenchimento total desse espaço, sem apresentar um quantidade excessiva de água, que diminuiria suas propriedades de aderência e poderia provocar patologias ligadas ao manchamento por absorção de fluidos pela placa.

Quando são utilizadas argamassas colantes ou resinas, estas devem ser espalhadas diretamente sobre o suporte, que deve estar regularizado para a aplicação com economia e

produtividade. A porosidade do substrato deve ser baixa para evitar que a cola seja absorvida antes da fixação da placa.

Entre os aditivos que podem ser utilizados para melhorar as propriedades das argamassas (Beall, 1989 *in* Patta Flain, 1995), podemos citar os incorporadores de ar, os aceleradores, os retardadores (de alta eficiência), os redutores de água, os modificadores de adesão, os pigmentadores e os inibidores de corrosão. Patta Flain (1995) considera passíveis de utilização nas argamassas para assentamento de rochas ornamentais os redutores de água e inibidores de corrosão.

O uso da técnica de fixação por componentes metálicos ainda é pouco difundida no Brasil, apesar de ser largamente empregada em países desenvolvidos. Esta técnica consiste no uso de *inserts* metálicos, que fixam a placa de rocha ao suporte (“corpo” do edifício), deixando um espaço vazio entre a placa e o suporte, que serve como isolante térmico e acústico.

Os dispositivos metálicos de fixação não devem ser constituídos por materiais que se alterem facilmente no ambiente em que serão aplicados. De acordo com os custos, solicitações mecânicas e com o ambiente a que estarão submetidos, usa-se em geral dispositivos de aço inoxidável, ligas de cobre, aço carbono revestido (por galvanização ou eletroposição de zinco e outros metais) e alumínio (Patta Flain, 1995).

A **figura 3.7** mostra um esquema em perfil de um tipo de dispositivo de fixação de placa de rocha ornamental em fachada. O *insert* situado na parte superior retém a placa (**foto 3.13**), enquanto que o da parte inferior tem a função principal de sustentar o peso da placa (**foto 3.14**). A ancoragem destes dispositivos pode ser feita com chumbadores mecânicos e químicos ou por fixação com componentes incorporados ao concreto. Estes dispositivos por sua vez devem estar em um suporte que resista a diversas solicitações mecânicas, ao ataque químico dos agentes intempéricos e ainda absorver deformações. Para edificações com estruturas de concreto armado com vedação vertical de alvenaria, utilizam-se trilhos fixados à estrutura de concreto armado.

(a)



(b)

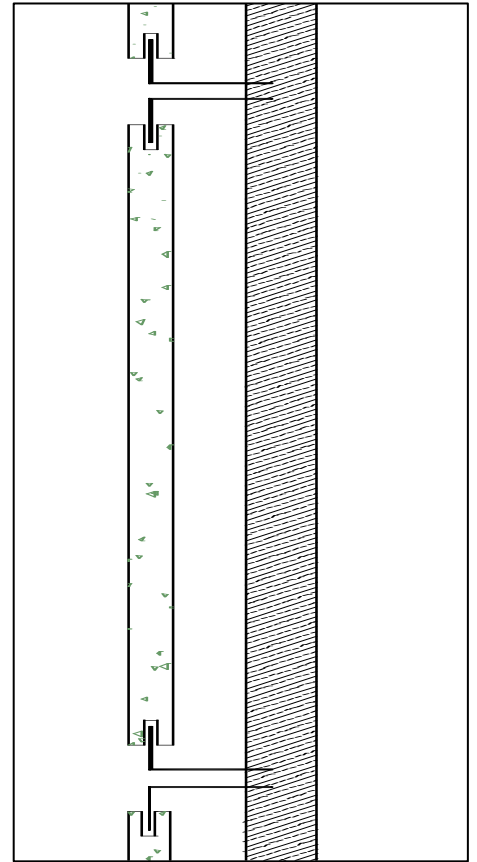


Foto 3.13 (a): Dispositivo metálico de retenção na parte superior da chapa.

Figura 3.7 (b): Perfil de um dispositivo de fixação de placa em fachada aerada (Patta Flain, 1995).



Foto 3.14: Conjunto de *inserts* na parte inferior de placa pétrea, mostrando ainda o suporte impermeabilizado.



Foto 3.15: Juntas entre placas, que servem para absorver deformações e isolar o sistema.

Completando o sistema formado pela estrutura (suporte), dispositivo metálico e placa pétreia, há ainda as juntas, que podem ser divididas em estrutural, de dilatação e entre componentes. Estas, independente do método de assentamento utilizado para a fixação das placas, terão que ser feitas para absorver as deformações do painel (**foto 3.15**).

Quanto às solicitações que as placas podem ser submetidas, Patta Flain e Cavani, 1994 (*in* Patta Flain, 1995) sugerem a seguinte divisão:

A) cargas paralelas ao plano das placas:

- peso próprio das placas e eventuais do isolamento térmico ou de cargas acidentais;

B) cargas perpendiculares ao plano da placa:

- ação do vento e de impactos acidentais.

C) solicitações devidas ao movimento relativo do suporte e das camadas de revestimento

- deformações por variação higrotérmica, retração e deformação lenta do concreto e retração das argamassas de assentamento.

4 – ASPECTOS GEOLÓGICOS

4.1 – ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS: QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Programas de mapeamento geológico envolvendo a região estudada foram desenvolvidos pelo *United States Geological Survey - USGS* e pelo Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM entre os anos de 1945 e 1962. Executaram-se mapas na escala de 1:25.000, em 35 quadrículas. A denominação do termo Quadrilátero Ferrífero, atribuída ao Eng. Luis Felipe Gonzaga de Campos, é devida à configuração topográfica da área a sul do Cráton de São Francisco e oeste do Cinturão Mantiqueira (**figura 4.1**). Geologicamente é uma importante província metalogenética, com ocorrências de ouro, ferro, manganês, bauxita, urânio e outros bens minerais, possuindo aproximadamente 7.000 km².

Na síntese final deste programa, realizada por Dorr II (1969), foram definidas três unidades estratigráficas principais, da mais antiga para a mais recente: (1) Rochas Graníticas Intrusivas; (2) Supergrupo Rio das Velhas (SGRV) e (3) Supergrupo Minas (SGM), do Proterozóico Inferior.

As Rochas Graníticas Intrusivas Arqueanas definidas por Dorr II (terrenos granito-gnáissicos - TGG's) mostram estruturas dômicas e são formadas por gnaisses polideformados, metatonalitos, metagranitos, migmatitos, anfibolitos, metaultramafitos e pegmatitos formados preferencialmente no Arqueano e Tranzamazônico (*in* Chemale Jr. *et al.*, 1991).

O SGRV foi dividido por Dorr II (1969) nos grupos: Nova Lima, basal, constituído por metavulcânicas e metassedimentos, e o Maquiné, constituído por rochas quartzíticas sobrepostas às anteriores. Ladeira (1980) propôs a seguinte subdivisão do Grupo Nova Lima: uma unidade basal vulcânica ultramáfica, uma intermediária vulcano-sedimentar félsico-máfica e uma superior químico-clástica.

As rochas do SGM ocorrem sobre os TGG's e as unidades do SGRV em discordância (Dorr II, 1969; Ladeira & Viveiros, 1984) e são definidas por uma unidade clástica basal, uma clástico-química e outra químico-clástica intermediárias e uma clástica superior. A disposição das rochas básicas e metabásicas presentes nos TGG's (oeste do QF) é tida como sendo do Proterozóico Médio, segundo determinações K-Ar e Rb-Sr (Teixeira, 1985 *in* Chemale Jr. *et al.*, 1991). Estas rochas foram metamorfasadas em condições de fácies anfibolito a granulito (Chemale Jr. *et al.*, 1991), sendo retrometamorfisadas em fácies xisto-verde.

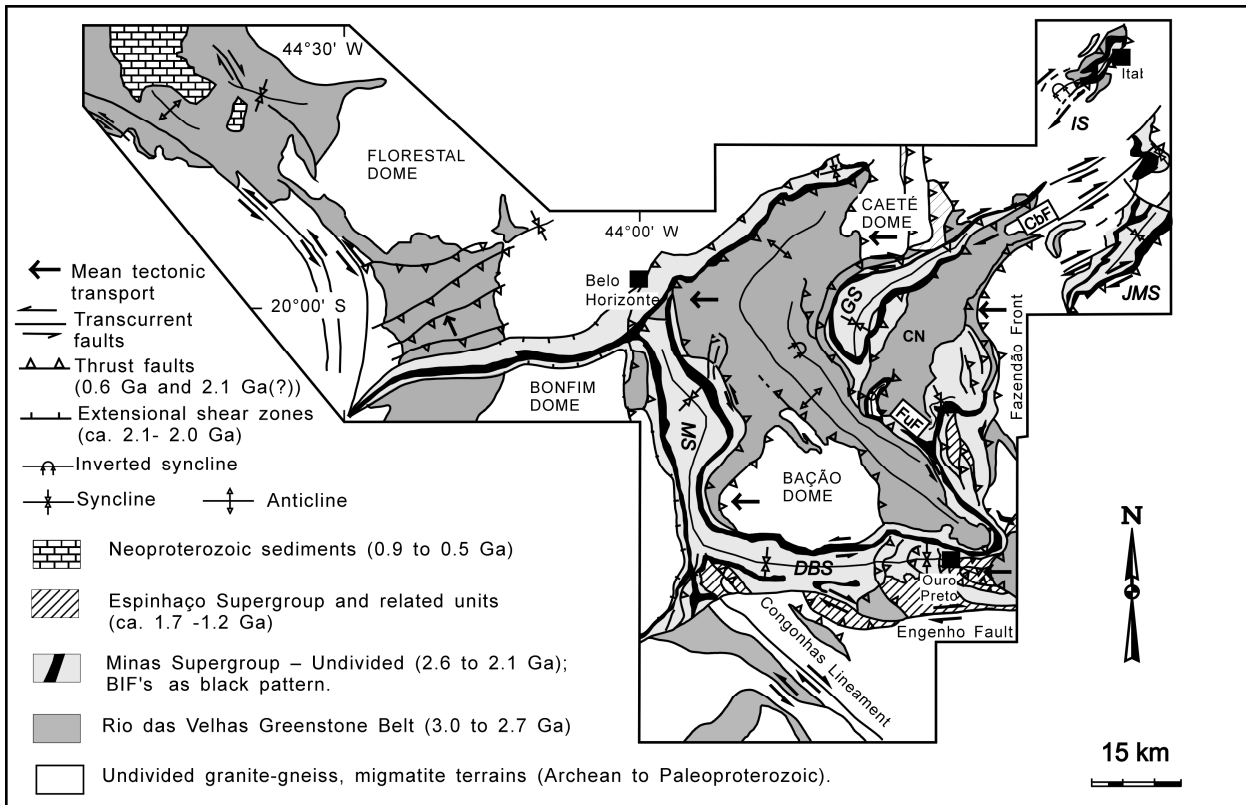


Figura 4.1: Mapa geológico-estrutural simplificado do Quadrilátero Ferrífero [compilado por C. A. Rosiere, F. J. Baars e F. Chemale Jr. a partir de Door (1969), Romano (1989), Seixas (1988), Nummer *et. al.* (1992) e Chemale Jr. *et. al.* (1993)].

As rochas supracrustais do SGRV e do SGM mostram paragêneses mineralógicas de fácies xisto-verde (Ladeira & Viveiros, 1984) e, localmente, as rochas do SGM atingem somente o anquimetamorfismo.

O ambiente tectônico do QF é um tópico controverso e vários modelos foram propostos. Em relação ao arranjo estrutural do SGM no QF, Chemale Jr. *et al.* (1994) concluem que este resultou da interação de no mínimo dois grandes eventos, o primeiro de caráter extensional (2.100 a 1.700 Ma) e o segundo, compressional (650 a 470 Ma).

Estes autores consideram a ocorrência de outros eventos de natureza compressional ou extensional, que poderiam ter gerado certas feições que não podem ser inteiramente entendidas pela análise apenas dos dois grandes eventos mencionados.

A coluna estratigráfica adotada neste trabalho é apresentada na **figura 4.2**.

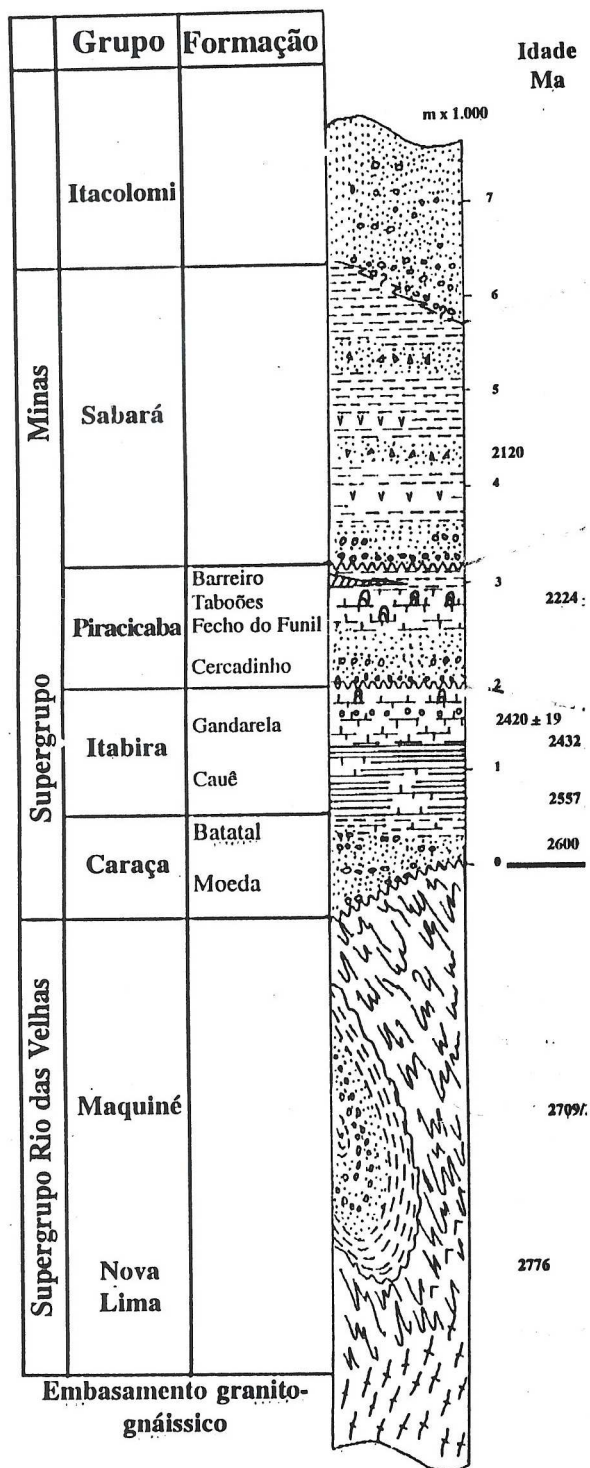


Figura 4.2: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (modificada de Renger *et al.*, 1994).

4.1.1 – ESTRATIGRAFIA E PETROGRAFIA

(1) Complexo Granito-Gnáissico

As rochas pertencentes aos terrenos granito-gnáissicos (TGG's) são as mais antigas do Quadrilátero Ferrífero, formando o embasamento das rochas do Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupo Minas.

Essas rochas foram classificadas por Herz (1970) em quatro grupos: o Grupo I é constituído pelo granodiorito Engenheiro Corrêa, que corresponde às rochas de origem ígnea mais antigas; o Grupo II, corresponde ao granito-gnaiss Itabirito, provavelmente formado em parte por anatexia do granodiorito e em parte por mobilização e fusão parcial de sedimentos antigos; o Grupo III é formado por granitos mais novos, como os granitos Borrachudos e Marzagão, que são intrusivos e discordantes dentro das rochas Pré-Cambrianas. O Grupo IV é formado por uma mistura de gnaisses mais novos e é constituído por rochas félsicas e rochas intimamente associadas com metassedimentos da Séries Minas e com o gnaiss do Grupo II.

Os grupos I e II mostram afinidade granodiorítica e os Grupos III e IV afinidades granítica e gnáissica, respectivamente.

(2) Supergrupo Rio das Velhas

As rochas deste supergrupo foram definidas inicialmente sob a denominação de Série Rio das Velhas, desmembrada da Série Minas e definida por Dorr *et al.* (1957) como uma seqüência vulcano-sedimentar mais antiga que as rochas da Supergrupo Minas. É composta principalmente de xistos, filitos metassedimentares e metavulcânicas com formações ferríferas bandadas, grauvacas, conglomerados, quartzitos xistosos e rochas quartzo carbonáticas de composição dolomítica. Essas rochas são melhor conhecidas e expostas ao longo do vale e das elevações marginais do Rio das Velhas nas quadrículas de Nova Lima, Rio Acima e Itabirito.

O Supergrupo Rio das Velhas possui uma espessura mínima estimada em 6.000 m, sendo dividido em dois grupos: O Grupo Nova Lima na base e o Grupo Maquiné no topo.

O Grupo Nova Lima é constituído predominantemente por xistos e filitos metassedimentares e metavulcânicos, subordinadamente ocorrem formações ferríferas bandadas, grauvacas, quartzo sericita xistos, conglomerado xistoso e diamictitos.

Ladeira (1980) renomeia a Série Rio das Velhas em Supergrupo Rio das Velhas. Neste mesmo trabalho, o autor divide o Grupo Nova Lima em três unidades: uma unidade metavulcânica na base, uma metassedimentar química e a unidade sedimentar clástica no topo.

(3) Supergrupo Minas

Dorr *et al.* (1957) dividiram a Série Minas nos Grupos Caraça, Itabira e Piracicaba. Dorr II (1969) incluiu na base desta série o Grupo Tamanduá. Ladeira (1980), sugere a mudança de nome de Série Minas para Supergrupo Minas, como é conhecido atualmente. O contato do Supergrupo Minas com o Supergrupo Rio das Velhas é discordante e na maioria dos afloramentos é tectônico, mas a extensão e o grau da discordância é difícil de se estabelecer com precisão em todas as localidades (Dorr II, 1969).

Grupo Caraça

Harder & Chamberlin (1915) definiram o Quartzito Caraça e Dorr II (1969) elevou-o à Grupo Caraça. Este é constituído de sedimentos clásticos e divide-se nas Formações Moeda e Batatal.

A Formação Moeda, no Sinclinal homônimo, apresenta grande variação litológica. Constitui-se de metaconglomerados oligomíticos e polimícticos, geralmente piritosos, quartzitos grosseiros a finos e filitos laminados.

A Formação Batatal é constituída por filito, filito carbonoso, subordinadamente metachert e formação ferrífera de fácies óxido. A espessura média do Formação Moeda é de 200m, mas pode atingir 1.000m na Serra da Moeda (flanco leste), enquanto que a espessura da Formação Batatal é inferior a 50m (Barbosa, 1968).

Grupo Itabira

O Grupo Itabira é formado por sedimentos químicos, encontrando-se separado do Grupo Caraça por contato gradacional. Este grupo é subdividido nas Formações Cauê e Gandarela. A Formação Cauê é formada de itabirito, itabirito dolomítico e itabirito anfibolítico, com poucas lentes de filito e margas. A Formação Gandarela é formada por dolomitos, itabiritos dolomíticos, itabiritos e filitos dolomíticos (Dorr II, 1969).

A espessura deste grupo pode ser superior a 1.000m, mas geralmente não ultrapassa 200m (Barbosa, 1968).

Grupo Piracicaba

O Grupo Piracicaba foi definido por Dorr II *et al.* (1957) e corresponde à parte superior do Supergrupo Minas, que sobrepõe-se ao Grupo Itabira em uma discordância erosiva. Consiste de rochas sedimentares clásticas e químicas, variando de conglomerado fino a lentes de dolomito e formação ferrífera. Estes sedimentos estão em geral no fácies xisto verde. Embora alcancem baixo grau metamórfico, eles se encontram freqüentemente bastante deformados e cisalhados.

O grupo é dividido em cinco formações, com a Formação Cercadinho na base e a Sabará no topo:

- A Formação Cercadinho foi descrita por Pomerene (1958), e é formada por quartzito ferruginoso interacamadado, quartzito, filito ferruginoso, filito e pequenas lentes de dolomito. Os filitos são as rochas mais abundantes, sendo o prateado o mais característico. Ele é formado por sericita e hematita, com pouca presença de quartzo e se encontram orientados segundo a foliação.
- A Formação Fecho do Funil foi denominada por Simmons (1958) e é formada por filito dolomítico marrom e cinza escuro, dolomito argiloso e silicoso, filito cinza e róseo, localmente silte.
- A Formação Taboões foi denominada por Pomerene (1958), e é composta de quartzito cinza de granulação fina e grãos subarredondados a subangulosos (provavelmente metachert), constituído por 98,5% de SiO₂. Pode se apresentar duro e com aspecto vítreo.
- A Formação Barreiro, também denominada por Pomerene (1958), é predominantemente formada de filito rosa e cinza claro e por filito grafitoso preto e cinza escuro. Seu contato com a F. Taboões é gradativo ou bem marcado. O filito grafitoso tem teores de carbono variando de 1,5 a 4,4%.
- A Formação Sabará corresponde ao topo do grupo e tem uma distribuição restrita. É a unidade de maior espessura do Supergrupo Minas, podendo alcançar 3.000 a 3.500m na Serra do Curral e Ouro Preto. É formada de mica e clorita xistos, com intercamamento de grauvaca, quartzito, tilóide, conglomerado e algumas formações ferríferas. Os sedimentos desta formação são interpretados como sendo do tipo flysch (Dorr II, 1969).

Barbosa (1968), Ladeira (1980) e mais recentemente Renger *et al.* (1994) propõem o desmembramento desta formação do Grupo Piracicaba, com conseqüente elevação da mesma ao status de grupo. Esta formação sobrepõe-se diretamente à Formação Barreiro, com discordância erosiva.

Grupo Itacolomí

O Grupo Itacolomí foi definido por Harder e Chamberlin (1915) como Quartzito Itacolomí, considerado por eles como parte da Série Minas. Dorr II (1969) considera-o como uma série separada e a divide em duas fácies, sendo uma contendo filito e a outra quartzito. Ladeira (1980) propõe a mudança de Série para Grupo Itacolomí.

Na sua localidade tipo, o Grupo Itacolomí é predominantemente composto de quartzito conglomerático e conglomerado. Dorr II *et al.* (1957) descrevem como feição característica do Grupo Itacolomí a presença de seixos grandes e blocos de formação ferrífera derivado da erosão da Série Minas.

Rochas metamagmáticas

Além das rochas descritas anteriormente, são encontradas no Quadrilátero Ferrífero rochas intrusivas, representadas por granitos, e metaultramáficas (esteatitos e serpentinitos), anfibólitos, diques máficos metamorfisados deformados ou indeformados, gabros e outros tipos de menor volume.

A suíte ultramáfica constituída pelos serpentinitos e esteatitos ocorre, com poucas exceções, associada com as rochas do Supergrupo Rio das Velhas, ou ao gnaisse granítico. Evidências sugerem uma idade Pré-Minas para essas rochas. Os diques de diabásio não foliados, correlacionados por vários autores com o Basalto do Paraná Mesozóico, ocorrem em várias centenas de quilômetros a oeste do Quadrilátero Ferrífero (Dorr & Barbosa, 1963).

4.1.2 - GEOLOGIA ESTRUTURAL

A estruturação do Quadrilátero Ferrífero resume-se a um conjunto de Complexos do tipo Granito-Gnáissicos (Santa Rita, Bonfim, Bação, Caeté e Belo Horizonte) delimitados por megassinclinais interconectados (Santa Rita, Dom Bosco, Moeda e Serra do Curral), sinclinais menores (Conta História, Ouro Fino, Alegria), anticlinais (Mariana) e megassiclinais isolados (Gandarela, João Monlevade e Itabira), com geração de zonas de cisalhamento e falhas de empurrão e transcorrentes (Falhas do Engenho, Fundão, Cambotas e "*Front*" Fazendão).

Pelo posicionamento das feições estruturais mais significativas, pode-se concluir que a porção leste do Quadrilátero Ferrífero (limitada a W pelo sistema Fundão-Cambotas), é mais deformada em relação à oeste.

Dorr II (1969), a partir do modelo geossiclinal, cita três fases de deformação: a primeira Arqueana, a segunda Pós-Minas e Pré-Itacolomi e a terceira Pós-Itacolomi, sendo responsável pelas grandes estruturas regionais.

Ladeira & Viveiros (1984) definem 6 eventos deformacionais, sendo o primeiro o único a afetar exclusivamente o Supergrupo Rio das Velhas e o segundo evento, o principal, a atingir o Supergrupo Minas, com dobramentos isoclinais recumbentes e cavalgamentos. É proposto um modelo tridimensional integrado, onde os sinclinais Moeda, Dom Bosco, Santa Rita e Gandarela, bem como a faixa ao longo da Serra do Curral, constituíram um sinclinal pretérito recumbente, estruturado na primeira fase deformativa do Supergrupo Minas (D₂) e recoberto nas fases seguintes.

Marshak & Alkmim (1989) definiram quatro eventos deformacionais para o Supergrupo Minas, sendo três compressivos e um extensivo. O primeiro evento, ocorrido no

Proterozóico Inferior, foi responsável pela geração de dobras cisalhantes e de grandes estruturas sinformais de direção NE-SW e vergência para NW. O segundo é constituído de falhas reversas, dobras fechadas com planos E-W a ESE-WNW, soerguidos no Complexo Bação. Um terceiro evento de carácter extensional consistiu na formação de falhas normais rúptil-dúctil de alto ângulo. O último evento foi compressional e ocorreu no Proterozóico Superior, sendo relacionado também ao *fold-thrust belt*.

Belo de Oliveira (1990), compartimenta o Quadrilátero Ferrífero em três domínios - um oriental com uma fase Brasiliana, um mediano com uma deformação principal Transamazônica e um ocidental Brasileiro, com deformação principal Transamazônica e evidências de uma deformação Arqueana afetando apenas o Supergrupo Rio das Velhas.

Chemale Jr. *et al.* (1991) apresentam a evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero como resultado principalmente da ação de dois eventos deformacionais. O primeiro de carácter extensional e o segundo compressional, de idades do Proterozóico Inferior e Superior, respectivamente. O primeiro foi responsável pela formação dos megassinclinais interconectados e dos sinclinais isolados, além dos soerguimentos dos complexos granito-gnáissicos. Durante este evento se desenvolveram megazonas de cisalhamento extensionais, identificadas ao longo do contato entre terrenos granito-gnáissico e rochas supracrustais do Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupo Minas.

O segundo evento, compressional, afetou principalmente a porção leste do Quadrilátero Ferrífero. Este é associado ao fechamento do proto-oceano Brasileiro/Africano, a leste do Quadrilátero Ferrífero, constituindo a porção intermediária a distal de um cinturão de vergência para oeste. Este evento é ativo principalmente nas rochas supracrustais e ao longo do contato delas com os Terrenos Granito Gnáissicos. Os blocos do embasamento atuariam como contrafortes e ou canalizadores de deformação, sendo os megassinclinais amplificados e rotacionados, reativando ainda as zonas de fraqueza pré-existentes.

4.1.3 – METAMORFISMO

Para Dorr & Barbosa (1963) e Dorr II (1969) o metamorfismo no Quadrilátero Ferrífero foi dinâmico-termal. O metamorfismo foi o responsável pelas transformações de argilito em filito, rochas tufáceas em xistos verdes, arenitos em quartzitos e formação ferrífera em itabirito. O metamorfismo termal é comum no contato de rochas sedimentares com corpos intrusivos, onde são observados auréolas de contatos (Dorr II & Barbosa, 1963).

No Supergrupo Minas o grau metamórfico varia de fácies xisto verde a anfibólio-almandina e aumenta de SE para E. A variação do grau metamórfico depende da posição regional e da proximidade com os corpos graníticos intrusivos (Dorr II, 1969).

Hertz (1978) propõe metamorfismo de alto grau com retrometamorfismo de fácies xisto verde para a parte NW do Quadrilátero Ferrífero. Para a parte SW, propõe o metamorfismo variando de fácies xisto verde a fácies anfibolito baixo. Próximo ao contato dos corpos intrusivos graníticos, ocorre nos xistos do Supergrupo Rio das Velhas e do Minas paragêneses típicas de metamorfismo de contato.

Nas unidades pelíticas das seqüências supracrustais, ao redor dos Complexos do Bação e Bonfim, há auréolas de contato em condições metamórficas variando do fácies xisto verde a anfibolito (Jordt-Evangelista *et al.*, 1992 *in* Chemale *et al.*, 1994). Estas condições metamórficas foram geradas durante o soerguimento destes complexos, na fase de tectônica extensiva (Chemale *et al.*, 1994). Já nas zonas de cisalhamento dúcteis extensionais, ocorrem paragêneses da fácies xisto verde baixa (clorita+quartzo+sericita+opacos).

Carneiro *et al.* (1995) atribuíram aos Supergrupo Rio das Velhas e Minas metamorfismo de condições de fácies xisto verde. A intensidade do metamorfismo do Supergrupo Minas aumenta rapidamente na direção SE a E, alcançando o fácies anfibolito alto na altura de Nova Era.

Schrank & Souza Filho (1998) afirmam que o último episódio tectonotermal arqueano gravado nos terrenos granito gnáissicos foi o evento metamórfico de alto grau Belo Horizonte, que afetou o Complexo homônimo em 2.860 $\pm$ 14/-10 Ma. Por volta de 2.059 Ma, estes autores postulam que o embasamento sofreu fusão, promovendo intrusões nas rochas supracrustais e causando metamorfismo de alto grau nestas encaixantes.

4.2 – ASPECTOS GEOLÓGICOS LOCAIS: ARREDORES DA JAZIDA DO CUMBI

4.2.1 - ESTRATIGRAFIA E PETROGRAFIA

Na área estudada podem ser descritos quartzitos, filitos e dolomitos. O filito é a litologia predominante na região, contendo lentes dolomíticas e, subordinadamente, quartzitos.

Os quartzitos e filitos ferruginosos pertencem à Formação Cercadinho. O quartzito tem granulação variando de muito fina a média, com coloração variando de cinza claro a avermelhada. O acamamento é truncado por *sets* de quartzito de granulação média. Ocorrem também intercalações de filitos cinza e quartzitos ferruginosos de cor cinza escuro e granulação grossa. Os filitos ferruginosos ocorrem em pacotes intercalados aos quartzitos, com aproximadamente 15m de espessura, possuindo uma clivagem de crenulação bem marcada.

Os filitos cinza e lentes dolomíticas pertencem à Formação Fecho do Funil. Nos filitos cinza é característica a presença de magnetita e alguns sulfetos. Este também se encontra bastante dobrado, apresentando-se crenulado em algumas porções. Os dolomitos tem coloração cinza, bege e vermelho, matriz muito fina e apresentam estruturas estromatolíticas e bandadas. Os estromatólitos são construções algais, que se desenvolvem em ambientes de águas rasas, podendo ser do tipo colunar ou em esteira.

Os quartzitos pertencentes à Formação Taboões estão intercalados aos filitos e sua espessura não ultrapassa 25m. Sua coloração é cinza ou varia também de bege a amarelo, com granulação fina a média.

Os filitos grafitosos (formados em ambiente rico em matéria orgânica) a cinza claros da Formação Barreiro tem granulação fina e encontram-se intemperizados.

Os mica e clorita xistos da Formação Sabará não afloram na área em estudo.

Nas frentes de lavra (aproximadamente entre as cotas 1.120 e 1.180m) são extraídos dolomitos da Formação Fecho do Funil, sendo que estas lentes estão ora em contato brusco (principalmente com os filitos prateados ferríferos), ora em contato difuso com os filitos cinza a cinza-azulados (**foto 4.1**). Pode-se também observar dolomitos claros intercalados com filito cinza em faixas variando de poucos milímetros até cerca de 30cm (**foto 4.2**).



Foto 4.1: Lentes de dolomito na principal frente de lavra (Lapa). Na lente superior esquerda observa-se um contato difuso entre o filito cinza-azulado e a lente dolomítica.



Foto 4.2: Dolomitos claros intercalados com filito cinza (paredão sul - Lapa).

Já aproximadamente entre as cotas 1.160 e 1.260m, afloram tanto filitos prateados, quanto filitos cinza escuro (carbonosos) e lentes de quartzitos e dolomitos de pequeno a médio porte. Não foi possível determinar com precisão, através do uso do *GPR* e por meio de observações de campo, as dimensões e continuidade das lentes de dolomito na área da pedreira.

Os dolomitos descritos têm cores variando de bege a vermelho escuro, apresentando-se por vezes bandados. Para fim de planejamento de lavra, não foi possível mapear as variações dos padrões texturais e de cores do maciço dolomítico por estes estarem condicionados à história estrutural em conjunto com o processo de dolomitização. No acompanhamento da lavra, pode-se observar bruscas mudanças de tonalidade (bege para vermelho) ocorrendo em trechos de aproximadamente 3m.

Com exceção dos dolomitos bandados, todos os outros tipos apresentam estruturas estromatolíticas colunares, que são mais visíveis nos tipos avermelhados. As diferenças de tonalidade nos dolomitos são interpretadas por Pires & Fraga (1989) como resultado da exposição dessa rocha a um ambiente oxidante (tipo vermelho), redutor (tipo bege) ou a seus correspondentes estados de oxidação-redução intermediários (resultando em tons claros a róseos).

Segundo estes autores, os tipos cinza e cinza claro estão relacionados aos ambientes anóxicos (redutores), tendo sido formados em um paleoambiente mais profundo, podendo apresentar sulfetos (pirita). Este tipo pode estar geneticamente ligado aos filitos carbonosos, que estariam posicionados estratigraficamente acima dos dolomitos.

Já os tipos intermediários (bege claro, salmão), se formaram em uma zona de transição, podendo conter óxidos de ferro (magnetita-martita). Os tipos vermelhos são formados em meio óxido, de uma zona mais rasa, podendo conter cristais de hematita. Nesta zona a concentração de material carbonoso é mais baixa (**figura 4.3**).

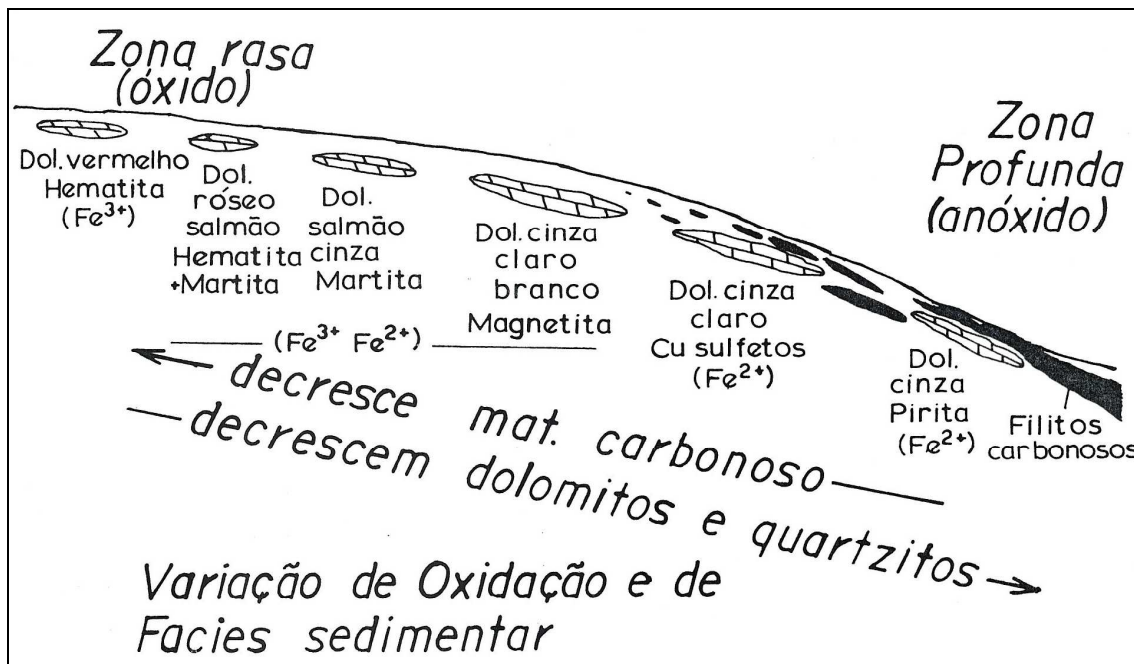


Figura 4.3: Variação do ambiente de formação em função do padrão de cor dos dolomitos do Sinclinal Dom Bosco (modificado de Pires & Fraga;1989).

Dardenne & Campos Neto (1975), que descreveram pela primeira vez os estromatólitos do Cumbi, dividiram-os em dois tipos:

Tipo A: Caracteriza-se por colunas finas e estreitas (mm-cm), ligeiramente onduladas, pouco espessadas e com até 1m de altura. Este tipo corresponde ao dolomito conhecido comercialmente como “Pink Pele de Onça”.

Tipo B: Predomina nos dolomitos cinza da base, formando colunas mais largas (4-5cm), curtas (20-50cm) e ramificadas. É encontrado ainda nos dolomitos vermelhos (“Jacarandá”), como pode ser observado na **foto 4.3**.

Estes autores fazem uma tentativa preliminar de classificação baseada em Raaben (1969), definindo os estromatólitos do tipo A como pertencentes ao Supergrupo dos Kussielides e os do tipo B, aos Tungussides. Pinto (1984), retoma os estudos e propõe uma reclassificação dos estromatólitos da Série Minas.

Nas observações microscópicas feitas nos dolomitos, nota-se com freqüência duas faixas distintas: uma sericítica/quartzosa e outra carbonática. O contato é muitas vezes retilíneo, com presença de cristais de quartzo e sericita orientados paralelos a este. Há planos micáceos muito bem definidos, com faixas de sericita crenuladas em certas regiões.

Estes padrões descritos se repetem em escala macroscópica. Devido ao dobramento apertado, porções dolomíticas de aspecto alongado estão intercaladas com filito cinza (**foto 4.4**).

São observadas em algumas lâminas de dolomito minerais opacos; em amostras de mão de filitos cinza, que estão em contato com dolomitos bege a avermelhados, observam-se cristais de magnetita, que podem indicar um ambiente de transição (oxidante/redutor).

Descrições dos litotipos da região de Cachoeira do Campo, acompanhadas de análises químicas, podem ser encontradas em Johnson (1978).

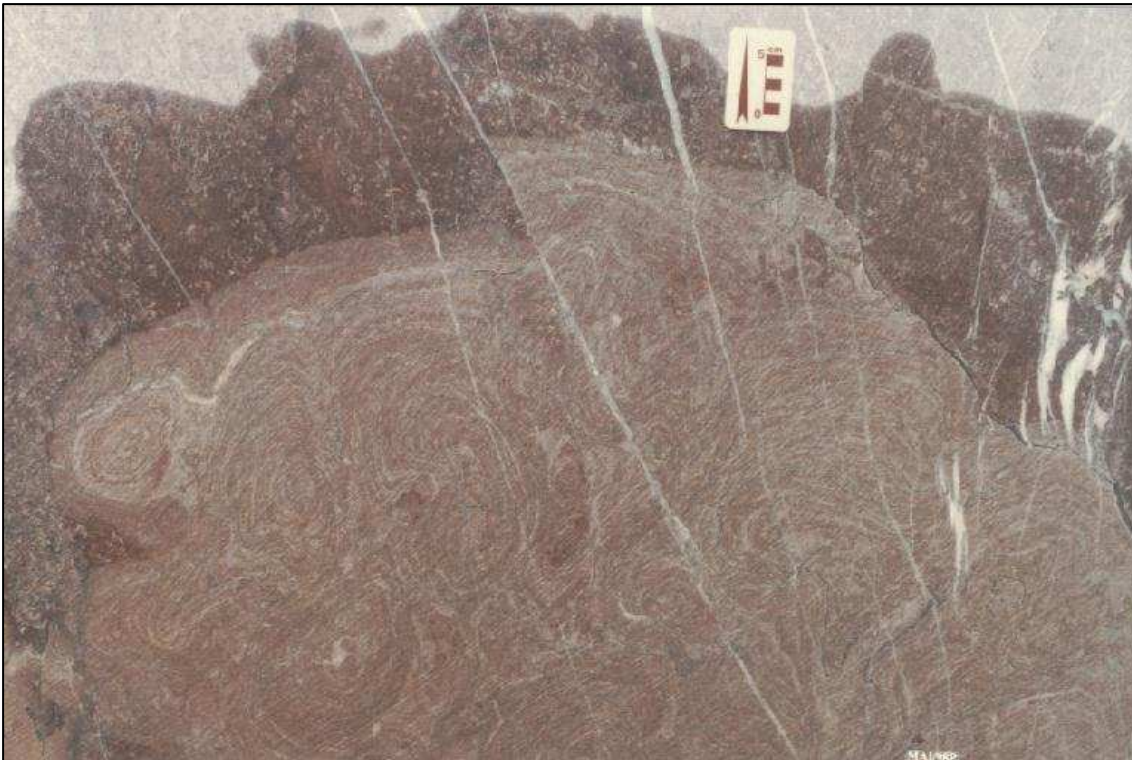


Foto 4.3: Vista de seção basal de estromatólitos de colunas largas, cortados por veios de calcita, envoltos por um dolomito apresentando pequenos intraclastos.



Foto 4.4: Reprodução em escala macroscópica do condicionamento estrutural de amostras analisadas ao microscópio.

4.2.2 - GEOLOGIA ESTRUTURAL

A grande feição que condiciona o padrão estrutural do local da pedreira é o Sinclinal Dom Bosco, cujo eixo tem direção leste-oeste e está situado a sul da jazida do Cumbi. Isso portanto condiciona o mergulho geral da foliação para sul, como de fato ocorre na área.

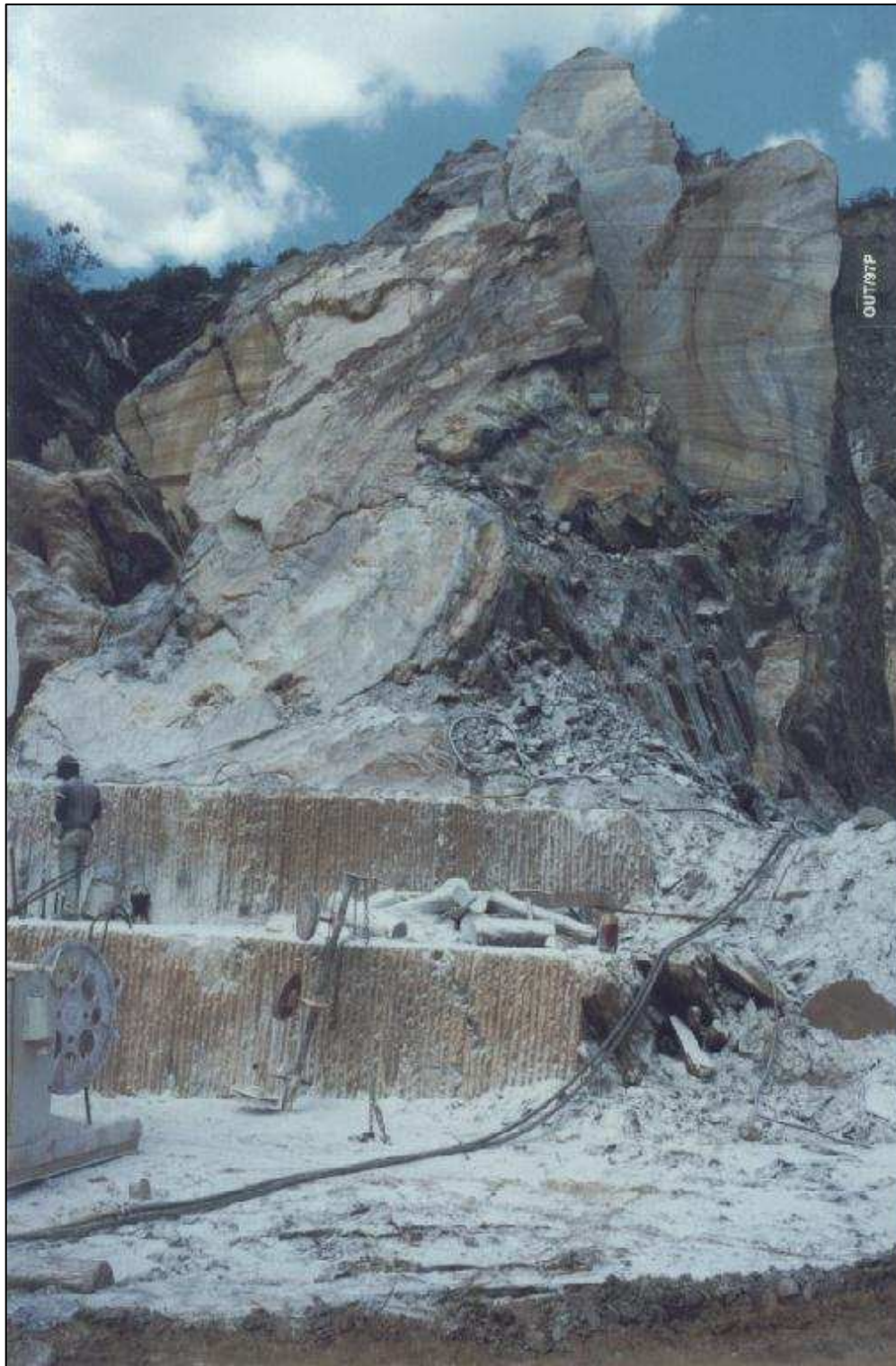
Trata-se de uma região muito deformada, com presença de dobras apertadas, fluxo de material dos flancos para o plano axial das dobras e falhas de empurrão. A vergência (sentido do movimento relativo) das dobras de pequeno até grande porte é, a grosso modo, para norte.

Para o entendimento do modelo geológico-estrutural da pedreira, foram coletados dados também nas suas imediações. Com base nestes dados foram feitos estereogramas (rede de Schmidt-hemisfério inferior), que visam principalmente melhorar o entendimento da compartimentação dos corpos dolomíticos em relação aos filitos adjacentes.

As lentes de dolomito têm uma direção média E-W na jazida, estando as camadas de filito dobradas, envolvendo-as (**foto 4.5**). A deformação sofrida pelos dolomitos sem estruturas sedimentares preservadas não é muito bem marcada. Já nos dolomitos dobrados estromatolíticos, sua deformação fica mais evidenciada. Os filitos apresentam uma xistosidade penetrativa, que podem permitir uma indicação mais clara da deformação sofrida.

No estereograma da **figura 4.4** está representado o diagrama de contorno dos pólos dos planos de foliação para diferentes litotipos que ocorrem na área e arredores. As curvas representam 8.48%, 7.14%, 5.80%, 4.46%, e 3.12% dos dados analisados (n=224). Nele pode-se visualizar dois máximos que definem uma guirlanda, indicando planos de direção aproximada E-W, mergulhando para S e, subordinadamente, para N. A atitude média da foliação do Cumbi é 150/36 e seu máximo é 160/48 (máximo secundário=25/28). Este estereograma reforça a idéia de uma seqüência de dobras de diferentes portes, com vergência para norte.

Ocorrem ainda na área zonas de cisalhamento métricas norte-sul (filito do Cumbi do Meio) e empurrões para oeste (filito/dolomito abaixo da casa do Guarneri).



N

S

Foto 4.5: Relações de contato estrutural entre o filito e o dolomito, com dobras apertadas envolvendo quase todas as lentes de dolomito.

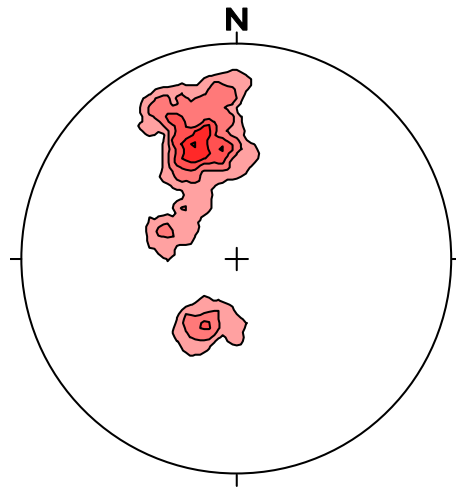
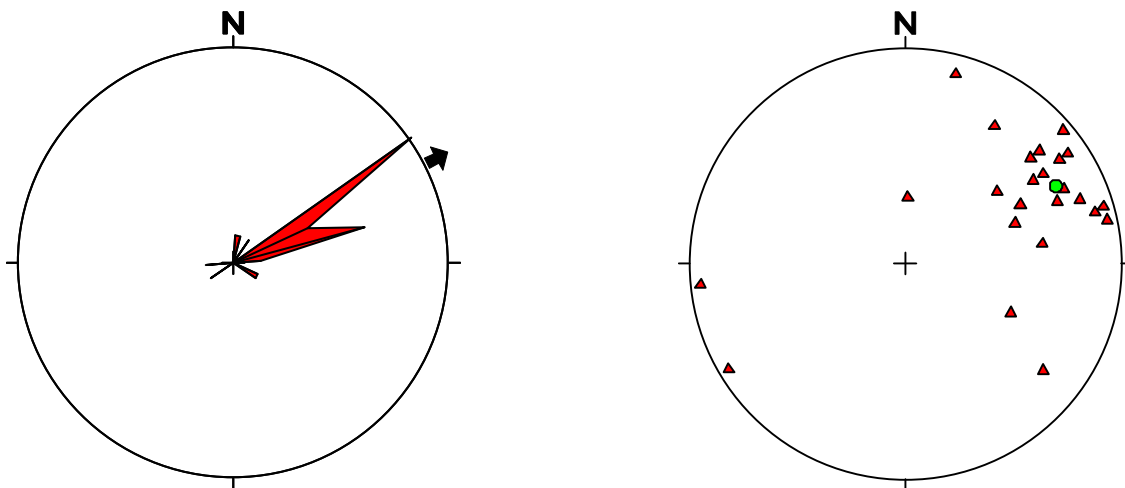


Figura 4.4: Diagrama de contorno da foliação de todo o Cumbi; máximo 160/48. (n=224; curvas representando 8.48%, 7.14%, 5.80%, 4.46%, e 3.12%)

Os eixos das dobras (**figura 4.5**) indicam caimento principal para E-NE em quase toda a área. Estes dados podem ser correlacionados aos máximos do diagrama de contorno da foliação, indicando uma zona de dobramento com seus dois flancos bem definidos e apresentando assimetria. A atitude média desses eixos é 61/29 (ponto verde no esterograma).



Figuras 4.5: Eixos de dobras (n=24) representados no diagrama em roseta (seta indica a direção média do eixo) e através de pólos (círculo verde indica a média dos valores=61/29).

Os dados de lineação de crenulação (**figura 4.6-esquerda**) estão dispersos ($n=7$), não permitindo maiores conclusões. Os dados de lineação mineral de cristais de sericita (**figura 4.7-direita**) apresentam caimento médio para leste (76/30) e pouca dispersão ($n=9$). A lineação mineral foi impressa possivelmente pelos empurrões de sentido oeste.

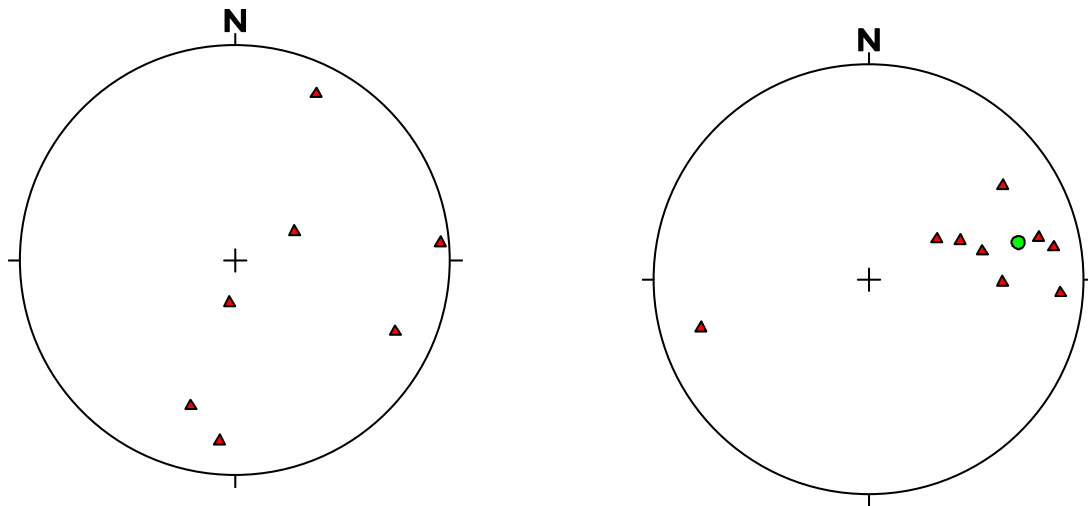


Figura 4.6 (esq.): Lineação de crenulação dispersa (esquerda; $n=7$).

Figura 4.7: *Lineação mineral, com ponto verde indicando valor médio 76/30 ($n=9$).*

O estereograma da **figura 4.8** (fraturamento) mostra 2 famílias principais de fratura (máximos 191/83 e 283/56). Pode-se considerar ainda uma terceira família (350/85), embora esta não seja muito representativa e se encontre dispersa. No diagrama de contorno as curvas representam 7.32, 6.10, 4.88 e 3.66%. Os encavernamentos observados no maciço (**foto 4.6**) tem paredes com direção aproximada E-W, que correspondem a uma família de fraturas de alto caimento (191/83), podendo-se concluir que através desta família é que se desenvolve as maiores dissoluções no dolomito. Isso é de grande importância para o planejamento de lavra e de pesquisa, pois permite prever zonas mais susceptíveis ao intemperismo, que são indesejáveis neste tipo de atividade minerária.

Uma descontinuidade importante é a clivagem plano axial impressa no filito e, secundariamente, no dolomito (158/60). Este plano de fraqueza estrutural no dolomito está alterado ou preenchido por veios de calcita, formando uma direção secundária de encavernamento.

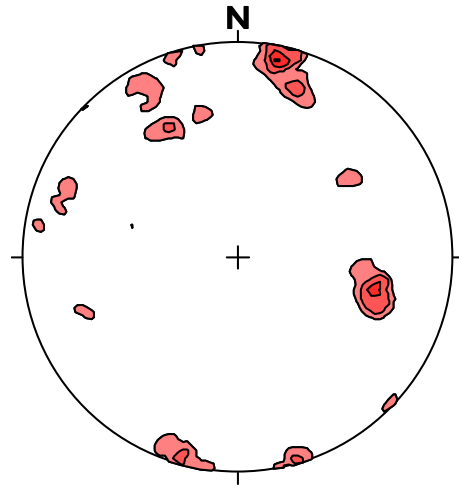


Figura 4.8: Diagrama de contorno de fraturas (n=82) da área do Cumbi; máximos 191/83 (família 1) e 283/56 (família 2). (curvas representam 7.32, 6.10, 4.88 e 3.66%)

Com o estudo microscópico pôde-se descrever elementos estruturais como crenulações, sigmóides de quartzo e, principalmente, referendar dados em escala macroscópica, que também indicam, em alguns casos, a presença de uma foliação principal e de uma clivagem relacionada ao dobramento. Esta clivagem plano axial está associada tanto a dobras de médio (**foto 4.7**) quanto a de grande porte (aquelas que envolvem as lentes de dolomito), sendo que nas dobras maiores a foliação original tende a não ser totalmente transposta pela clivagem plano axial.

A interpretação dos dados de fraturamento e foliação, com base na disposição dos litotipos, é tão importante na definição do modelo estrutural da área, quanto no estudo geotécnico de estabilidade de taludes da mina. O fenômeno de relaxamento do maciço devido a extração será comentado no item 5.2.

Apesar deste estudo geotécnico não fazer parte do escopo deste trabalho, os dados das descontinuidades coletados poderão ser úteis. Pode-se observar que alguns taludes da pedreira merecem um estudo de estabilidade devido às condições desfavoráveis em que se encontram. Os taludes mais altos da mina foram cortados em filitos com diferentes graus de decomposição e fraturamento, com a possibilidade de formação de cunhas e rupturas do tipo plana ou circular. O filito apresenta em geral nestas condições baixos valores de coesão e ângulo de atrito. Portanto, a falta de informações hidrogeológicas e geomecânicas, a presença de faces dos talude de alta declividade já erodidas e a deficiência de bermas de segurança são fatores que corroboram para a sugestão deste estudo.



N

S

Foto 4.6: Direção de encavernamento associada principalmente à família de fratura 1 (191/83). Afloramento tem aproximadamente 30m de altura e se localiza atrás da serraria.



NW

SE

Foto 4.7 : Dobra em filito ferruginoso, com clivagem plano axial bem penetrativa. Os flancos tem atitudes médias de $S_n/S_0=130/80$ e $140/45$, com eixo $52/40$.

4.2.3 - GEOLOGIA ECONÔMICA

Conforme levantamento feito no Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), no município de Ouro Preto os principais bens minerais em pesquisa ou em produção são as gemas (principalmente o topázio imperial), ouro, ferro, manganês, mármore/dolomito, esteatito, quartzito, areia e argila. São relatadas ocorrências também de metais básicos (Zn, Cd, Co), cinábrio (minério de Hg) e cristais de rocha.

Todas as áreas adjacentes à concessão de lavra do Cumbi, que é datada de 1942, estão ocupadas por processos que vão desde pedidos de pesquisa até concessões de lavra. As áreas destes processos variam de 13ha a 1492,59ha.

Como mencionado anteriormente, a atividade mineraria tem um papel importante na economia local. A possibilidade do desenvolvimento de novos projetos na região depende da negociação direta dos detentores das concessões de pesquisa e/ou lavra com os grupos interessados em fazer tal tipo de investimento.

A potencialidade da região para rochas ornamentais pode ser considerada grande. Johnson (1955) mapeou a quadrícula Dom Bosco e Ouro Branco, na qual se insere a jazida do Cumbi. Este mapa mostra as grandes ocorrências de dolomito nos Morros do Gabriel e do Bule, a sudoeste e sul do Cumbi, respectivamente. Em 1978 este autor publicou o relatório correspondente a este trabalho do convênio USGS / DNPM.

Ao longo de alguns trechos da Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) é possível encontrar áreas de empréstimo desenvolvidas em rocha dolomítica de cor cinza (corresponde aos trechos mais profundos, onde ocorria reações de redução). É possível que estratigraficamente acima destas ocorrências encontrem-se os fácies oxidantes avermelhados, bem como os dolomitos de cor bege claro.

A singularidade dos dolomitos do tipo aurora deve-se à presença de colunas estromatolíticas e a variação de seus tons entre vermelho e bege, sendo este último o mais procurado. Um critério prospectivo simples baseia-se na localização de dois horizontes-guia: os quartzitos ferruginosos da Formação Cercadinho, na base, e os quartzito cinza (F. Taboões) e os filitos cinza escuro (carbonosos) da Formação Barreiro, acima. Em relação às cores, os tipos avermelhados estão ligados a zonas oxidantes e portanto, nas porções superiores das lentes dolomíticas.

5 - JAZIDA DE DOLOMITO DO CUMBI

No Quadrilátero Ferrífero, dolomitos destinados ao mercado de rochas ornamentais são explotados apenas na pedreira do Cumbi. No entanto, podem ser encontradas rochas dolomíticas em Casa de Pedra, município de Congonhas, destinadas principalmente para a fabricação de cal. Pode-se ainda encontrar dolomito em Dolores do Campo, Capoeira Grande, Mata do Ribeirão, Mamona, Belo Horizonte e Pedra Branca, entre outras localidades (Radambrasil, 1983). No município de Ouro Preto, além do Cumbi, foram identificadas reservas consideráveis em São Julião e Usina.

O PROCESSO DE DOLOMITIZAÇÃO

Para um melhor entendimento do processo de formação dos dolomitos, foram resumidos os principais pontos relacionados às reações químicas e aos ambientes em que elas ocorreram.

Segundo Lippmann (1973) o dolomito, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, é o segundo mineral em importância depois da calcita em rochas carbonatadas. Embora os dois minerais possam ser encontrados associados em calcários dolomíticos, a maioria dos dolomitos ocorrem em corpos monominerálicos. O problema da gênese tanto do mineral quanto da rocha intriga os cientistas desde os primórdios da geologia. Este persiste ainda hoje por duas razões principais:

1. Embora seja de composição simples, não foi possível sintetizar o mineral a partir de soluções apropriadas desde a temperatura ambiente até a mais de 100°C ; ou seja, temperaturas características do ciclo sedimentar.
2. A dolomita é rara em sedimentos recentes e Pleistocênicos em relação a quantidade total de sedimento carbonatado destas idades e também em comparação com a abundância de dolomita em rochas sedimentares mais antigas.

Foram encontrados no sul da Austrália e no Golfo Pérsico dolomitos em sedimentos carbonatados sub-recentes, que apresentam tamanho de grão de alguns micra e foram identificados através de Difração de Raios-X. Um ponto de concordância e fator importante para sua formação é que haja um suprimento suficiente de Mg, com contribuição da evaporação. Mas se estes fossem os únicos fatores, a formação de dolomito em sedimentos sub-recentes deveria ser bem maior do que ela realmente o é.

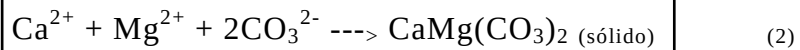
O que pode ser deduzido deste modo de ocorrência de dolomitos sub-recentes é a confirmação da velha hipótese que o dolomito não precipita ou cristaliza diretamente da água do mar, mas se forma da reação de soluções derivadas da água do mar com carbonatos de cálcio previamente formados. O principal critério de campo para a

identificação de corpos dolomíticos é a observação de uma linha em sua superfície parcialmente paralela às estratificações primárias.

A generalização das equações de reação propostas por Haidinger e Marignac (*in* Lippmann, 1973) é a seguinte:



Esta reação não pode ser considerada como o mecanismo de reação, mas apenas uma descrição da transformação de todo o material na dolomitização. O único mecanismo possível é:



Vários estudos de laboratório mostraram a impossibilidade de se formar dolomita no sistema sulfeto e abaixo de 120°C em curtos espaços de tempo (Lippmann, 1973).

A partir dos experimentos de laboratório concluiu-se que a dolomita natural deveria ser formada a partir de 100°C Krauskopf (1910). Isso implicaria na necessidade de um empilhamento de alguns milhares de metros, considerando gradientes geotérmicos normais. Nessa profundidade o suprimento de Mg necessário para a dolomitização se torna um grande problema, como também a remoção do cálcio liberado pela reação (ver equação da reação 1), além da impermeabilização de camadas. Portanto seriam esperadas camadas dolomíticas superiores gradando para calcários com o aumento da profundidade. Os freqüentes contatos bruscos entre dolomitos e calcários seriam inexplicáveis através desta teoria de dolomitização hidrotermal em camadas profundas. Em vista disso, a dolomitização deve ocorrer em baixas temperaturas, contrariando as observações de laboratório.

A dedolomitização é uma reação hipotética reversa à apresentada acima (1). Assume-se que a dolomita é convertida para carbonato de cálcio, geralmente calcita, sob a influência de soluções ricas em cálcio. O livro *Diagenesis* (1988) apresenta a evolução dos conhecimentos científicos a respeito do processo de dolomitização. Um livro de referência neste assunto é o de Krauskopf (1910).

5.1 - CARACTERÍSTICAS DA ROCHA

Os tipos comerciais em exploração na pedreira do Cumbi são os dolomitos “Aurora Pérola”, “Aurora Prata”, “Jacarandá”, “Pink”, “Pink” Claro e Escuro e “Pele de Onça” (**foto 5.1**). Suas colorações são, respectivamente, bege, acinzentado, vermelho e rosado com porções claras.

Devido à sua gênese, os litotipos dessa jazida possuem variações de suas propriedades tecnológicas, de cor e textura, de acordo com a frente de lavra em que é extraído. Essas variações são relacionadas ao ambiente sedimentar original de formação e aos processos genéticos ocorridos. Em determinadas porções ocorriam reações de oxidação ou redução, enquanto que em outras a dolomitização era mais ou menos intensa. Por este motivo, o Mármore Aurora Pérola e os outros tipos comercializados no Cumbi são classificados como claro, escuro, etc.

Os dolomitos dessa pedreira vem sendo explorados há aproximadamente 60 anos, sendo encontrados em muitas edificações mais “antigas” de Belo Horizonte. Não é notado nenhum tipo de reação de intemperização química mais intensa que venha a afetar o padrão do material. Ocorre em alguns casos desgaste e perda de brilho em pisos e escadas nas áreas sujeitas a intenso tráfego de pedestres. Este desgaste é resultante do atrito com essas rochas carbonáticas, que possuem minerais de dureza mais baixa (em torno de 3 a 4 na escala de Mohs). Ocorre ainda perda de material em escadarias, com a quebra e afinamento das superfícies livres. Esta quebra pode ser influenciada pelas técnicas de extração e características estruturais da rocha, que será melhor detalhada no ítem seguinte. A textura da rocha é marcada por duas anisotropias principais, que se relacionam às estruturas estromatolíticas e ao plano de foliação, que é preenchido em geral por sericita. A persistência destes planos sericíticos é maior que 50cm e seu espaçamento médio é de 5cm. Ocorrem também veios carbonáticos claros, milimétricos a centimétricos, que cortam todos os tipos de dolomitos presentes.

Por este motivo, a direção de corte definida na fase de lavra é em função das possibilidades de avanço de lavra ou das direções das descontinuidades. Na serraria a direção de serrada é determinada somente pela geometria dos blocos, não importando, por exemplo, se os estromatólitos vão ser cortados no seu plano axial ou basal. Este procedimento pode produzir chapas com estromatólitos arredondados ou “estirados”. A superfície da rocha não apresenta em geral cavidades, não sendo necessário portanto o preenchimento por massas (masticagem).

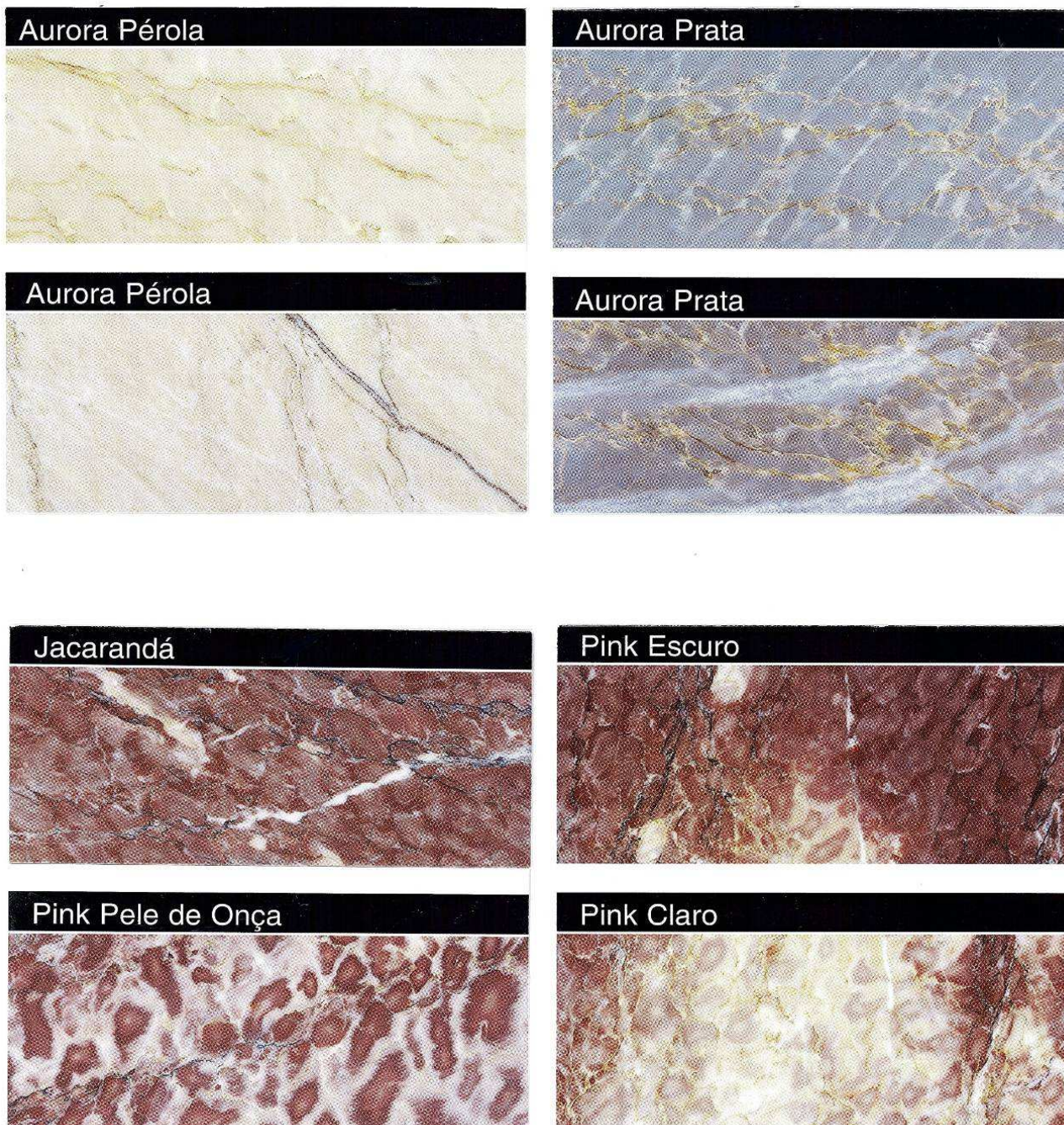


Foto 5.1: Nome comercial dos litotipos extraídos da jazida do Cumbi.
(FONTE: Catálogo Minas Pérola)

5.2 – MÉTODOS DE EXTRAÇÃO E BENEFICIAMENTO

Na pedreira do Cumbi foi adotada por muitos anos a lavra com uso de explosivos, que provocou e/ou contribuiu para o fraturamento e relaxamento de porções do maciço (principalmente ao longo de suas descontinuidades). Há registro de um bloco deslocado em até 3cm, que certamente foi facilitado pelo relaxamento do maciço, aliado aos processos gravitacionais naturais de acomodação devido ao desconfinamento deste. Este fenômeno parece ser lento, progressivo e relacionado à instabilidade geotécnica de um bloco, diferindo do fenômeno que se observa no pólo produtor Centro-Oeste. Lá, as tensões virgens dos maciços são altas e sujeitas a um rápido desconfinamento dependendo da direção de avanço da lavra, provocando fraturas e chegando até a inviabilizar algumas pedreiras.

No Cumbi são explotadas várias frentes de lavra simultaneamente, denominadas Lapa (principal), Cumbi do meio, esquerdo e direito.

Na Lapa, a lavra desenvolvida é de maciço a céu aberto, em degraus múltiplos largos. Nesta técnica o tombamento é feito em bancadas baixas, sucessivamente ao longo de vários pontos do maciço, em direção às cotas mais elevadas (**foto 5.2**).



Foto 5.2: Frente de lavra Lapa, em degraus múltiplos largos.

Depois do tombamento das bancadas é feito o desdobramento dos blocos, que tem dimensões aproximadas de 2,9x1,4x1,1m (6m³). Nas frentes Cumbi do meio, esquerdo e direito a lavra é feita a céu aberto, em degraus únicos sucessivos.

Essa pedreira tem sido explotada por mais de 50 anos. Em vista disso, já foram utilizadas ao longo do tempo várias técnicas de corte, desde o fio helicoidal e o corte em costura com explosivos até o fio diamantado.

Atualmente no Cumbi os explosivos não são utilizados para seccionar blocos, e sim para “limpar” algumas frentes de lavra.

A técnica do corte com fio diamantado vem sendo empregada com sucesso, com liberação de bancadas de até 1,5m de altura e 20m de largura, com pouca perda de material e alta velocidade de corte ($7\text{m}^2/\text{h}$). Para os dolomitos, o rendimento do corte com fio diamantado é de aproximadamente $30\text{-}40\text{m}^2/\text{m}_{\text{fio}}$.

Depois de liberadas as faces da bancada, elas são subdivididas por marteletes percursivos em faixas menores e tombadas. Essa porção é então cortada em blocos nas dimensões finais, prontos para serem deslocados para o “pau de carga” (**foto 5.3**) e embarcarem por caminhão para a serraria.

PROCESSO DE BENEFICIAMENTO:

O maquinário básico empregado na pedreira para a extração consiste de compressores, marteletes, máquina de fio diamantado, pás carregadeiras, retroescavadeira e caminhões. O corte com fio diamantado pode ser feito tanto em paredes verticais (**foto 5.4**), quanto na base das bancadas.

O galpão da serraria tem capacidade física para abrigar até 12 teares, sendo que hoje operam 5 deles. Ao lado dos teares foi implantada uma linha de beneficiamento com ponte rolante, politriz automática (**foto 5.5**), serra multidisco e serra para ladrilhos padronizados. A politriz automática instalada opera com 20 chapas rotativas de 47cm de diâmetro, onde são encaixados os satélites abrasivos e de polimento. Estes são dispostos em série, sendo que os primeiros do processo são os cabeçotes diamantados ou outro de alta abrasividade. Em uma escala de maior para menor abrasividade, eles recebem números: 60, 70, 80, 90, 220, 360, 500, 800 e 1200. O tipo 5 extra é usado para o lustro final da chapa.

As chapas beneficiadas podem possuir até 5cm de espessura e 200 cm de largura. A velocidade da esteira (20-150cm/min) e a pressão dos cabeçotes sobre a chapa podem ser reguladas, permitindo regular o consumo de abrasivo, qualidade do polimento e a tensão suportada pelo material pétreo. O consumo de água neste processo é de aproximadamente 450 l/min.

A cortadeira multi-discos instalada possui 6 cabeçotes (com discos de 35cm de diâmetro), que corta uma chapa de até 5cm de espessura, 200cm de largura e 350cm de comprimento. A esteira move a chapa de mármore de 0,5 - 5 cm/min.

A ponte rolante serve para movimentar as chapas da área de estocagem ou da politriz para as serras. Seu uso evita perdas desnecessárias com trincas nas pontas da chapa, até rupturas em toda a sua extensão.

A vantagem do projeto do Cumbi em relação à outros projetos é a sua verticalização, que possibilita o aproveitamento máximo dos blocos extraídos e das chapas defeituosas. Essas características do projeto permitem diminuir custos e implantar uma linha de produtos de tamanho padronizado, que deve ser uma tendência no mercado nacional (como já é em vários outros países).

No passado o beneficiamento dos blocos foi prejudicado pelo uso de cargas explosivas. Parte dos problemas são advindos do relaxamento de uma importante descontinuidade, que é um delgado plano sericítico (mica), que mergulha em geral para sul e marca a foliação. A foliação é a principal descontinuidade que, podendo atuar em conjunto com as famílias de fratura existentes, provoca a maioria das quebras observadas durante o corte e beneficiamento de blocos, chapas e até de ladrilhos (**foto 5.6**).



Foto 5.3: Carregamento de bloco em “pau de carga”.



Foto 5.4: Corte com fio diamantado em plano vertical.



Foto 5.5: Troca de elemento abrasivo em poltriz automática.



Foto 5.6: Trinca ao longo de fina camada de sericita, logo após o processo de polimento.

5.3 – IMPACTOS AMBIENTAIS

Os principais problemas ambientais relacionados às pedreiras de rochas ornamentais são os seus depósitos de rejeito, desmatamento e remoção de capeamento de solo, poluição do ar, sonora e visual e alteração dos parâmetros físico-químicos das águas.

No caso em questão, os rejeitos da pedreira estão sendo aproveitados em aterros, na barragem de contenção de finos, para uso direto na construção civil e como matéria-prima para a fabricação de granitina. Um impacto positivo deste projeto é o fato dele estar baseado em uma estrutura verticalizada (extração e beneficiamento), onde se agrega valor ao produto pétreo. Com isso é possível o melhor aproveitamento da jazida e do material beneficiado (menos rejeito), com uma maior geração de empregos locais e impostos.

Os desmatamentos e o decapeamento do solo não são feitos há algum tempo. Para prosseguir com o avanço da lavra, foi elaborada uma nova configuração do *pit* na área denominada lapa. Estão planejados o corte e retaludamento de uma extensão de 40m na direção leste, que também adequará melhor as condições de estabilidade geotécnica do talude. Essa operação deverá gerar a movimentação de uma significativa quantidade de solo e rocha, que serão utilizados no alteamento da barragem de rejeito.

A poluição do ar, visual e sonora são bastante pontuais, afetando a fauna, os funcionários e os pouco residentes dos arredores da pedreira. Destas, as que têm uma intensidade maior são a poluição sonora e o impacto visual. Este é passível de recuperação ao longo da vida útil da pedreira, à medida da finalização da lavra em determinados setores da jazida. O impacto relativo ao excesso de poeira é minimizado pela operação de um caminhão-pipa nas estradas e nas áreas de lavra.

O problema de retenção dos finos da água servida gerada no processo de beneficiamento foi resolvido com a construção de pequenas barragens de decantação a jusante da serraria e das frentes de lavra (**foto 5.7**). O volume destes finos é pequeno, pois para a serragem é usado um sistema fechado de circulação da mistura abrasiva. No polimento e serragem das placas o volume de água circulante é maior mas, em contrapartida, a quantidade de finos gerada é proporcionalmente menor.

Apesar das medidas tomadas, já existia um passivo ambiental devido a longa exploração desta jazida, onde era inclusive feita a serragem de blocos. Em vista disso, pode-se observar que a jusante das barragens o córrego está muito assoreado e com pouca vazão d'água.

O estudo do aproveitamento dos finos produzidos no beneficiamento seria uma boa contribuição técnica para o setor, já que estes não têm nenhuma utilização em suas bacias de deposição. Com o uso de brita ou dos rejeitos do beneficiamento (ladrilhos quebrados) em conjunto com uma mistura de finos e areia (?), poderia-se fazer o capeamento experimental de alguns acessos da pedreira e assim reduzir a poeira e destinar uso a rejeitos da pedreira.



Foto 5.7: Barragens primária e secundária (vista em segundo plano) de retenção de finos provenientes do processo de beneficiamento.

6 – METODOLOGIA PROSPECTIVA E CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO DOLOMITO DO CUMBI

Neste capítulo serão apresentados os resultados da aplicação do método geofísico *GPR* na pedreira do Cumbi (item 6.1) e a metodologia adotada na execução dos ensaios tecnológicos nos dolomitos do tipo Aurora, acompanhada pelos seus respectivos parâmetros (item 6.2).

6.1 – PROSPECÇÃO COM O USO DO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (*GPR* - *GROUND PENETRATING RADAR*)

6.1.1 - DESCRIÇÃO DO MÉTODO E DO EQUIPAMENTO

Para a obtenção dos dados geofísicos, foi usado o radar de penetração no solo (*GPR*) da marca *RAMAC* (fabricado na Suécia) e para o processamento foi usado o programa *Gradix* (desenvolvido pela *Interprex Limited*). Foram usadas antenas de 50MHz, 100MHz e 200MHz, sendo que esta última possibilita maiores detalhes, embora penalize a profundidade de penetração da onda.

Esse método geofísico permite a visualização em 2 e/ou 3 dimensões de fraturas e outras descontinuidades em maciços rochosos. Esta técnica já foi usada por Grandjean & Gourry (1996) em pedreiras de mármore na Grécia e por Botelho *et al.* (1996) em rochas carbonáticas e em granitos na Bahia. Nas áreas com capeamento eluvionar/coluvionar, o método pode determinar com boa precisão o topo rochoso, sendo esta informação de grande importância para o planejamento de lavra ou na escolha acertada do tipo de sondagem e sua locação.

Apesar de ter sido empregado inicialmente para o estudo do comportamento de fraturas em subsuperfície e verificar possíveis encavernamentos no maciço, o *GPR* já foi usado com sucesso também como ferramenta na prospecção. Ele foi utilizado em conjunto com furos de sonda para mapear anomalias subsuperficiais em terrenos dolomíticos, reduzindo bastante a necessidade de sondagem e permitindo uma otimização de seu posicionamento (Neves, 1997).

O *GPR* emite ondas eletromagnéticas a uma alta frequência, que atinge profundidades máximas de 50m (média de 20m) devido a alta atenuação das ondas em solo e rocha. Quanto mais condutor for o meio, maior será a atenuação destas ondas e conseqüentemente menor será a profundidade alcançada. A propagação das ondas eletromagnéticas no meio é função da constante dielétrica e da profundidade do refletor, o que permite o cálculo da posição em que este meio varia. Benson (1995) apresenta um resumo das características do método e algumas aplicações.

Os equipamentos mínimos necessários no sistema *GPR* para a aquisição de dados são um computador portátil, um par de antenas, cabos de fibra ótica, um gerador de ondas eletromagnéticas e baterias. Um dos primeiros a apresentar o método foi Ulriksen em 1982. O *GPR* tem várias aplicações nos ramos da engenharia e geologia, a um custo médio de US\$1.000,00 / km de linha (incluindo interpretação dos dados). Para trabalhos de detalhe e que envolvam uma interpretação mais demorada, este custo pode aumentar.

As antenas mais comuns são de 50, 100, 200 e 400 MHz, existindo também de 25MHz e 1GHz. As antenas de menor frequência são as que permitem obter dados mais profundos, devido a menor atenuação de sua energia. As antenas de maior frequência obtém ótimo nível de detalhe, mas são em regra geral mais superficiais. Contudo, deve-se fazer testes com diferentes antenas antes de se iniciar uma campanha para verificar a eficiência de cada uma de acordo com as características do meio e os objetivos a serem alcançados.

Os sinais recebidos podem ser armazenados no disco rígido do computador portátil que controla o *GPR*, permitindo trabalhar com um grande volume de dados. Nos aparelhos mais modernos, os arquivos relativos aos perfis são enviados através de cabo para o computador que será usado para fazer o processamento.

As malhas são feitas de acordo com a precisão que se deseja ter. Para poder captar um objeto ou variações de 50cm, a distância entre os pontos deve ser no mínimo de 25cm. Para resultados em 3D, o espaçamento entre as linhas deve ser também definido de acordo com o objetivo desejado. O tempo de leitura influi na qualidade dos dados, eliminando o *background* proveniente de reflexões aleatórias. As reflexões aleatórias são aquelas que diferem do padrão determinado pelo meio, que variam em função da constante dielétrica de cada material.

Para o processamento dos dados adquiridos, deve-se também fazer uso de programas específicos de computador, para em seguida passar a interpretar as seções de radar.

6.1.2 – OBJETIVOS

Uma das razões do levantamento destas seções foi determinar o posicionamento da lente de dolomito e a espessura do capeamento de filito intemperizado, visando planejar o avanço da lavra na frente mais importante da pedreira. Foram feitas seções também nas bancadas inferiores, procurando-se determinar a extensão e as características estruturais das lentes de dolomito.

6.1.3 - AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

Na pedreira do Cumbi foram feitos 20 perfis e seus respectivos *CMP* (ponto médio comum), com comprimento variando entre 5 e 120m. O *CMP* visa obter a velocidade do sinal em função da variação da profundidade. Procurou-se definir os padrões de fraturamento, existência de cavidades no maciço, contatos entre o filito/dolomito e entre rocha sã/saprolito. A aquisição dos dados no período de seca, estando as rochas analisadas aparentemente acima do lenço freático.

Para a aquisição de dados em locais planos, de fácil acesso ou previamente preparados, é recomendável o trabalho de uma equipe composta por 2 ou 3 pessoas. No Cumbi este trabalho durou 3 dias, com a equipe variando entre 2 e 5 integrantes.

Foi feito um levantamento estrutural em superfície das principais discontinuidades ao longo do perfil geofísico, auxiliando na interpretação das anomalias observadas. Estas informações são muito importantes devido, principalmente, às características de deformação e intemperismo do local estudado, além das dificuldades inerentes a este método indireto de pesquisa.

Na fase de processamento foram aplicadas uma seqüência de filtros e outras ferramentas. A primeira etapa é a importação dos dados, seguida da subdivisão dos arquivos de dados em diretórios, relacionados a cada trecho da pedreira. Abaixo é apresentada a seqüência que foi empregada neste trabalho, seguindo as técnicas sugeridas em Neves (1997) e no manual do *software Gradix*:

- **Conversão estática:**

Para terrenos não planos, deve-se entrar com os dados topográficos de superfície para correção do perfil. Os dados de pontos topográficos conhecidos são digitados e, através de interpolação, o perfil do terreno é gerado. No presente trabalho, esta técnica só foi usada para o perfil da berma superior da frente de lavra Lapa.

- **Aplicação do *De-Clip*:**

Devido ao fato da maioria dos radares registrar amostras de 16-bits e das chegadas das ondas aéreas e diretas terem uma amplitude muito maior que a energia refletida, as ondas dos primeiros ciclos podem estar cortadas (*clipped*). Devido a onda ter formato quadrado (e portanto enriquecida de altas frequências), é recomendável que os dados sejam cortados (*de-clipped*) antes de se aplicar qualquer filtro.

- **Aplicação de *Dewow*:**

Este filtro temporal visa eliminar dos dados componentes de frequência muito baixa. Os componentes de frequências muito baixas são relacionados principalmente a fenômenos indutivos e a efeitos instrumentais, que podem gerar ruídos.

- **Marcando o tempo zero (*set time zero*):**

Antes de fazer qualquer análise de velocidade, deve-se determinar o tempo real zero; ou seja, determinar corretamente onde se encontra a superfície. Desta maneira, após fazer a conversão de tempo para profundidade, pode-se precisar a profundidade real de um refletor.

- ***Time gain*:**

Os sinais de radar são muito rapidamente atenuados durante sua propagação no solo. Sinais em profundidades maiores são fracos e, mostrá-los ao mesmo tempo com os fortes sinais de superfície é difícil. A aplicação desta função de ganho variável com o tempo, permite a equalização das amplitudes, compensando a rápida queda do sinal em maiores profundidades.

Neste trabalho foi usado o *AGC (automatic gain control)*, que processa cada traço de dado, de modo que o sinal médio é computado sobre uma janela de tempo. Em seguida o ponto no centro do janela é amplificado (ou atenuado) pela razão do valor de saída desejado com a amplitude média do sinal.

- **Aplicação de filtros**

Os filtros permitem a eliminação de frequências indesejáveis (ruído). Há basicamente dois tipos de filtros: espacial e temporal. O filtro temporal atua no eixo do tempo dos dados analisados. No domínio do espaço, um filtro de passa-alta espacial mantém os eventos inclinados e suprime os eventos planos. O filtro de passa-baixa reforça os eventos planos e suprime os mergulhantes (inclinados).

Neste trabalho foi usado o filtro Gaussiano (espectro de amplitude) com espectro de fase constante (foi definido um ângulo de fase igual a zero). O valor usado para a frequência central da curva normal Gaussiana foi o mesmo da frequência da antena empregada.

- **Análise de velocidade *CMP* (*common mid-point*):**

Nesta análise pode-se determinar a distribuição de velocidade em profundidade. Para isso o espaçamento das antenas é modificado a partir de um ponto fixo, medindo-se assim a mudança no tempo de viagem ida e volta das reflexões. Plota-se em seguida o quadrado do tempo de viagem versus o quadrado da separação das antenas, que fornecem uma linha, cujo caimento indica uma estimativa de velocidade e sua interseção com o eixo do tempo indica a profundidade.

- **Conversão em profundidade**

Através das informações de variação de velocidade no meio estudado, pode-se através deste método converter a escala de tempo para profundidade. Com isso, é possível visualizar e interpretar melhor a situação em questão. Deve-se adiantar que os refletores mostrados nos radargramas em geral não representam a posição real da anomalia, camada ou descontinuidade.

- **Migração:**

Embora não tenha sido usada, a migração é extremamente útil para representar com mais realidade a estrutura analisada. Ela remove difrações, colocando os eventos na sua correta posição espacial. Esta técnica requer um bom conhecimento do espectro de velocidade do solo, podendo promover mudanças significativas na seção.

- **Deconvolução:**

Este tipo de filtragem não foi usado, pois é difícil de se aplicar sistematicamente nas seções analisadas em uma campanha e promove poucos ganhos de resolução.

- **Background Subtraction:**

Uma ferramenta bastante usada é a subtração de ruído, que na maior parte das vezes é feita usando um filtro passa-alta ou um removedor médio de traço.

6.1.4 - INTERPRETAÇÃO DOS PERFIS GEOFÍSICOS EXECUTADOS NO CUMBI

Para auxiliar no entendimento dos radargramas apresentados, abaixo são descritos alguns tópicos que relacionam a geometria da descontinuidade com a forma registrada nos perfis geofísicos:

TÓPICOS BÁSICOS PARA INTERPRETAÇÃO DE UM RADARGRAMA:

- Refletores pontuais ou circulares aparecem como arcos hiperbólicos. O ápice desta hipérbole corresponde em geral à posição real do refletor. Quanto mais fundo o refletor, mais aberta será a hipérbole.
- Refletores planares inclinados aparecem como linhas inclinadas com posição e ângulo diferentes:
 1. O ângulo real será maior do que o mostrado no radargrama;
 2. O comprimento real do refletor será menor ;
 3. A posição real do refletor será acima da mostrada no radargrama;
 4. O grau de distorção aumenta na medida que o ângulo de mergulho aumenta, sendo que para os refletores planos não ocorrem erros.
- A borda de um refletor planar (a descontinuidade de uma falha de uma camada sedimentar) pode refratar as ondas de radar e comportar-se como uma fonte puntual. No radargrama ela aparecerá como um “rabo” de refração hiperbólica no lado livre da borda. O ápice da hipérbole será na borda.
- Um refletor sinclinal aparecerá mais estreito do que realmente é; já um refletor anticlinal, aparecerá mais aberto do que realmente é.

Os dolomitos em geral tem uma velocidade entre 0,07 e 0,12m/ns, constante dielétrica (ϵ) por volta de 9, e resistividade (ρ) superior a 10.000 ohm. As reflexões das ondas ocorrem quando se atravessa dois meios com diferenças significativas nos valores de constante dielétrica e resistividade.

Uma cavidade com ar, por exemplo, apresentará uma resposta bem clara, já que o ar tem constante dielétrica igual a 1 e resistividade infinita.

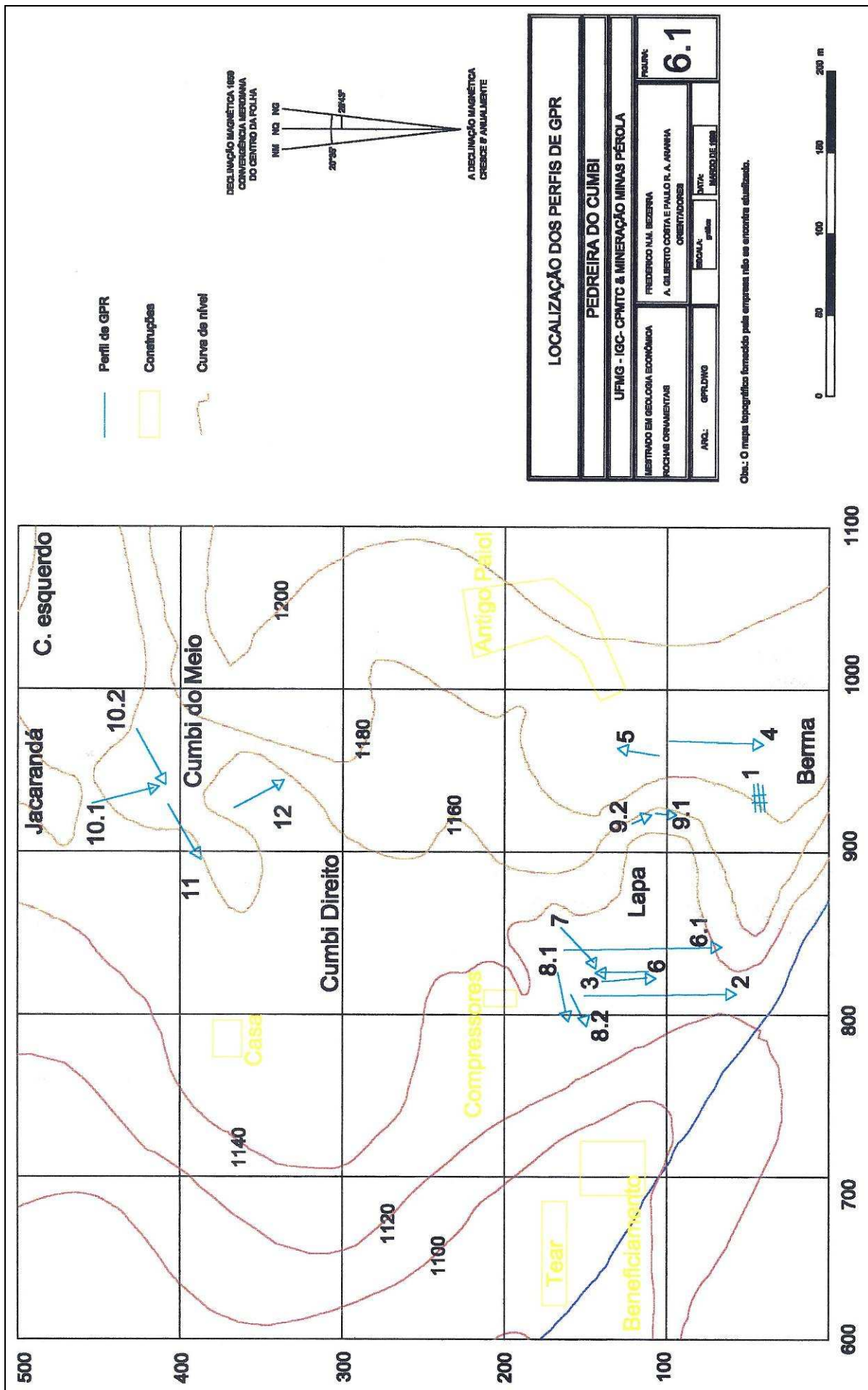
Outros exemplos de materiais que apresentam diferenças nessas propriedades e estão freqüentemente associados aos corpos dolomíticos são:

- Camadas de chert: $\epsilon = 5$ $\rho > 10.000$ ohm
- Cavidade com água: $\epsilon = 80$ ρ depende da concentração de sais dissolvidos
- Cavidade preenchida com óxido de manganês (úmida): ϵ alta ρ baixa

No Cumbi, as lentes de dolomito tem direção média E-W, com camadas de filito dobradas sobre estas. No dolomito ocorrem filmes de sericita que definem a foliação.

Ocorrem 2 famílias de fratura, sendo que a principal família tem direção aproximada E-W e caimento subvertical para norte e sul. Esta está diretamente relacionada à formação de encavernamentos, que no caso do Cumbi se resumem a fraturas com aberturas de até em torno de 4 metros de largura. A maioria das fraturas abertas e encavernamentos são preenchidas por argila pouco arenosa, proveniente do intemperismo dos dolomitos. A segunda família tem direção aproximada N-S e caimento (56°) para oeste. A foliação tem uma atitude aproximada 160/48 (N70E/48SE).

Os trabalhos com o GPR se concentraram nas frentes denominadas Lapa, Cumbi do Meio e Cumbi Direito, como mostrado no croquis de localização dos perfis geofísicos (figura 6.1). Os perfis da frente de lavra Lapa puderam ser feitos tendo uma boa exposição das bancadas, permitindo assim acompanhar principalmente as fraturas e seus eventuais preenchimentos. Com base neste acompanhamento geológico-estrutural, foi possível identificar feições no radargrama e compará-las com as exposições em afloramento.



O radargrama mostrado na figura 6.2 apresenta o perfil 6, onde se observam hipérboles que indicam fraturas abertas de alto grau (mergulho), ora preenchidas por argila, ora sem preenchimento (ar). Os ápices das hipérboles indicam as posições aproximadas dessa fraturas.

Este perfil tem uma extensão de 22m, espaçamento entre antenas de 1m, intervalo de leitura de 0,5m e sentido de caminhamento para azimuth 5° (foto 6.1). Para a aquisição dos dados neste perfil usou-se antenas de 200MHz, sendo que para o CMP foi usada antena de 50MHz, aplicando-se ao final do processamento a conversão de profundidade.



Foto 6.1: Bancada onde foram realizados os perfis 3 (N-S) e 6 (S-N). As fraturas abertas se prolongam em profundidade, gerando um padrão de reflexão hiperbólico.

Comparando-se a seção analisada com a foto 6.2, que corresponde ao nível imediatamente inferior da bancada estudada, fica clara a existência de duas fraturas abertas e preenchidas próximas à superfície. Na área mais a sul ocorrem fraturas mais fechadas.

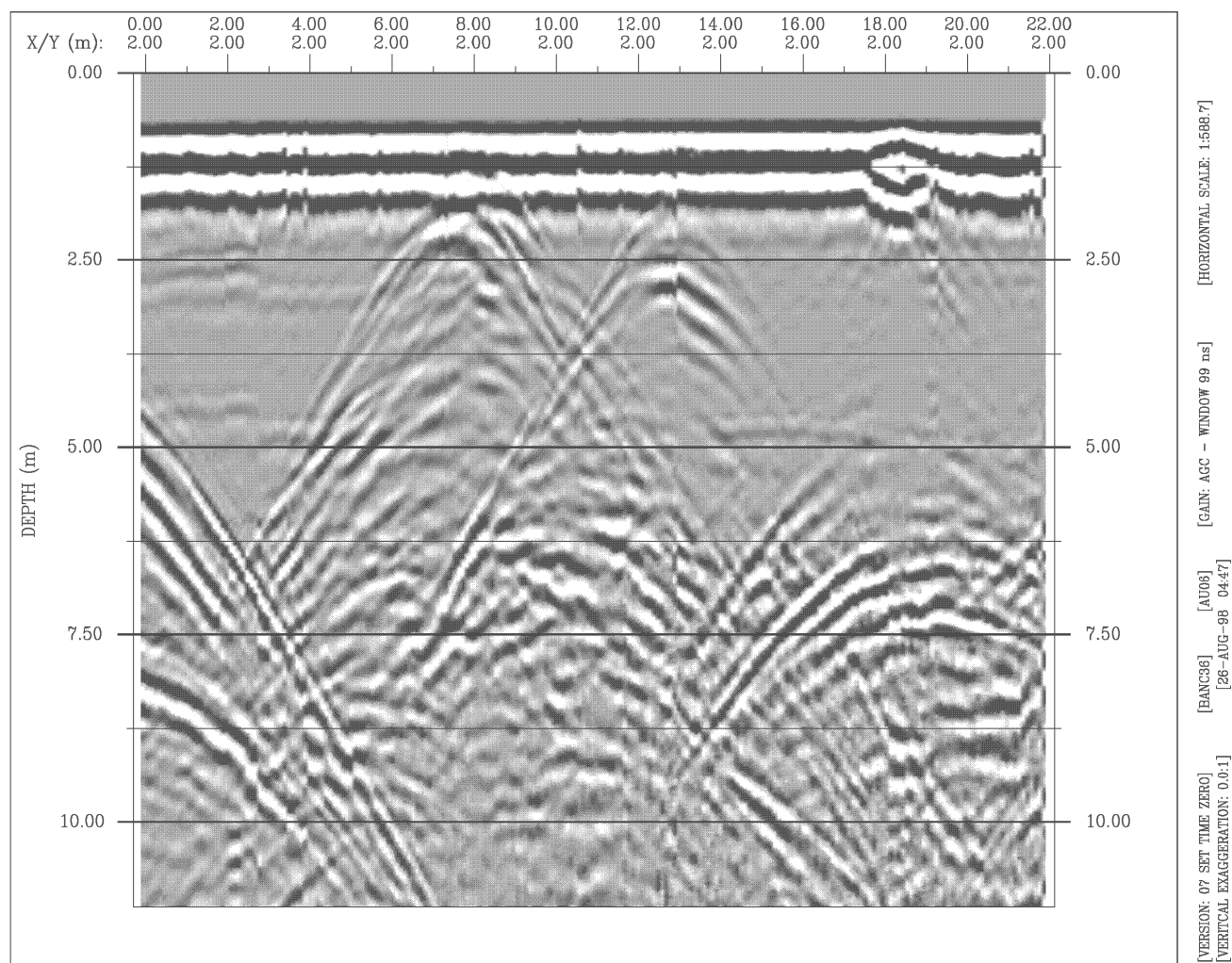


Figura 6.2: Seção 6, sul para norte, frente Lapa, antena de 200 MHz. Pode-se relacionar as reflexões em hipérbole observadas com fraturas abertas.

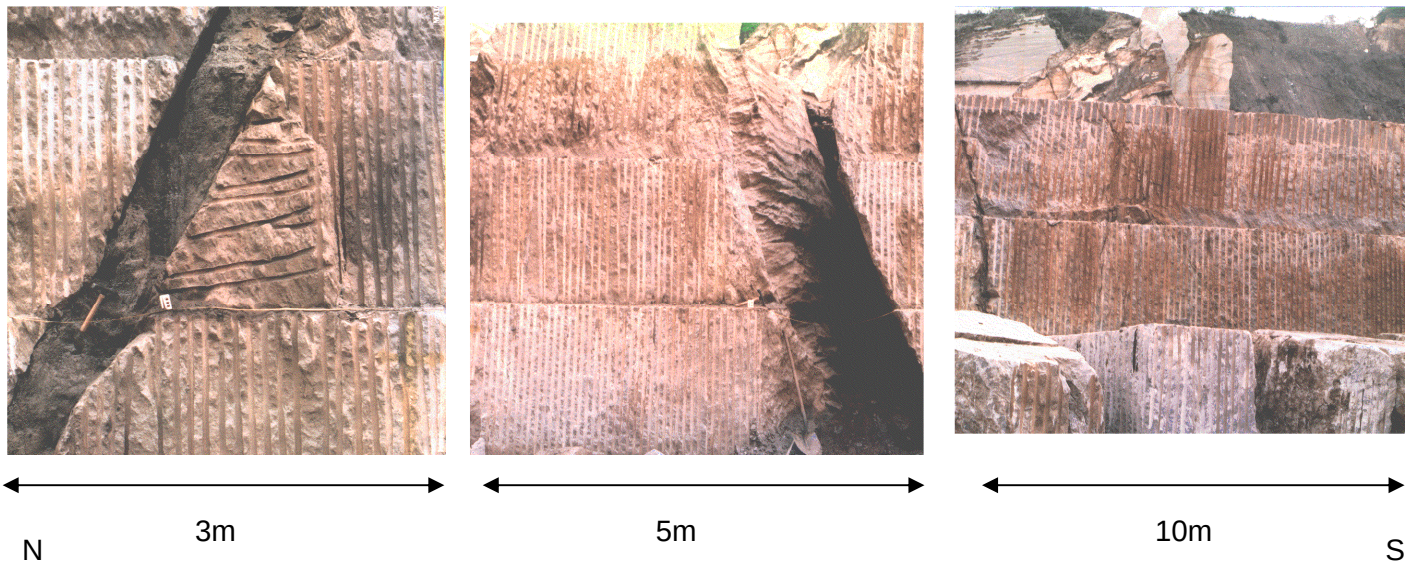


Foto 6.2: Padrão de fraturamento na bancada inferior à seção de GPR (Lapa).

No mesmo nível da bancada estudada (foto 6.3) pode-se observar a continuidade do padrão aberto de fraturamento. Na porção sul da foto a foliação se encontra igualmente dobrada, mas sem a presença de fraturas abertas superficiais.

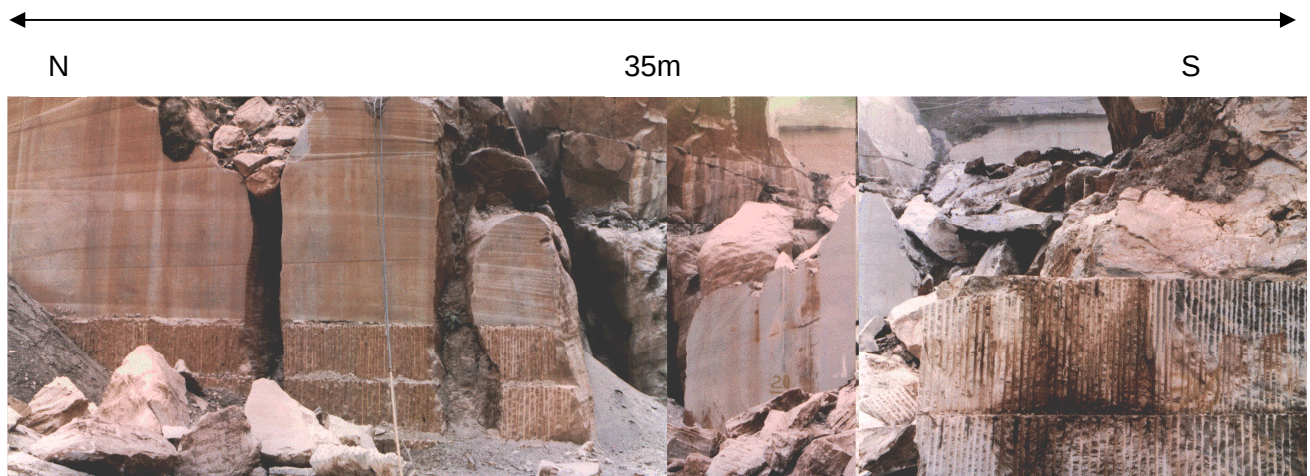


Foto 6.3: Afloramento no mesmo nível da bancada estudada, mostrando fraturas abertas e dobras fechadas.

O perfil 3 mostra também uma série de hipérboles (figura 6.3), que indicam as mesmas fraturas do radargrama anterior. As ondas de radar puderam alcançar profundidades maiores (até 20m) devido ao uso de antena de 100MHz, cujos sinais são menos atenuados. Ao longo do caminhamento atravessou-se perpendicularmente uma fratura de 1m de abertura a 5m do ponto inicial, além de outras fraturas em 10m (0,7m abertura) e em 15m (0,2m abertura).

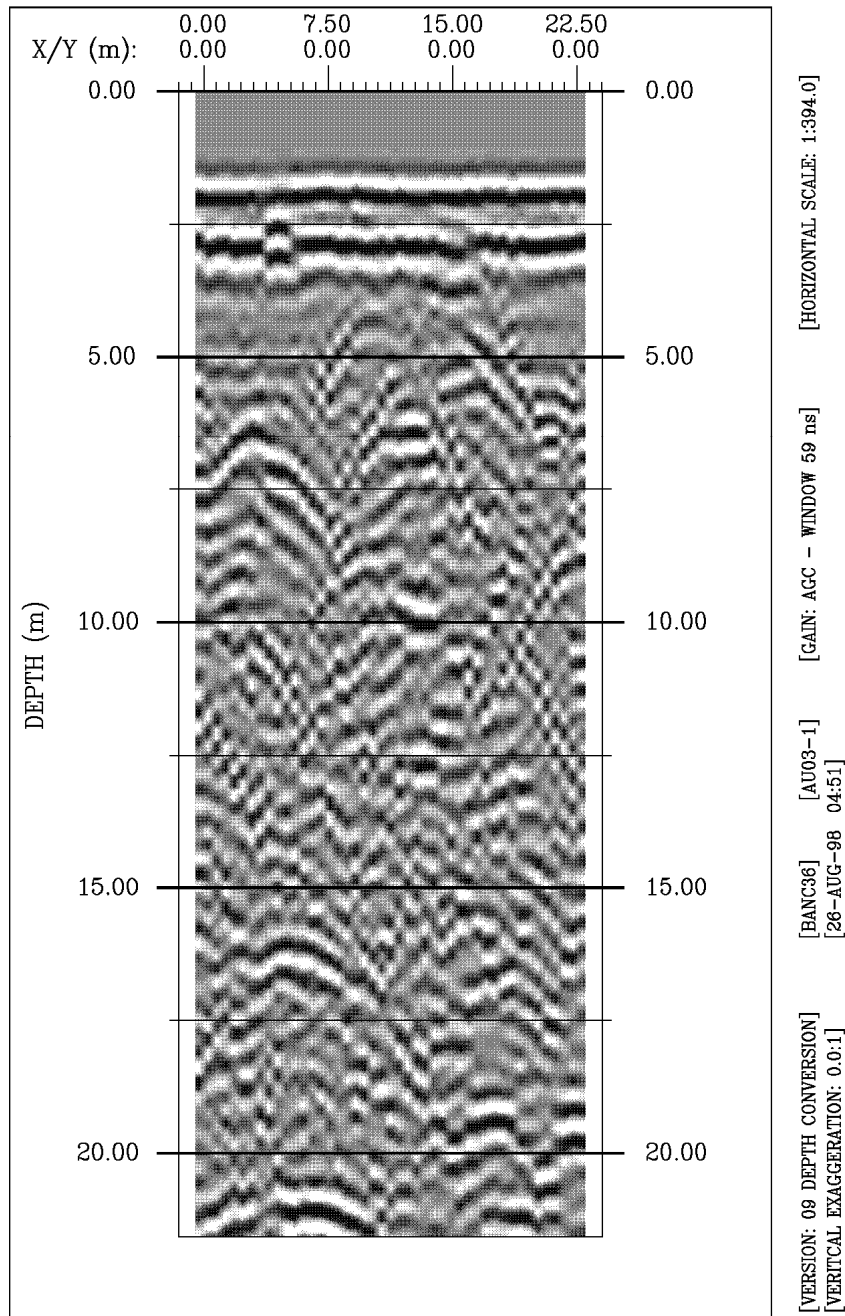


Figura 6.3: Perfil 3 (100MHz, N-S, 24m).

Este perfil tem uma extensão de 24m, espaçamento entre antenas de 1m, intervalo de leitura de 0,5m e sentido de caminamento para azimuth 180° (foto 6.1). Para a aquisição dos dados neste perfil usou-se antenas de 100MHz, sendo que para o CMP foi usada antena de 200MHz, aplicando-se também ao final do processamento a conversão de profundidade.

O perfil 2 tem uma direção igualmente norte-sul, passando assim transversalmente às famílias de fratura E-W (figura 6.4). Novamente se observam hipérboles ao longo do perfil em vários tempos/profundidades, indicando a presença de fraturas abertas e/ou preenchidas ao longo de vários níveis do maciço. A hipérbole ($t=300\text{ns}$; $x=12,5\text{m}$) de feição mais aberta apresenta uma característica de refletor puntual, podendo indicar um encavernamento de pequeno porte. Na parte direita do perfil o padrão ondulado/perturbado das reflexões podem indicar as feições de dobras apertadas envolvendo filito e dolomito, como se observa na superfície desta área.

Este perfil tem uma extensão de 74m, espaçamento entre antenas de 2m, intervalo de leitura de 0,5m e sentido aproximado de caminamento para azimuth 180° . Para a aquisição dos dados e CMP usou-se antenas de 100MHz.

Os perfis 7 e 8.1 (figuras 6.5 e 6.6) tem direção NE-SW e apresentam refletores inclinados, que são interpretados como fraturas, cujo mergulho real é maior que o mostrado, o comprimento menor e sua posição real está acima da registrada no radargrama. Estes perfis estão alinhados obliquamente à direção da principal família de fraturas da área. A partir da análise dessas seções, é possível identificar a continuidade em profundidade dessas fraturas com caimento para sudoeste.

Os refletores mergulhando para NE na seção 8.1 pertencem também a essa família, como já mostrado no estereograma da figura 4.8 (página IV-22).

O perfil 7 tem uma extensão de 41m e foi feito no sentido 228° , com antenas de 50MHz, espaçamento entre antenas de 2m e intervalos de leitura de 0,5m. O perfil 8.1 tem uma extensão de 50m e foi feito no sentido 260° , com antenas de 50MHz, espaçamento entre antenas de 2m e intervalos de leitura de 0,5m.

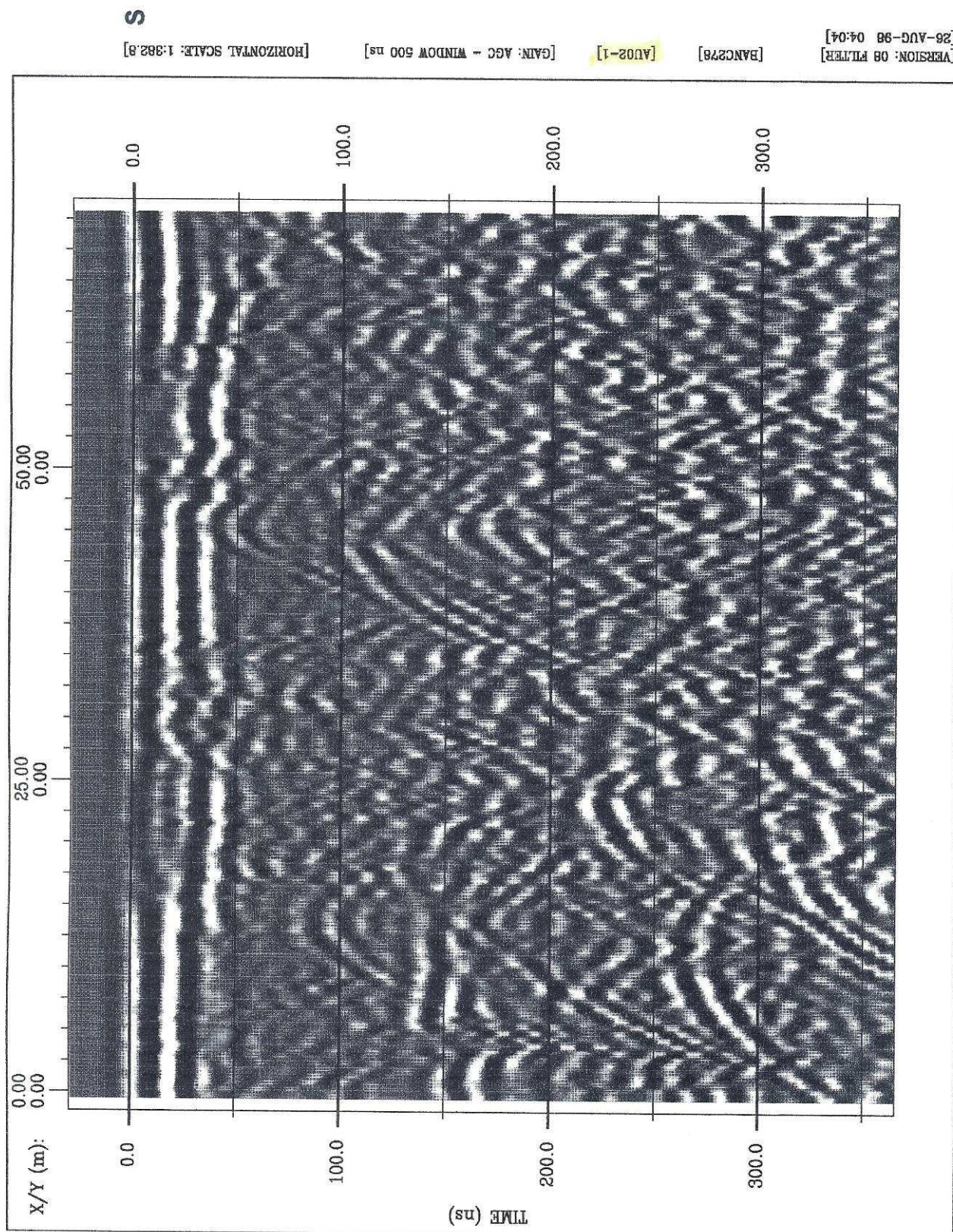


Figura 6.4: Perfil 2 (100 MHz, N-S, 74m)

N

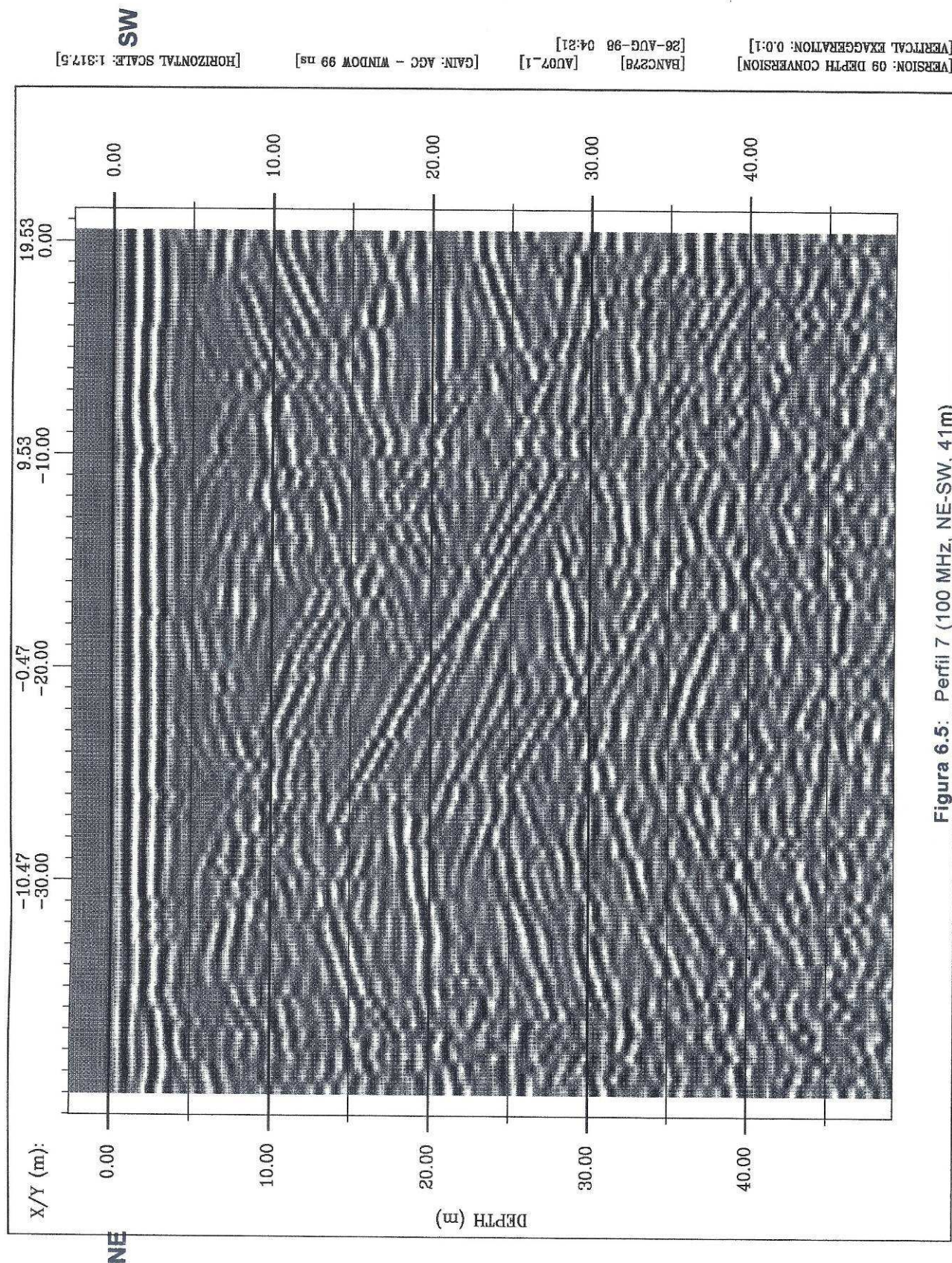


Figura 6.5: Perfil 7 (100 MHz, NE-SW, 41m)

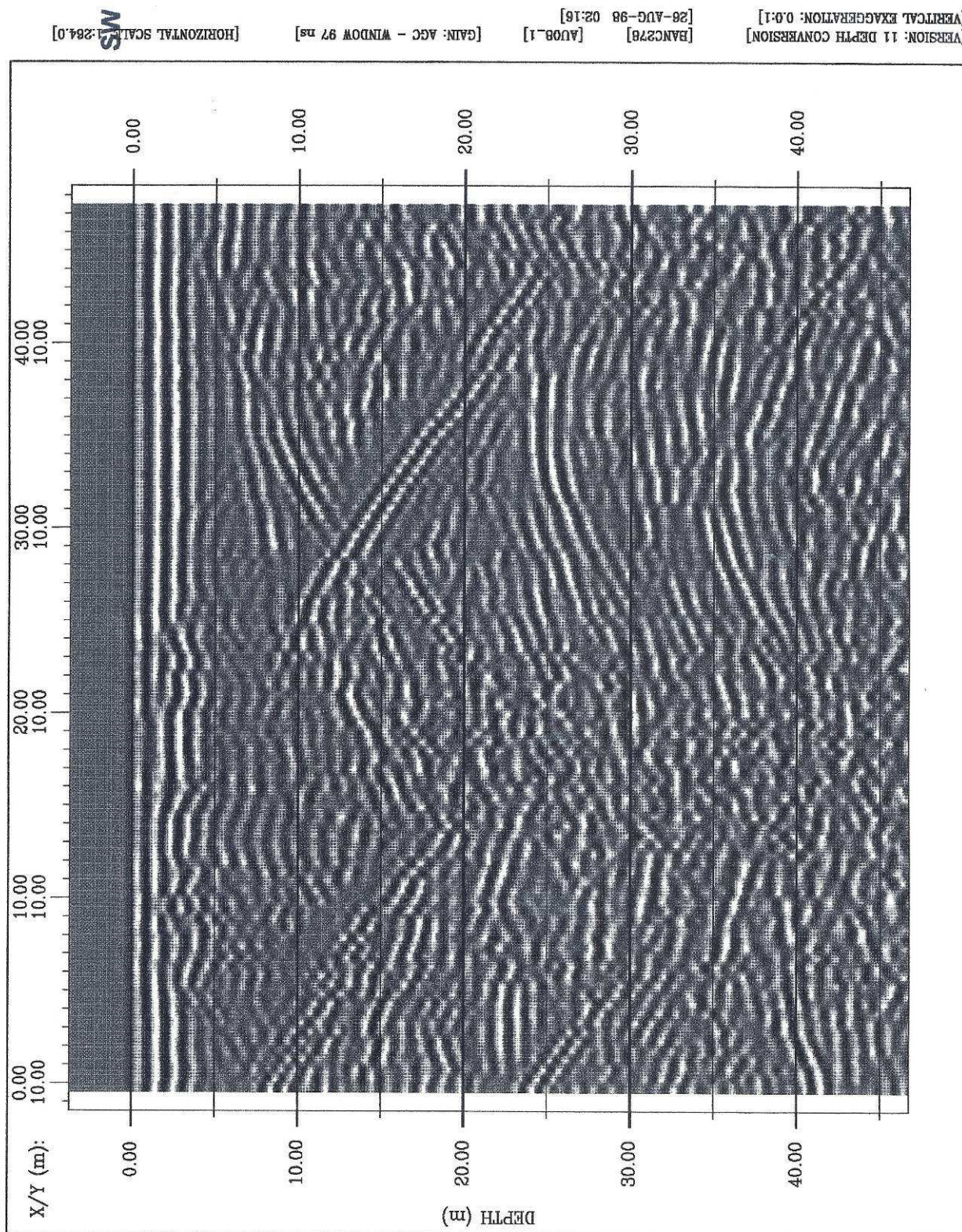


Figura 6.6: Perfil 8.1 (100 MHz, NE-SW, 50m)

O perfil horizontal 9.2 (**figuras 6.7**) foi feito em uma extensão de 12m, com espaçamento de 1m e intervalo de leitura de 0,25m, utilizando-se antenas de 100MHz. Este localiza-se na parede E da lente principal da Lapa (**foto 6.4**), podendo-se visualizar na seção reflexões hiperbólicas (fraturas) e retilíneas fortes. Estas últimas podem estar marcando a presença de fraturas da família 2 (direção N-S, caimento para oeste). Contudo, a possibilidade mais provável para a ocorrência desse refletor retilíneo é uma reflexão lateral.



Foto 6.4: Lente de dolomito claro com fraturas persistentes, onde foi feito o perfil horizontal (9-2).

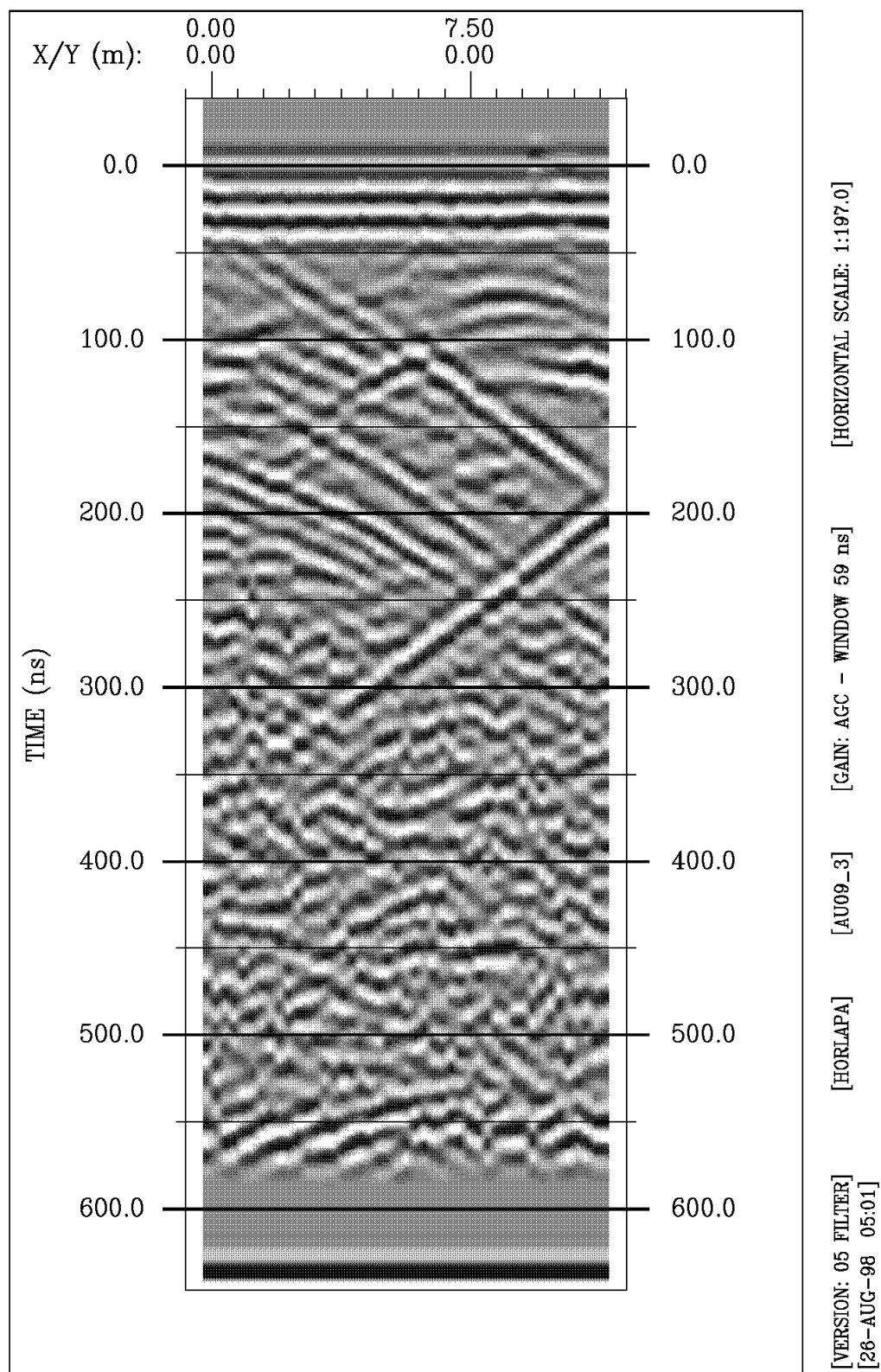


Figura 6.7: Perfil 9.2 (100MHz, horizontal, N-S, 12m)

Apesar de ter alcançado com as antenas de 50MHz uma profundidade de aproximadamente 50m, os perfis da berma (4 e 5) não apresentaram resultados suficientemente satisfatórios. Já que uma interpretação equivocada poderia vir a causar problemas operacionais e de segurança na pedreira, caso o modelo proposto fosse adotado sem as devidas precauções e acompanhamento, preferiu-se não apresentá-lo. É aconselhável que sejam feitos novos perfis no local com antenas de 100MHz, para depois de definido o modelo estrutural mais superficial, estendê-lo em profundidade com o uso de antenas de 50MHz.

De uma maneira geral, foi possível observar um refletor, que deve indicar o contato do filito com a lente de dolomito, e zonas mais “perturbadas” na porção central da Lapa, por volta da cota 1140-1160, que sugerem uma área fraturada e com presença de dobras fechadas.

Os perfis do Cumbi do Meio (10.1, 10.2, 11) e Cumbi Direito (12) foram feitos com antenas de 100MHz, mas em geral não apresentaram refletores bem marcados. Nesta área foram selecionados os perfis 11 e 12.

O perfil 11 tem uma extensão de 50m, azimuth 215°, espaçamento 1m e intervalo de 0,25m. Predomina nesta área o dolomito vermelho, com intercalações de dolomito bege (**figura 6.8**). No ponto 22m, ocorre em superfície uma fratura aberta (0,15m), enquanto neste mesmo ponto, a 15 e 20m de profundidade, observam-se dois refletores bem marcados. O refletor em 20m inclusive apresenta uma forma hiperbólica aberta. Apesar de não se ter dados muito concretos a respeito do perfil de velocidade desta seção, pode-se afirmar que esses dois refletores podem indicar uma mudança de material (dolomito para filito) e/ou encavernamento.

Na **foto 6.5** é mostrado o equipamento utilizado e o local de execução do perfil. Há a possibilidade de ocorrência de interferências no perfil devido às presenças do “pau de carga” metálico e cabo de aço vistos na foto.

O perfil 12 tem 31m de comprimento e foi executado no sentido NW-SE (azimuth 145°), como mostrado na **foto 6.6**. Na seção geofísica há refletores inclinados bem marcados em toda a extensão do perfil (**figura 6.9**). Entre 13 e 19m há em superfície uma zona de dolomito fraturado e dobrado, envolto por camada de 1m de filito mergulhando aproximadamente para S. Portanto, os refletores que mergulham para SE representam as camadas dobradas de filito e os refletores que truncam os anteriores, mergulhando para NW, podem indicar fraturas abertas.



Foto 6.5: Local de execução do perfil 11 e equipamento *GPR*.

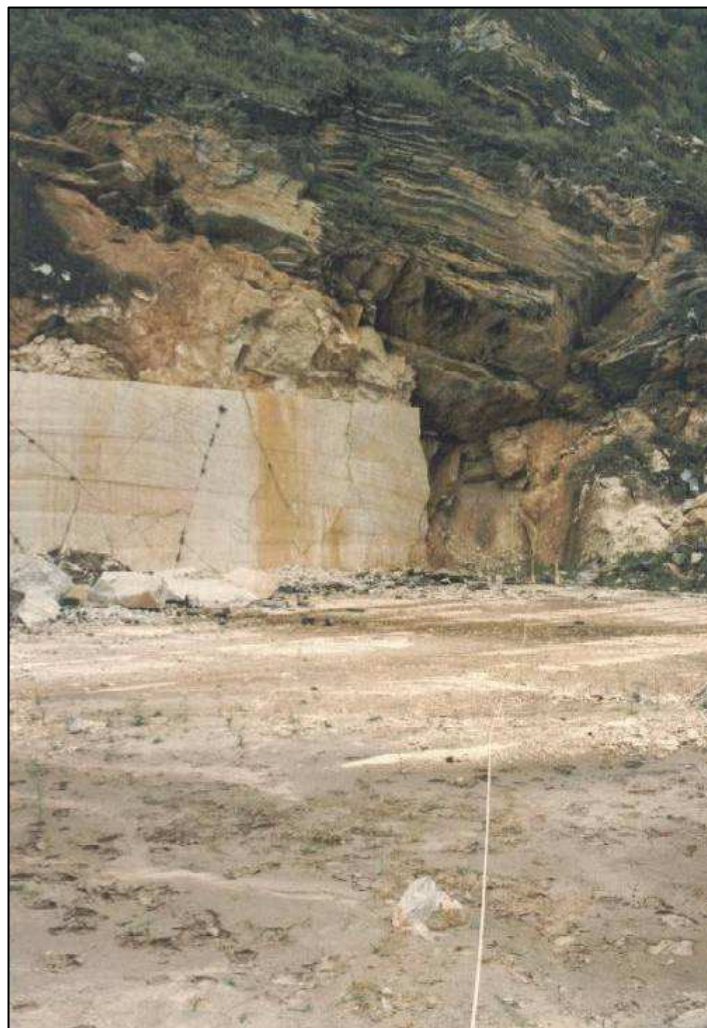


Foto 6.6: Local de execução do perfil 12. Ao fundo contato da lente de dolomito com o filito.

NE

SW

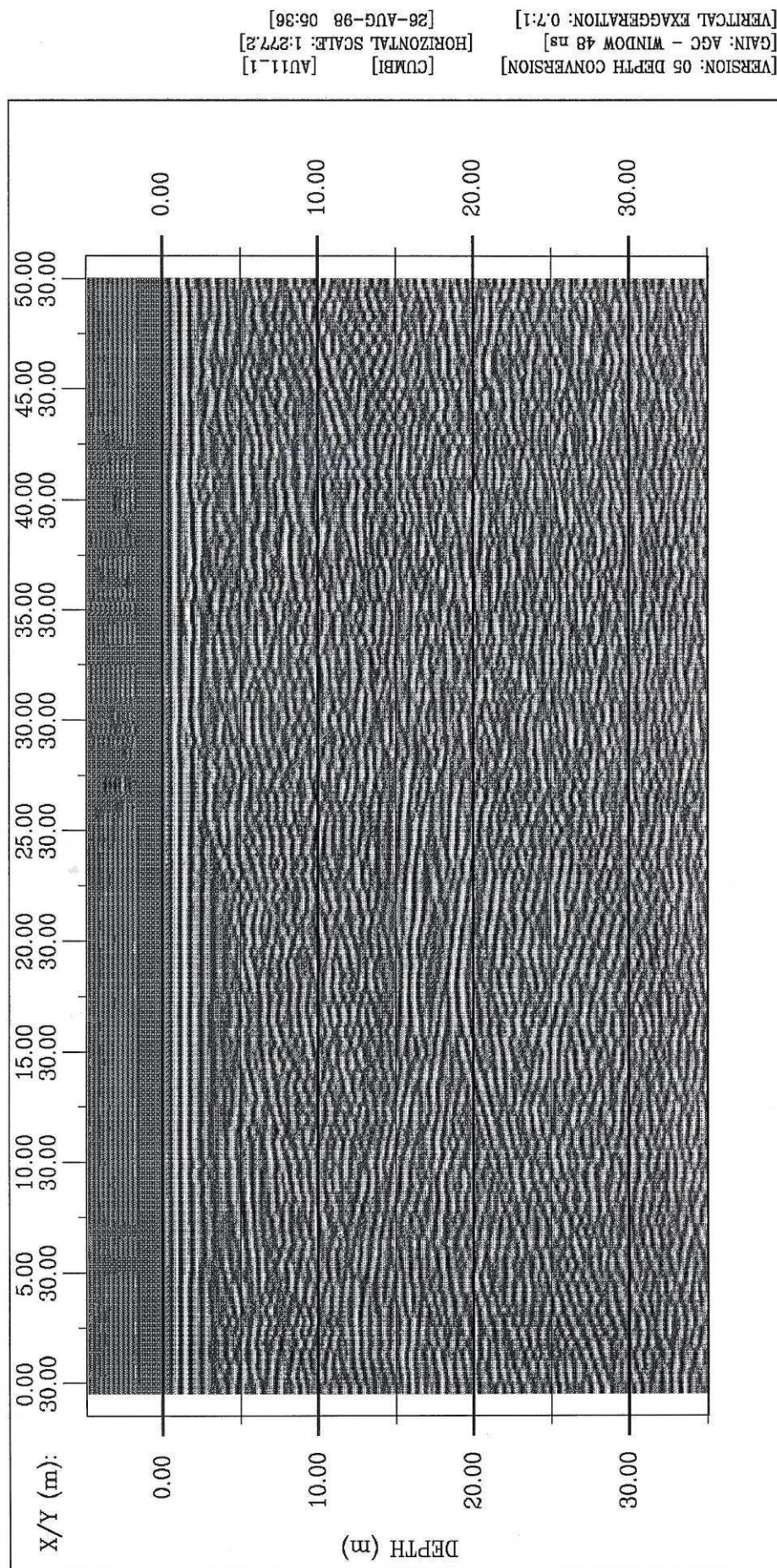


Figura 6.8: Perfil 11 (100 MHz, NE-SW, 50m)

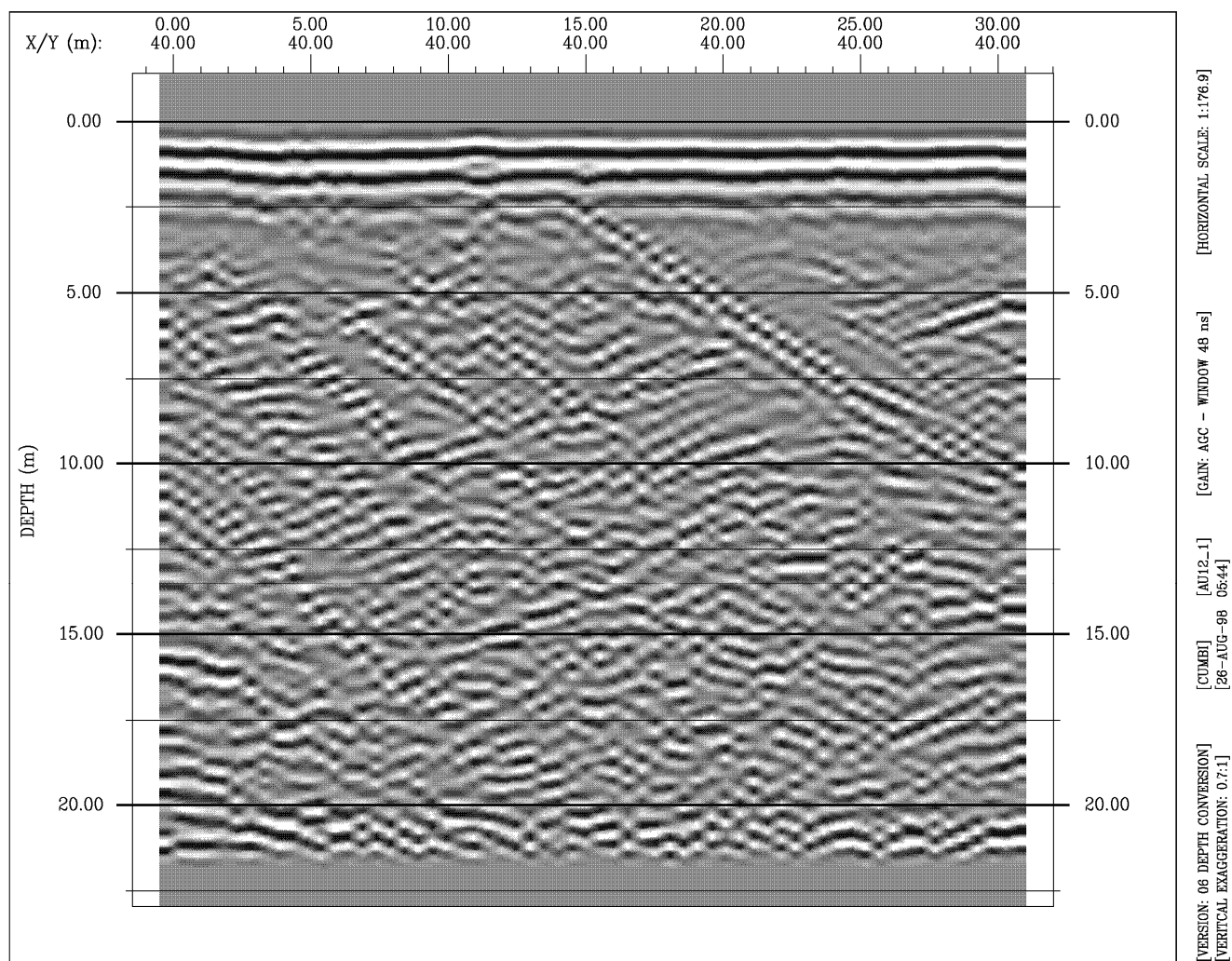


Figura 6.9: Perfil 12 (100MHz, NW-SE, 31m).

6.2 – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Neste item são descritos alguns métodos de caracterização tecnológica e apresentados os resultados obtidos nos ensaios de determinação de índices físicos, ataque ácido e nas análises petrográficas.

Para se ter uma idéia das propriedades físicas médias dos calcários e dolomitos (segundo o *US Bureau of Standards*), são apresentados abaixo os seguintes valores:

- a) Coeficiente de expansão muito baixo até 300°C; entre 20-50°C = 5×10^{-6} mm/m.°C;
- b) Resistência à compressão variável: entre 175 Kg/cm² - 2.000 Kg/cm² (17,5-200MPa);
- c) Resistência ao cisalhamento tem valores típicos entre 85-210 Kg/cm² (8,5-21MPa);
- d) Absorção d'água = 0,03 - 12%;
- e) Densidade = 2,3-2,7 g/cm³;
- f) Dureza Mohs = $3^{1/2}$ – 4

6.2.1 – DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

- **CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA**

Para este ensaio foram seguidas as diretrizes da norma ABNT 12.768/92, Rochas para revestimento – Análise petrográfica.

Através da análise dos dados obtidos neste ensaio, pode-se por exemplo:

1. Relacionar os valores de porosidade da rocha com o estado microfissural/estrutural da rocha.
2. Determinar a presença de minerais deletérios, que podem provocar descoloração, manchamentos, perda de massa e reações físico-químicas com produtos usados em sua colocação.
3. Determinar através da correlação entre microtextura e macrodescontinuidades a melhor direção de corte, levando-se em conta sua resistência mecânica máxima e sua capacidade de permitir a percolação de fluidos.
4. Classificar corretamente a rocha sob o ponto de vista petrográfico, fornecendo informações concretas aos consumidores.
5. Avaliar o estado de alteração dos minerais, permitindo para alguns tipos de rocha, correlacionar a variação das cores da rocha com a alteração de determinados minerais.

- **DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES FÍSICOS**

A determinação dos índices físicos consiste em verificar os parâmetros de massa específica aparente, absorção d'água aparente e porosidade aparente de uma rocha. Os

procedimentos adotados foram os mesmos propostos pelo autor (Bezerra *et al.*, 1998) a partir da adaptação da norma NBR12766/1992 (ABNT).

- **DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ÁCIDO SULFUROSO**

O objetivo básico deste ensaio é simular a exposição de materiais pétreos a ambientes poluídos, sendo útil na especificação adequada das rochas ornamentais. Este ensaio é recomendado para rochas que serão utilizadas como revestimentos e pavimentos externos e é particularmente importante para as ardósias usadas como telhas, já que estas estarão expostas a condições severas de uso e devem se manter íntegras por razões de segurança.

Não existe ainda uma norma técnica da ABNT para este tipo de ensaio em ardósias, granitos e mármore. A norma que pode ser tomada como referência é a norma espanhola UNE 22.198 (resistência da ardósia aos ácidos), bem como o esboço de norma do Comitê Europeu de Normalização – CENTC 246 WG2 N385. No laboratório da LOEMCO (*Laboratório Oficial para Ensayo de Materiales de Construcción*) em Madri - Espanha, são realizados testes em diversos tipos de rochas ornamentais usando-se ácido sulfuroso (H_2SO_3), seguindo em linhas gerais as diretrizes da norma em elaboração.

- **CRISTALIZAÇÃO DE SAIS**

Não existe ainda uma norma técnica da ABNT para este tipo de ensaio em ardósias, granitos e mármore. Também não existe uma norma européia unificada para este tipo de ensaio, embora já exista um esboço de norma no grupo de trabalho CENTC 246 WG2, sob o número N170E. No laboratório da LOEMCO são realizados ensaios deste tipo, seguindo em linhas gerais as diretrizes da norma européia em elaboração.

Abaixo é descrito o método que deve ser empregado para a execução deste ensaio. Devido ao fato da extrema sensibilidade do ensaio à temperatura e à atual falta de condições dos laboratórios do CPMTC para tal, este ensaio não pôde ser plenamente realizado. Foram feitos alguns poucos ciclos de saturação, que foram interrompidos quando verificou-se que não estavam sendo mantidas as condições de temperatura exigidas.

O procedimento básico para a execução deste ensaio é pesar os CP após secagem, saturá-los em uma solução de sulfato de sódio anidro e água deionizada, secá-los e quantificar a mudança de massa em cada um dos 15 ciclos a que eles são submetidos.

O objetivo básico é dar uma idéia preliminar do comportamento da rocha submetida à tensões internas devido a cristalização de sais em sua matriz. Simula adequadamente ambientes sujeitos a temperaturas abaixo de 0°C , evitando se fazer os demorados testes tradicionais de congelamento e degelo.

Pode-se também simular a exposição de materiais pétreos em áreas costeiras ou também dos materiais sujeitos à situações extremas de mau uso das técnicas de aplicação com

argamassa. Nestes casos ocorre também cristalização de sais, que tensionam a placa pétrea e facilitam a ação de outros agentes intempéricos.

Este ensaio é altamente recomendado para rochas que serão utilizadas como revestimentos e pavimentos externos em áreas de clima frio e desejável para áreas litorâneas. Uma limitação deste teste é que ele não se aplica a rochas com baixa porosidade. Para testar o método foram usados CP submetidos ou não ao ataque ácido, para fins de comparação.

Para a sua execução foram preparados seis CP com as mesmas dimensões dos CP usados nos testes de porosidade e de ataque ácido. Neste ensaio as rochas são submetidas a solução de 14% de sulfato de sódio (peso específico de 1,055) dentro de uma câmara fechada, estando os CP imersos, com uma coluna de 1cm de solução acima deles. Para materiais que requerem uma vida útil muito longa e submetidos a condições naturais muito severas, pode-se usar soluções saturadas, com peso específico em torno de 1,166-1,170. Deve-se usar uma nova solução para cada ciclo do teste.

Após imersão dos CP por 2 horas a temperatura de 20°C, os CP são colocados em uma estufa e secos em ambiente com alta umidade relativa nos primeiros estágios de secagem, aumentando a temperatura dos CP para 103°C em um período entre 10 e 15 horas. Uma mudança de 0,5°C na temperatura de saturação (20°C) pode afetar significativamente os resultados do ensaio. Os CP são mantidos na estufa desligada por pelo menos 16 horas e depois resfriados a temperatura ambiente antes de submetidos novamente a um novo ciclo de saturação. São feitos 15 ciclos como este, a não ser que ocorra ruptura dos CP antes de completar estes ciclos. Os CP são pesados e verifica-se a percentagem de variação de massa de cada um deles antes e depois de submetidos à solução.

A cristalização dos sais provoca uma pressão na amostra, que pode chegar a provocar a ruptura dependendo da porosidade, textura e grau de alteração do material. Ocorrendo ruptura deve-se registrar em qual ciclo ela ocorreu e fotografá-la.

6.2.2 - CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA

Foram coletadas amostras de dolomito que correspondem aos tipos comercializados pela empresa, além de amostras de filito e quartzito pertencentes à Formação Fecho do Funil. As amostras foram preparadas e analisadas macro e microscopicamente, com o auxílio de lupa e de um microscópio de luz polarizável.

Foram selecionadas 5 amostras para análise microscópica, cujos resultados são apresentados nas fichas do **ANEXO 1**. Esta fichas contêm informações da composição mineralógica da rocha, sua textura, natureza e classificação e estado

microfissural/estrutural. Abaixo é apresentado um resumo das características macroscópicas destas amostras:

FB-01: Dolomito bege com faixa filítica cinza. Presença de minerais opacos.

FB-02: Dolomito bege claro, com porções ligeiramente avermelhadas, cortada por filmes de sericita verde claro.

FB-03: Filito cinza escuro com finas bandas vermelho escuras.

FB-04: Dolomito vermelho escuro, intercalado com uma massa filítica/dolomítica cinza escuro a avermelhada.

FB-05: Dolomito vermelho com faixas onduladas bege claro de dolomita/calcita e uma matriz quartzo-sericítica-carbonática avermelhada.

Nas análises petrográficas feitas não foram determinadas as proporções entre calcita e dolomita presentes na rocha. Uma aproximação desta relação pode ser determinada através de análise química, observação da reação do ácido clorídrico (a dolomita reage menos do que a calcita) e de análises colorimétricas. Carrozi (1960) *in* Limaverde (1987), define os intervalos e as proporções relativas entre calcita e dolomita na rocha para a caracterização dos calcários e dolomitos, como mostrado na **tabela 6.1**. Johnson (1962) analisou amostras da pedreira do Cumbi, obtendo valores de até 96% de conteúdo de carbonatos, com uma relação CaO:MgO que permite classificá-las como dolomito.

ROCHA	CALCITA (%)	DOLOMITA (%)
CALCÁRIO	≥ 95	≥ 5
CALCÁRIO MAGNESIANO	90 - 95	10 - 5
CALCÁRIO DOLOMÍTICO	10 - 50	90 - 50
CALCÁRIO CALCÍTICO	50 - 90	40 - 10
DOLOMITO	≤ 10	≥ 90

Tabela 6.1: Proporção relativa entre calcita e dolomita para a caracterização de calcários e dolomitos (Carrozi, 1960 *in* Limaverde, 1987).

6.2.3 – DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES FÍSICOS

Para a determinação dos índices físicos das amostras coletadas na pedreira do Cumbi, foram seguidos os procedimentos propostos pelo autor (Bezerra *et al.*, 1998) a partir da adaptação da norma NBR12766/1992 (ABNT). O equipamento necessário consiste basicamente de uma serra diamantada para preparação das amostras, estufa, balança (precisão de 0,01g), bandejas para a absorção de água pelos corpos de prova (CP) e um recipiente para acondicionar água e CP durante a pesagem.

O procedimento básico seguido (ABNT) para este ensaio é:

- Preparação de 10 corpos de prova (CP) para cada litotipo amostrado (**foto 6.7**).
- Lavar os CP em água corrente.
- Submeter os CP a uma temperatura de $\bar{t} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 24 horas em estufa.
- Resfriar à temperatura ambiente e pesar = PESO **A** (peso no ar).
- Mergulhar os CP em bandeja com água cobrindo 1/3 da altura dos CP.
- Após 4 horas acrescentar mais água até atingir 2/3 de sua altura.
- Decorridas 8 horas a partir do começo da saturação, encobrir os CP e mantê-los assim até completar 24 horas.
- Após saturação, pesar = PESO **B** (peso saturado).
- Pesar em seguida os CP submersos, um a um, dentro de um recipiente com água e presos a um fio de nylon = PESO **C** (peso submerso/empuxo).

Os índices físicos são determinados através das equações abaixo:

$\text{Massa específica aparente seca (g/cm}^3\text{)} = \text{massa seca (A)} / \text{volume do CP (C)}$ $\text{Massa específica aparente saturada (g/cm}^3\text{)} = \text{massa saturada (B)} / \text{volume do CP (C)}$ $\text{Porosidade aparente (\%)} = \text{volume de vazios (B-A)} / \text{volume CP (C)} \times 100$ $\text{Absorção d'água aparente (\%)} = \text{massa água absor. (B-A)} / \text{massa seca (A)} \times 100$
--

As modificações da norma ABNT propostas abaixo objetivam diminuir os erros analíticos, facilitar a preparação dos corpos de prova, fornecer informações adicionais ao especificador/prospector e simular situações reais de absorção (durante o assentamento, por exemplo).

Uma das modificações se refere ao processo de preparação dos corpos de prova, que pela ABNT são obtidos através de quebra manual e possuindo cada um em torno de 7cm de diâmetro ou massa de 250g. Desse modo ocorre um significativo fraturamento, que induz a valores mais altos de absorção e porosidade. Devido às variações de geometria em função de possíveis diferenças no padrão de ruptura, estes corpos terão também áreas de absorção

efetiva distintas. Foi então proposto que os corpos tenham o mesmo grau de intemperismo e sejam obtidos com o uso de serra diamantada, com dimensões aproximadas de 7,0x7,0x2,0cm (ou 250g). Assim evitaria-se o fraturamento, o material comercializado se assemelharia mais ao CP ensaiado e ainda haveria uma maior uniformização da área e das condições de absorção. Recomenda-se fazer ainda ensaios comparativos entre CP não polidos e com uma das faces polidas. Assim pode-se avaliar melhor os padrões de manchamento e verificar se há diferenças significativas dos parâmetros calculados.

Os valores obtidos de absorção e porosidade para os CP do dolomito tipo pérola quebrados manualmente foram maiores do que para o mesmo material serrado. Isso demonstra a tese que a quebra manual induz uma distorção de valores, diferindo portanto do material efetivamente comercializado.

Durante a etapa de absorção de água pelos CP, pode-se ainda obter uma informação importante, que é a potencialidade da rocha em formar manchas. A água absorvida pela face inferior não polida do CP tende a se deslocar para a face superior devido ao processo de capilaridade. Devido ao polimento da face superior, há uma tendência de acúmulo dessa água por um tempo mais prolongado, pois nestas condições o processo de evaporação fica prejudicado. Este dado deve ser incluído nas análises, dando uma informação da propensão ou não do material analisado apresentar manchas durante o assentamento, quando sua face inferior entra em contato com fluídos. Deve-se informar ainda se o fenômeno de capilaridade ocorreu ao longo de alguma descontinuidade ou mineral específico.



Foto 6.7: Corpos de prova do dolomito Jacarandá (dimensões 7x7x2cm).

Comparando-se os dados das amostras **F (tabela 6.2)** e **G (tabela 6.3)**, que tiveram parte dos CP saturados até a metade de sua altura e a outra porção totalmente encoberta durante a saturação, verificou-se que esta última tem valores de absorção entre 4,2 a 7,6% maiores. Como durante a fase de assentamento estes materiais absorvem água quase que exclusivamente pela face inferior e em quantidade limitada, pode-se portanto esperar na prática valores de absorção em torno de 10 a 15% menores que os obtidos nos ensaios.

AMOSTRA	MASSA ESP. APAR. SECA (g/cm³)	MASSA ESP. APAR. SATUR. (g/cm³)	POROSIDADE APARENTE (%)	ABSOR. ÁGUA APARENTE (%)	ABSORÇÃO MÉDIA (%)	DESCRIÇÃO
F1	2,857	2,860	0,329	0,115	0,1255 (+7,6%)	Dolomito Pérola 7x7x2cm / polido
F2	2,855	2,859	0,367	0,129		
F3	2,857	2,861	0,399	0,140		
F4	2,857	2,861	0,338	0,118		
F5	2,857	2,860	0,324	0,114	0,116 (saturado ½ h)	
F6	2,855	2,859	0,334	0,117		
F7	2,855	2,858	0,333	0,117		
F8	2,859	2,862	0,331	0,116		

Tabela 6.2: Determinação de índices físicos no dolomito aurora pérola.

AMOSTRA	MASSA ESP. APAR. SECA (g/cm³)	MASSA ESP. APAR. SATUR. (g/cm³)	POROSIDADE APARENTE (%)	ABSOR. ÁGUA APARENTE (%)	ABSORÇÃO MÉDIA (%)	DESCRIÇÃO
G1	2,864	2,868	0,417	0,146	0,1142 (+4,2%)	Dolomito Jacarandá 7x7x2cm / polido
G2	2,863	2,865	0,281	0,098		
G3	2,866	2,869	0,284	0,099		
G4	2,863	2,866	0,329	0,115		
G5	2,864	2,867	0,323	0,113		
G6	2,868	2,871	0,326	0,114	0,1094 (saturado ½ h)	
G7	2,865	2,868	0,302	0,105		
G8	2,869	2,872	0,308	0,108		
G9	2,861	2,864	0,289	0,101		
G10	2,863	2,866	0,340	0,119		

Tabela 6.3: Determinação de índices físicos no dolomito jacarandá.

Um outro ensaio que poderia ser desenvolvido para os materiais com maiores índices de absorção consistiria em determinar os intervalos de tempo para que uma placa de dimensões padronizadas teria sua superfície manchada quando submetida à absorção de água na metade da altura do CP. Neste ensaio seria determinado o tempo necessário para manchar, por exemplo, 10%, 25%, 50%,etc. da superfície do CP, podendo-se assim comparar valores de materiais distintos e quantificar uma patologia muito encontrada em

várias obras. Após a obtenção destes valores, poderia-se medir o tempo que uma determinada área do CP levaria para voltar à condição sem mancha sob temperatura e umidade do ar controladas. Como o contraste destas manchas serão diferentes para cada material, pode-se ainda estabelecer uma escala de intensidade para o manchamento.

A amostragem do material analisado do Cumbi foi feita tanto nas frentes de lavra da pedreira quanto na serraria. Foram ensaiadas 11 amostras, onde determinou-se a massa específica aparente seca, saturada, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Nas **tabelas 6.4 e 6.5** são apresentadas as sínteses dos valores obtidos para os vários litotipos ensaiados na pedreira do Cumbi.

TIPO	POROSIDADE APARENTE			ABSORÇÃO APARENTE			DESCRIÇÃO
	MÍN(%)	MÁX(%)	MÉDIA(%)	MÍN(%)	MÁX(%)	MÉDIA(%)	
PÉROLA 1	0.155	0.531	0.381	0.054	0.187	0.134	Bege, pouco micáceo
PÉROLA 2	0.324	0.399	0.344	0.114	0.140	0.121	Bege, pouco micáceo
PÉROLA VEIADO 1	0.373	0.427	0.401	0.131	0.149	0.140	Bege, muito micáceo
PÉROLA VEIADO 2	0.654	0.733	0.691	0.229	0.258	0.242	Bege, muito micáceo
PINK 1	0.321	0.406	0.351	0.112	0.142	0.123	Rosado escuro
PINK 2	0.505	0.793	0.682	0.177	0.279	0.239	Vermelho claro
PRATA	0.332	0.446	0.369	0.117	0.157	0.129	Cinza, pouco micáceo
JACARANDÁ	0.281	0.417	0.320	0.098	0.146	0.112	Micáceo

Tabela 6.4: Resumo dos ensaios de absorção e porosidade nos litotipos da Pedreira do Cumbi.

Como pode ser observado, estes valores são ainda muito aquém do limite máximo admitido para absorção d'água em mármore pela ASTM (EUA), que é de 0,75%. Os valores obtidos estão inclusive dentro do limite máximo admitido para os granitos, que é de 0,40%.

TIPO	MASSA ESP. APAR. SECA	MASSA ESP. APAR. SAT.
	MÉDIA (g/cm ³)	MÉDIA (g/cm ³)
PÉROLA 1	2.849	2.853
PÉROLA 2	2.857	2.860
PÉROLA VEIADO 1	2.855	2.859
PÉROLA VEIADO 2	2.850	2.857
PINK 1	2.855	2.859
PINK 2	2.849	2.856
PRATA	2.855	2.858
JACARANDÁ	2.865	2.868

Tabela 6.5: Resumo dos ensaios de determinação da massa específica aparente.

6.2.4 – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO ÁCIDO SULFUROSO

A seguir são descritos os procedimentos que foram utilizados na realização destes testes, que sofreram modificações em relação à proposta européia, principalmente quanto às dimensões dos corpos de prova, volume e concentração dos reagentes.

Este ensaio consiste em atacar com os vapores (SO_2) produzidos pelo ácido sulfuroso as amostras acondicionadas dentro de um recipiente fechado, com 4000cm^3 de volume. As amostras são isoladas do ácido por uma plataforma de plástico resistente, que é colocada na base do recipiente (foto 6.8).



Foto 6.8: Recipiente fechado com 4000cm^3 de volume onde é realizado o teste. As amostras são isoladas do ácido por uma plataforma de plástico resistente.

A solução ácida é composta por ácido sulfuroso (H_2SO_3) a 6% e água deionizada. Para cada teste são usados 600ml de solução de ácido e 200ml de água. Por questões de segurança, o ácido deve ser colocado na água (e nunca o contrário).

A partir de cada amostra coletada são preparados seis corpos de prova (CP), com uma de suas faces polida (ou conforme seja comercializado o material) e com dimensões aproximadas de $7,0 \times 7,0 \times 2,0\text{cm}$. Devem ser evitadas as amostras com quinas quebradas ou outros defeitos resultantes da preparação ou manipulação das amostras. Assim, é possível aproveitar os CP já utilizados para fazer os ensaios de absorção e porosidade.

Três deles são colocados em estufa a temperatura de 100°C por 24 horas e, depois de resfriados à temperatura ambiente, devem ser pesados. A seguir esses CP são submergidos em água deionizada por igual período de tempo. Os outros 3 CP são mantidos para se fazer uma comparação ao final do teste e/ou uma eventual repetição desta análise.

Após 24 horas de saturação em água, os CP são colocados na posição vertical dentro de um recipiente fechado, sem contato direto com a solução ácida. O recipiente é então vedado e os corpos de prova são mantidos por 21 dias a uma temperatura em torno de 23°C. Pelo menos a cada sete dias deve-se acompanhar as mudanças na superfície dos CP e anotar ou fazer um registro fotográfico de qualquer anomalia.

Após 21 dias as amostras são retiradas, lavadas em água deionizada e colocadas para secagem em estufa à 100°C por 24 horas. Cada um dos CP são pesados, avalia-se em seguida a perda de peso e faz-se uma verificação visual das alterações superficiais, mudanças de cor, desprendimento de material e outros defeitos que possam afetar a estrutura do material.

Acompanhando estas descrições deve-se acrescentar informações petrográficas, nome comercial, local de extração, presença de qualquer descontinuidade ou anisotropia na amostra e fazer um registro fotográfico.

Os valores de perda de massa por CP e a média por amostra são indicados na **tabela 6.6**. Os CP da série F são do dolomito Aurora Pérola e os da série G do tipo Jacarandá. As **fotos 6.9** e **6.10** mostram as alterações sofridas pelo dolomito Jacarandá antes e após o ataque com vapores de ácido. Comparando-se com o Aurora Pérola, este apresentou maiores alterações, sendo atacado tanto a porção carbonática quanto os níveis micáceos. A face polida sofre menos o ataque ácido do que a face bruta, como pode-se observar na **foto 6.10**. Em vista disso, pode-se ter uma idéia mais precisa do comportamento do material em ambientes agressivos, já que os mármore em geral são comercializados polidos.

CP	massa seca antes	massa seca depois	perda de massa		média	MATERIAL ENSAIADO
	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)	
F6	273,46	273,13	0,33	0,121	0,109	Pérola 2
F7	274,42	274,12	0,30	0,109		
F8	275,88	275,61	0,27	0,098		
G5	230,59	230,08	0,51	0,221	0,178	Jacarandá
G7	237,19	236,90	0,29	0,122		
G9	247,52	247,05	0,47	0,190		

Tabela 6.6: Perda de massa dos CP submetidos ao ensaio de ataque ácido.

Como não existem ainda limites máximos de perda de massa estabelecidos para este tipo de ensaio, os valores obtidos terão que ser comparados com outras rochas carbonáticas que venham a ser ensaiadas usando os procedimentos descritos acima.



Foto 6.9: Detalhe do dolomito Jacarandá antes do teste com vapores de ácido.



Foto 6.10: Comparação do desgaste com vapores de SO_2 da face não polida e polida do dolomito Jacarandá.

7 - ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA O DOLOMITO DO CUMBI E COMPARAÇÕES COM OS DADOS DISPONÍVEIS PARA OUTRAS ROCHAS

Com base nos ensaios de absorção e porosidade realizados neste trabalho para os dolomitos do Cumbi, pode-se observar que em relação à absorção e porosidade (tabela 7.1), seus parâmetros superam a maioria dos outros mármore nacionais e importados (Marrom Imperador e Piel Serpentina são também de composição dolomítica).

Ao final dos ensaios, pode-se constatar que os valores médios de porosidade e absorção dos dolomitos do Cumbi estão ainda muito aquém dos limites máximos admitidos pela ASTM para os mármore (tabela 7.2). Para efeitos comparativos, enquanto os dolomitos Aurora têm absorção e porosidade médias em torno de 0,155% / 0,442%, os “granitos” Capão Bonito e do tipo Verde Ubatuba têm valores de 0,220% / 0,570% e 0,460% / 1,260%, respectivamente. Os dolomitos do Cumbi estão inclusive próximos ao limite máximo admitido de absorção d’água aparente para os granitos, que é de 0,40%.

Isso atesta sua qualidade no que se refere à baixa possibilidade de ocorrência de manchamentos, superando materiais de natureza carbonática e silicática.

Para todos os litotipos do Cumbi, os valores de massa específica aparente seca foram também maiores que 2,80%.

PROPRIEDADES	ASTM	
	DOLOMITO	GRANITO
Massa específica aparente (g/cm ³)	≥2,80	≥2,56
Absorção d’água aparente (%)	≤0,75	≤0,40
Compressão uniaxial (MPa)	≥52	≥131
Flexão (MPa)	-	≥8,27
Módulo de ruptura / flexão (MPa)	≥7	≥10,3

Tabela 7.2: Recomendações de parâmetros físicos mínimos para mármore dolomíticos e granitos. **FONTE:** ASTM C503 (mármore), C615 (granitos)

MATERIAL		POROSIDADE APAR. (%)	ABSORÇÃO APAR. (%)
MÁRMORE (BRASIL)	MÍNIMO*	0,02	0,01
	MÁXIMO**	4,355	1,688
MÁRMORES DA PEDREIRA DO CUMBI (AURORA)	Pérola veiado 1	0,401	0,140
	Pérola veiado 2	0,691	0,242
	Pink 1	0,351	0,123
	Pink 2	0,682	0,239
	Pérola 1	0,381	0,134
	Pérola 2	0,344	0,121
	Prata	0,369	0,129
	Jacarandá	0,320	0,112
MÁRMORES IMPORTADOS E NACIONAIS	Bege Bahia**	4,355	1,688
	Perlino Bianco**	2,550	0,969
	Perlino Rosado**	2,249	0,853
	Marrom Imperial**	0,738	0,267
	Verde Alpi**	0,730	0,266
	Rosso Verona**	0,701	0,260
	Marrom Emperor**	0,704	0,254
	Branco Especial**	0,442	0,154
	Piel Serpentina***	1,10	3,20
	Crema Marfil***	1,30	0,50
	Branco R.G.Norte****	1,63	0,58
	Rosa Bahia****	1,55	0,58
	Verde Canoé – RN****	1,46	0,55
	Preto Cruzeiro****	0,63	0,23
	Cinza Biré – RN****	0,57	0,21
	Ônix Ouro – RN****	0,51	0,19
	Branco Paraná****	0,33	0,12
	Branco Piauí (fino)****	0,32	0,11
	Branco Esp. Santo****	0,17	0,06

Tabela 7.1: Quadro comparativo dos valores de porosidade e absorção aparente dos litotipos da Pedreira do Cumbi e outros mármore.

FONTES: * Frazão e Farjallat (1995) ** Oliveira (1998) *** Esteve & Mañez (catálogo) **** IPT (1982)

A Mineração Minas Pérola forneceu valores de ensaios de compressão uniaxial de uma campanha realizada anteriormente. Os valores de resistência à compressão uniaxial médios para os dolomitos ensaiados foi de 150MPa, superando inclusive o limite mínimo exigido pela ASTM para os granitos, que é de 131MPa. Frazão (1995) apresentou valores mínimos e máximos para mármore brasileiros de 37 e 214 MPa, respectivamente.

Apesar dos dolomitos do Cumbi não estarem ainda completamente caracterizados, pode-se ter uma noção de seus parâmetros físicos através da comparação com os valores apresentados por outros mármore brasileiros (**tabela 7.3**).

PROPRIEDADES	MÁRMORES			
	mínimo	máximo	média	Cumbi (médio)
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,61	3,04	2,79	2,854
Porosidade aparente (%)	0,02	4,36	0,51	0,442
Absorção d'água aparente (%)	0,01	1,68	0,19	0,155
Desgaste Amsler (mm)	1,19	8,08	3,59	-
Impacto de corpo duro (m)	0,22	0,88	0,44	-
Compressão uniaxial (MPa)	37	214	110	150
Módulo de ruptura / flexão (MPa)	6	28,5	14,6	-
Dilatação térmica linear (10 ⁻³ mm/m°C)	3,2	17,3	10,1	-

Tabela 7.3: Parâmetros tecnológicos médios de alguns mármore brasileiros (modificado de Oliveira, 1998 e Frazão & Farjallat, 1995).

Os resultados dos ensaios de ataque ácido são apresentados na **tabela 7.4**. Foram submetidas a este ensaio uma amostra de dolomito pérola e outra de dolomito jacarandá. Como não existem ainda limites máximos estabelecidos para este tipo de ensaio, estes valores terão que ser comparados com outras rochas carbonáticas que venham a ser ensaiadas usando os mesmos procedimentos seguidos neste trabalho. Como observado na **foto 7.1**, podem-se observar alterações estéticas e físicas (mudança de cor, rugosidade da superfície) nos dolomitos do Cumbi, principalmente na face não polida do CP. Alterações deste tipo são comuns também a algumas ardósias espanholas (**tabela 7.6**).

CP	massa seca antes	massa seca depois	perda de massa		média (%)	MATERIAL ENSAIADO
	(g)	(g)	(g)	(%)		
F6	273,46	273,13	0,33	0,121	0,109	Pérola 2 (alterações superficiais)
F7	274,42	274,12	0,30	0,109		
F8	275,88	275,61	0,27	0,098		
G5	230,59	230,08	0,51	0,221	0,178	Jacarandá (alterações superficiais)
G7	237,19	236,90	0,29	0,122		
G9	247,52	247,05	0,47	0,190		

Tabela 7.4: Perda de massa dos CP submetidos ao ensaio de ataque ácido.

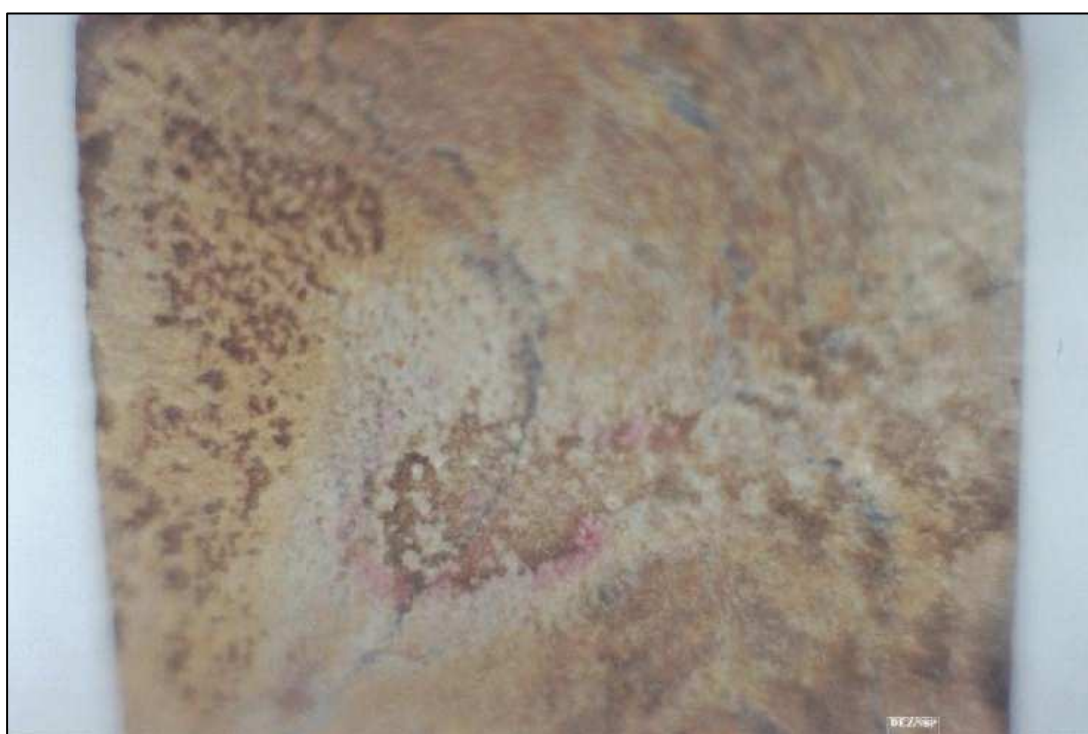


Foto 7.1: Corpo de prova de dolomito submetido a ataque ácido.

Para se poder traçar comparativos quanto à adequabilidade das diversas rochas ornamentais, reuniu-se também informações de características técnicas de granitos brasileiros (**tabela 7.5**) e ardósias espanholas (**tabela 7.6**).

Apesar de não ocorrer o manchamento de ardósia pela absorção d'água, devido às suas características físicas e estéticas, é possível observar que a absorção média das ardósias espanholas (2%) é mais acentuada que a média dos mármore (1,01%) e granitos (0,21%) brasileiros. Por outro lado, a resistência à flexão dessas ardósias varia de 30 a 55 MPa, enquanto que a média para os mármore e granitos brasileiros é de 14,6% e 18,5%, respectivamente.

PROPRIEDADES	GRANITOS		
	mínimo	máximo	média
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,55	3,50	2,68
Porosidade aparente (%)	0,07	2,92	0,58
Absorção d'água aparente (%)	0,02	1,14	0,21
Desgaste Amsler (mm)	0,34	2,02	0,69
Impacto de corpo duro (m)	0,22	0,98	0,48
Compressão uniaxial (MPa)	52	323	48,1
Módulo de ruptura / flexão (MPa)	7,4	48,1	18,5
Dilatação térmica linear (10 ⁻³ mm/m°C)	5,1	16,1	9,4

Tabela 7.5: Parâmetros tecnológicos médios de alguns granitos brasileiros (modificado de Frazão & Farjallat, 1995).

PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS	ZONA CENTROIBÉRICA				ZONA ASTURO- OCIDENTAL-LEONESA	
	S. de la Codosera	S. de Alcasices	Sinclinal de Truchas	Domínio del Caurel	D. Manto de Mondoñedo	D. Navia y Alto Sil
Cor	Preta	Cinza	Cinza escuro	Cinza	Verde	Cinza
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,71	2,77	2,83	2,83	2,79	2,80
Absorção d'água aparente (%)	2,7	2,7	1,4	1,8	1,1	2,3
Resistência a flexão (MPa)	300-400	300-450	350-475	400-550	300-400	300-400
Resistência a geladas	-	-	-	-	-	-
Resistência a mud. térmicas	+	-	-	+	+	+
Resistência aos ácidos	+	+	-	+	+	+
Conteúdo de carbonatos (%)	0,5	-	-	0,7	0,1	0,1

++ grandes alterações + observam-se alterações - não se observam alterações

Tabela 7.6: Características tecnológicas de ardósias espanholas segundo normas UNE (Rodríguez *et al.*, 1997).

Apesar da falta de dados de ensaios tecnológicos para os arenitos e quartzitos, na **tabela 7.7** são mostrados os índices físicos de sete tipos de quartzito. Os três primeiros tipos são encontrados na Serra do Espinhaço meridional (região de Serro e Diamantina - MG), o

seguinte em São Tomé das Letras (MG) e os três últimos no Estado da Bahia. Ao lado na tabela são apresentados ainda os seus respectivos parâmetros-limite segundo a ASTM (para arenitos com mais de 95% SiO₂).

Quartzitos	Massa específica aparente seca (g/cm ³)	Massa específica aparente saturada (g/cm ³)	Porosidade Aparente (%)	Absorção d'água Aparente (%)	Limite massa específica ASTM (g/cm ³)	Limite absorção ASTM (%)
Branco Galho do Miguel	2,644	2,650	0,584	0,221	>2,560	<1,0
Rosinha do Serro	2,654	2,662	0,728	0,274		
Vermelho Bandeirinha	2,637	2,650	1,404	0,532		
Quartzito São Tomé (foliado)	-	-	0,468	1,224		
Quartzito Azul Imperial	2,692	2,694	0,180	0,067		
Quartzito Azul	2,710	2,710	0,340	0,130		
Quartzito Rosa Aurora	2,552	2,588	3,700	1,440		

Tabela 7.7: Índices físicos para quartzitos e limites fixados pela ASTM. FONTES: Andrade e Oliveira (no prelo), Costa (1998); Oliveira (1998).

A perda de resistência relativa do mármore e do granito ao longo do tempo pode ser vista no gráfico da **figura 7.1**. Apesar de todos os materiais pétreos requererem, em função de suas características, cuidados especiais na escolha do local a ser aplicado, a diferença significativa em termos de resistência mostrada na figura abaixo indica que de uma maneira geral, o mármore não deve ser exposto a condições severas de intemperismo.

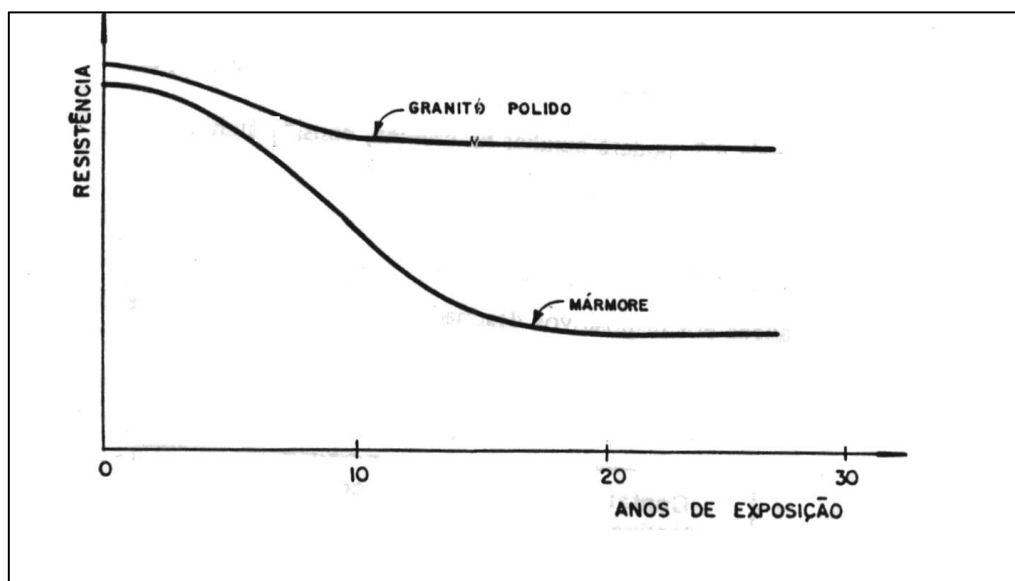


Figura 7.1: Comparação relativa da perda de resistência para o mármore e o granito ao longo do tempo (Stecich, 1990 in Flain, 1995).

8 – CONCLUSÕES

CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

Embora grande parte dos materiais comercializados atualmente já tenham suas propriedades físico-químicas e petrográficas conhecidas, essas informações não são divulgadas para os consumidores e especificadores (engenheiros, arquitetos, etc), ou então o são, mas de forma incorreta. Como grande parte dos números e unidades expostas nas tabelas não dão uma idéia imediata da qualidade do material e de suas limitações, quanto aos ambientes em que pode ser aplicado, propõe-se uma divisão das rochas em categorias em função de seus parâmetros de qualidade. Estariam excluídos quaisquer critérios subjetivos, como por exemplo seus atributos estéticos.

Pode-se dividir as rochas ornamentais em 4 categorias:

- Rochas carbonáticas;
- “Granitos”;
- Ardósias;
- Quartzitos.

Cada material seria classificado em uma dessas categorias de acordo com suas características físicas e petrográficas. Dentro dessas categorias o material receberia, de acordo com cada um de seus valores de absorção, perda de massa, cristalização de sais, resistência à flexão, resistência à compressão, etc, uma pontuação de 1 a 6. A média de sua pontuação serviria para classificá-lo como uma rocha classe A, B ou C. Para que esta classificação tenha validade, devem-se uniformizar os procedimentos dos ensaios de laboratório, de forma que ela tenha ampla aceitação e credibilidade.

Com base nestas classes, o consumidor poderia ter uma informação mais direta e imparcial do produto que está adquirindo. Uma pessoa sem conhecimentos técnicos poderia, por exemplo, aplicar com segurança materiais de classe C em locais menos sujeitos a desgastes físico-químicos ou a solicitações mecânicas, enquanto que os materiais classe A poderiam ser aplicados em fachadas, cozinhas, etc. Vale frisar mais uma vez que essa classificação não leva em conta o valor de mercado, padrão de cor, “defeitos” estéticos, etc. Dessa maneira pode-se ocorrer uma reversão no número de obras em que ocorrem patologias ligadas a especificação incorreta de materiais. Podemos citar como exemplo de mau uso de material a tendência de aplicação de mármore porosos em fachadas externas de centros comerciais e no revestimento interno de banheiros.

COMPARAÇÕES ENTRE ROCHAS ORNAMENTAIS E OUTROS MATERIAIS

Através da análise da **tabela 8.1** pode-se perceber que as rochas ornamentais, quando bem aplicadas, podem superar em durabilidade a maioria dos materiais de construção e acabamento existentes. Para obter fatias ainda maiores do mercado não bastará apenas aumentar a escala de produção e reduzir os preços, mas sim manter a idéia de que as rochas ornamentais são um acabamento requintado, durável e de fácil manutenção. Para isso é urgente que sejam corrigidos os erros de especificação e aplicação nas obras a serem construídas, para que essa imagem de qualidade e beleza não seja perdida.

Pode-se ainda dizer que essa imagem positiva das rochas ornamentais não foi conseguida pelo esforço do setor na área de marketing. O consumidor certamente reconhece os atributos estéticos naturais da pedra e faz uma ligação inconsciente do produto com solidez e, talvez ainda, com os grandes monumentos históricos preservados. Os esforços devem se concentrar no sentido de oferecer materiais cada vez mais bem acabados, com preço e qualidade, e que estes sejam aplicados dentro de suas limitações físico-químicas, com técnica e mão de obra capacitada.

MATERIAIS	CONDIÇÕES DE TRABALHO E EXPOSIÇÃO (durabilidade em anos)			
	MUITO SEVERAS *	SEVERAS **	BRANDAS ***	MUITO BRANDAS ****
PEDRAS PRECIOSAS	10^3 a 10^4	10^5	10^6	10^7
ROCHAS MUITO COESAS	10^2 a 10^3	10^3 a 10^4	10^5	10^6
ROCHAS COMUNS	10 a 10^2	10^2 a 10^3	10^4	10^5
CERÂMICAS MUITO COESAS	10^2 a 10^3	10^3 a 10^4	10^5	10^6
CERÂMICAS COMUNS	1 a 10^2	10^2 a 10^3	10^4	10^5
REBOCOS DE CAL (ALTA RESIST.)	10 a 10^2	10^2 a 10^3	10^4	10^5
ARGAMASSAS	1 a 10	10 a 10^2	2×10^3	10^4
ESTUQUES	-	1 a 10	50	2×10^3
METAIS	1 a 10	10 a 10^2	5×10^3	10^4
MADEIRAS	1 a 10	10 a 10^2	10^3	10^4

* amplas variações de temperatura e umidade do ar, insolação direta e forte, ação eólica atuante e poluição atmosférica presente.

** variações moderadas quer da temperatura e umidade do ar, quer da ação solar.

*** variações ambientais mínimas, temperatura moderada e clima seco.

**** clima seco, com temperatura constante e baixa, ação eólica discreta e ao abrigo das radiações solares.

Tabela 8.1: Durabilidade média (em anos) de materiais pétreos, metais e madeiras (Barros, 1998).

APROVEITAMENTO DO DOLOMITO PARA OUTROS FINS

Com as crescentes pressões dos órgãos ambientais, os resíduos sólidos das pedreiras de rochas ornamentais devem ser cada vez mais usados como matéria-prima para outras indústrias. A comercialização destes resíduos pode gerar uma fonte secundária de recursos e empregos, melhorar a imagem da empresa junto a comunidade e diminuir o impacto visual e outros danos provocados ao meio ambiente.

No caso do Cumbi, onde há um parque industrial de beneficiamento de blocos e chapas, há também a geração de finos provenientes da serragem de blocos e chapas, que saem do teares e serras com uma textura pastosa. Estes resíduos requerem mais cuidados do que os sólidos, sendo necessária a construção de cones decantadores ou barragens (caso do Cumbi) para evitar seu contato com os cursos d'água. Sua composição básica é pó de dolomito, cal, gralha e água.

Abaixo são relacionados alguns produtos a que se prestam os rejeitos de pedreiras de calcário, dolomito e rochas derivadas (Limaverde, 1987):

- Cimento;
- Brita, granulado ou pedrisco para construção civil;
- Pó calcário para corretivo do solo;
- Cal virgem - $\text{CaCO}_3 + \text{calor} \Rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ e cal hidratada - $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{calor}$;
- Cromatos, bicromatos e ácido cítrico (desde que o dolomito seja livre de substâncias deletérias);
- Sais de epton (dolomito com carbonatos >99%);
- Inerte de fertilizante (dolomito ou calcário puro);
- Recuperação de MgO a partir da água do mar;
- Cloreto de magnésio (dolomito puro);
- Dolomita refratária, calcinada e supercalcinada.

PEDREIRA DO CUMBI

Os dolomitos do Cumbi tem um formato lenticular, com direção principal E-W. Em relação às frentes de lavras, as lentes apresentam continuidade para E (topo mergulhando aproximadamente 30°). Essas rochas foram submetidas a eventos que promoveram o seu dobramento, pequenas faixas de cisalhamento (aproximadamente N-S) e frentes de empurrão para W. A foliação mergulha predominantemente para sul e as dobras

apresentam vergência para norte (com eixo para leste). Nos dolomitos a foliação é marcada pela presença de um plano fino de sericita.

Em virtude do afastamento desta área em relação ao Complexo do Bação, as rochas estudadas não foram submetidas a metamorfismo de contato. Pelas paragêneses minerais descritas (muscovita, calcita-dolomita, clorita, quartzo), o metamorfismo se deu no fácies xisto-verde.

Devido à presença de estruturas estromatolíticas, ao processo de dolomitização e à dificuldade de se estabelecer um modelo claro de paleorelevo+deformações estruturais, os tipos de dolomito do Cumbi não apresentam em geral uma compartimentação definida. Sendo assim, a lavra é feita sem uma previsão de médio prazo do volume de cada material que será extraído. Portanto, não é possível ainda se estabelecer uma cubagem confiável em relação a cada tipo de material. Como já planejado pela empresa, deve-se realizar uma campanha de sondagem com recuperação de testemunhos para avaliar melhor a distribuição dos litotipos e a geometria dos corpos dolomíticos, fornecendo informações de sua relação com as rochas adjacentes.

Com relação aos ensaios de índices físicos, os dolomitos Aurora apresentam índices de porosidade e absorção abaixo da média das rochas carbonáticas, não sendo observado manchamento significativo provenientes do processo de absorção de água. Isso qualifica este material como escolha preferencial em relação às outras rochas carbonáticas para aplicação em áreas sujeitas a maior umidade ou contato com água.

No galpão de beneficiamento do Cumbi é observada perda de material durante o transporte interno, serragem e embalagem das chapas e ladrilhos. Isso ocorre devido a presença de planos micáceos e outras discontinuidades estruturais na rocha. É aconselhável portanto a colocação de telas de reforço de fibra de vidro na parte não polida da chapa para diminuir as perdas. Este processo está em fase de implantação na empresa.

De uma maneira geral, as rochas dolomíticas do Cumbi apresentam propriedades físicas e estéticas superiores à média das rochas carbonáticas. Contudo, estes materiais não estão completamente caracterizados e, como todas as outras rochas carbonáticas, apresentam restrições de aplicação.

Em virtude disso, até que se faça o ensaio de flexão e se determine sua resistência máxima (paralela e ortogonalmente à foliação), não é aconselhável o uso deste material em algumas situações especiais, como em áreas sujeitas a esforços flexurais grandes e bancadas com apoios espaçados, sujeitas a cargas elevadas. Em situações onde parte do material se encontre sem apoio, como alguns tipos de escada e entradas de edifícios, seu uso deve ser por hora limitado.

Deve-se realizar também testes de desgaste Amsler para quantificar a resistência destes dolomitos em áreas de maior tráfego de pessoas, onde as rochas carbonáticas não apresentam em geral comportamento satisfatório.

Para relacionar os valores obtidos de resistência aos vapores de ácido sulfuroso para o dolomito do Cumbi, devem-se realizar testes comparativos com outras rochas. Com essa informação, poderá ser quantificado se sua aplicação em fachadas e em outros revestimentos externos é indicada, de acordo com a experiência obtida com materiais que não apresentaram patologias e tenham parâmetros iguais ou inferiores ao dos dolomitos Aurora.

APLICAÇÃO DO MÉTODO GPR

Este método provou ser de utilidade para a previsão de feições estruturais e na previsão da qualidade do maciço. Para que ele seja implementado com sucesso nas fases de prospecção e exploração de jazidas de rochas ornamentais, deve-se prosseguir com os estudos de suas limitações e com a formação e treinamento de equipes. A fase de interpretação dos dados e definição do método de pesquisa e modelo geológico são a chave para fornecer respostas concretas. As Universidades tem um papel importante no desenvolvimento desta aplicação, já que dispõe de equipamento e mão de obra qualificada, com alunos e orientadores com formação adequada para testar novos procedimentos e desenvolver uma sistemática de aquisição de dados e processamento.

No caso específico da pedreira do Cumbi, espera-se que possa ser dado prosseguimento ao trabalho ora iniciado. Deste modo, será possível a partir do acompanhamento do avanço da lavra, comparar as interpretações dos perfis com as feições estruturais que estarão expostas. Foram interpretadas basicamente na frente de lavra Lapa fraturas persistentes e abertas, feições dobradas e encavernamentos. No Cumbi do Meio e Direito, foram observadas feições de dobramento, reflexões relacionadas a uma família de fraturas com caimento para NW e um possível encavernamento. A partir dos perfis analisados na Lapa, pode-se concluir que, por estes não apresentarem indicações do contato inferior com filitos ou quartzitos, existe uma reserva de dolomito de pelo menos 40 metros abaixo da cota atual do pit (1120m).

Recomenda-se que sejam feitos perfis com antenas de mais alta frequência para se definir melhor o padrão estrutural nas área não investigadas. Após a interpretação desses dados, devem ser feitas seções com antenas de 50MHz, para definir a continuidade das estruturas em profundidade.

Pode-se concluir que foi válido a aplicação do *GPR*, embora tenha-se que aprimorar ainda várias etapas para ser possível obter respostas concretas em situações que envolvam riscos financeiros ou à segurança.

9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1992) *Rochas para revestimento – Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente*. NBR 12766; 2p.
- . (1992) *Materiais Inorgânicos – Determinação do desgaste por abrasão*. NBR 12042; 3p.
- . (1992) *Rochas para revestimento – Determinação da resistência à compressão uniaxial*. NBR 12767; 2p.
- . (1992) *Rochas para revestimento – Ensaio de congelamento e degelo conjugado à verificação da resistência à compressão*. NBR 12769; 2p.
- . (1992) *Rochas para revestimento – Determinação da resistência ao impacto de corpo duro*. NBR 12764; 2p.
- . (1992) *Rochas para revestimento – Análise petrográfica*. NBR 12768; 2p.
- . (1992) *Rochas para revestimento – Determinação da resistência à flexão*. NBR 12763; 3p.
- . (1992) *Rochas para revestimento – Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear*. NBR 12765; 2p.
- American Society for Testing and Materials – ASTM (1992) *Specification for granite dimension stone* – ASTM C 615.
- (1990) Test methods for absorption and bulk specific gravity of dimension stone–ASTM C97
- . (1990) Test method for compressive strength of dimension stone – ASTM C 170.
- . (1989) Specification for marble dimension stone (external use) – ASTM C 503.
- . (1989) Specification for limestone dimension stone – ASTM C 568.
- . (1989) Specification for quartz-based dimension stone – ASTM C 616.
- . (1989) Test method for flexural strength of dimension stone – ASTM C 880.
- . (1987) Test method for modulus of rupture of dimension stone – ASTM C 99.
- Barbosa, A.L.M. (1968) *Contribuições recentes a Geologia do Quadrilátero Ferrífero*. SBG-MG, reimpressão 1985: UFMG, IGC-Dpto. Geol.; 44p.
- Barros, L.A. (1991) *Alteração e Alterabilidade das Rochas*. Instituto Nacional de Investigação Científica – Lisboa; 383 p.
- Belo de Oliveira, O. A. & Teixeira, W. (1990) *Evidências de uma tectônica tangencial Proterozóica no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Anais do 36º C.B.Geologia, Natal, vol. 6, p.2589-2604.
- Benson, A. K. (1995) *Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of ground water contamination, faults, cavities*. Journal of Applied Geophysics; 33; p.177-193.

- Botelho, M. A. B. *et al.* (1996) *Detecção de Cavernas e Estruturas de Dissolução em Rochas Carbonáticas Usando Radar (GPR)*. Anais do 39º C.B.Geologia; p.388-390.
- Botelho, M. A. B. *et al.* (1996) *Emprego de Radar para Detecção de Fraturas em Corpos Graníticos*. Anais do 39º C.B.Geologia; p.391-393.
- Carneiro, M.A *et al.* (1995) *Evolução policíclica do Quadrilátero Ferrífero: Uma análise fundamentado no conhecimento atual da geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Sm-Nd*. REM, Ouro Preto, 48 (n.4); p. 264 – 273.
- Carreón-Freyre D. *et al.* (1996) *Caractérisation Géométrique des Réseaux de Fracturation en Carrière de Roches Ornementales. Application à L’Optimisation de L’Exploitation*. Bulletin de l’Association Internationale de Géologie de L’Ingénieur; 54; p.45-58.
- Chemale Jr. *et al.* (1991) *Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Um modelo*. Pesquisas- UFRGS; 18(2), p.104-127.
- Chemale Jr., F., Rosière, C.A. & Endo, I. (1994) *The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Precambrian Research; 65; p.25-54.
- Chiodi F^o., C. (1995) *Aspectos Técnicos e Econômicos do Setor de Rochas Ornamentais*. CNPq/CETEM; 75p.
- COMIG (1998) *Diagnóstico do setor de rochas ornamentais e de revestimento no Estado de Minas Gerais*. Relatório Geoexplore Consultoria Ltda.; 114p.
- Costa, A.G. *et al.* (1998) *Caracterização de quartzitos mineiros e suas aplicações no setor de rochas ornamentais*. Anais do 40º C.B.Geologia; p.307.
- Dardenne, M.A. & Campos Neto, M.C. (1975) *Estromatólitos da Série Minas (MG)*. Revista Brasileira de Geociências; v. 5, p. 99-105.
- Diagenesis* – (1988) Geoscience Reprint Series 4.
- Dorr II, J.V.N. *et al.* (1957) *Revisão da estratigrafia Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero*. - DNPM, Avulso n. 81; 31p.
- Dorr II, J.V.N. & Barbosa, A.L.M. (1963) *Geology and ore deposits of the Itabira District, Minas Gerais, Brazil*. US Geol. Surv., Prof. Pap. 341-C, 110 p.
- Dorr II, J.V.N. (1969) *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. - US Geol. Surv.; Prof. Pap. 641-A; 110p.
- Fischel, D.P. *et al.* (1998) *Geology and Sm-Nd isotopic data for the Mantiqueira and Juiz de Fora Complexes (Ribeira Belt) in the Abre Campo – Manhuaçu Region, Minas Gerais, Brazil*. Anais 14º International Conference on Basement Tectonics – Ouro Preto; p.21-23.
- Frazão, E.B. & Farjallat, J.E.S. (1995) *Seleção de pedras para revestimentos e prioridades requeridas*. Rev. Rochas de Qualidade; ed. 124; p. 80-93.

- Grandjean, G. *et al.* (1996) *GPR data processing for 3D fracture mapping in a marble quarry (Thassos, Greece)*. Journal of Applied Geophysics, 36; p.19-30.
- Harder, E.C & Chamberlin, R.T. (1915) *The geology of central Minas Gerais, Brazil*. J. Geol. 23, p. 341-424.
- Herz, N. (1970) *Gneissic and Igneous Rocks of the Quadrilátero Ferrífero*. US Geol. Prof. Pap. 641-B; 58p.
- Herz, N. (1978) *Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero*. US Geol. Prof. Pap. 641-C; 81p.
- López J., C. - editor (1996) *Manual de Rocas Ornamentales*. Ed. Entorno Grafico; 696p.
- Johnson, R. F. (1978) *Geology and Ore Deposits of the Cachoeira do Campo, Dom Bosco and Ouro Branco Quadrangles, Minas Gerais, Brazil*. US Geol. Prof. Pap. 641-C; 81p.
- Kalman, J. (1993) *Operação de um tear: Que tal melhorar gastando o mínimo?* Rev. Rochas de Qualidade; ed. 108; p. 103-104.
- Krauskopf, K. B. (1910) *Introdução à geoquímica I*. Ed. USP (1972); 2v; 294p.
- Ladeira, E.A. (1980) *Metallogenesis of gold at Morro Velho Mine and in the Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Tese de doutorado - inédita, Univ. Western Ontario-Canadá; 272 p.
- Ladeira, E.A. & Viveiros, J.F.M. (1984) *Hipótese sobre a Estruturação do Quadrilátero Ferrífero com Base nos dados disponíveis*. SBG, Núcleo Minas Gerais, Bol. n°4, B.Hte.
- Limaverde, J. A. (1987) *A indústria de calcários e dolomitos no Nordeste*. Escritório técnico de estudos econômicos do Nordeste; 304p.
- Lippmann, F. (1973) *Sedimentary Carbonate Minerals*. Ed. Springer; 228p.
- Marshak, S. & Alkmim, F.F. (1989) *Proterozoic extension/contraction tectonics of the southern São Francisco Craton and adjacent regions, Minas Gerais, Brazil : a kinematic model relating Quadrilátero Ferrífero, São Francisco Basin and Cordilheira do Espinhaço*. Tectonics; 8(3); p.551-571.
- Neves, F. A. (1997) *Notas de Curso: Técnicas e Aplicações de GPR (Ground Penetrating Radar)*. IG-UFRJ.
- Oliveira, S.F. (1998) *Caracterização petrográfica, estrutural e física de materiais com aplicação no setor de Rochas Ornamentais*. Dissertação de Mestrado; IGC-UFMG; 123p.
- Oliveira, E.S. & Cerceau, W.A. (inédito) *Mapeamento Geológico e Caracterização de Quartzitos Ornamentais das Regiões de Diamantina (SW de Guinda) e Serro (Alvorada de Minas e Itapanhoacanga)*. Trabalho Geológico de Graduação – UFMG.
- Quilete, E.B. (1998) *Dureza Knoop aplicada a rochas ornamentais*. Anais do 40º C.B.Geologia; p.314.

- Parzanese, G. A. C. (1991) *Gênese e desenvolvimento de voçorocas em solos originados de rochas granitóides na região de Cachoeira do Campo, MG*. Dissertação de mestrado - U. F. Viçosa; 117p.
- Patta Flain (1995) *Tecnologia de Produção de Revestimentos de Fachadas de Edifícios com Placas Pétreas*. Dissertação de Mestrado; Esc. Politécnica-USP; 180p.
- Pinto, A.D.P. (1984) *Estudo e reclassificação dos estromatólitos colunares da Série Minas*. REM, Ouro Preto, v. 37, n. 3, p. 42-43.
- Pires, F.R. et al. (1989) *Variação no estado de oxidação dos dolomitos no sinclinal Moeda-Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Anais do 5º Simp. Geol. Minas Gerais; SBG; bol.5; p.31-35.
- Pizarro, A.P. et al. (inédito) *Mapeamento Geológico da Mina do Cauê - Itabira - MG e seu Contexto Regional*. Trabalho Geológico de Graduação-UFMG; 99p; 1996.
- Pomerene, J.B. (1958) *The Cercadinho Formation*. in Dorr II, J.V.N. (ed.) Symposium on the stratigraphy of the Minas Series in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. S.B.G., Bol. 7/2, p.64-65.
- Projeto Radam Brasil (1983) *Levantamento de Recursos Naturais - Geologia, Geomorfologia, vegetação e uso potencial da terra. Folhas SF-23/24 Rio de Janeiro / Vitória*. Ministério das Minas e Energia; vol.32.
- Renger, F.E et al. (1994) *Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil*. Geonomos 2-1; p.1-11.
- Rodríguez, R.M. & Bayón, G.M. (1997) *Las pizarras ornamentales en España*. Rev. Cantera y Explotaciones; n.363; p. 22-29.
- Rosa, J.J.S.O. (1997) *El trabajo de la roca ornamental. Un análisis histórico*. Rev. Cantera y Explotaciones; n.363; p. 35-42.
- Shrank, A. & Souza Filho, C.R. (1998) *The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero region from the Archean to the Neoproterozoic: Revision, problems and prospects*. Anais 14º International Conference on Basement Tectonics – Ouro Preto; p.122-125.

Para a pesquisa bibliográfica foram também utilizadas as bases de dados *Calco* (Biblioteca do Instituto de Geociências da UFMG) e o *DBQF* - Banco de Dados do Quadrilátero Ferrífero, este último desenvolvido pelo autor com orientação do Prof. Friedrich E. Renger.

ANEXO I

FICHAS DE DESCRIÇÕES PETROGRÁFICAS

Significado das abreviações correspondentes às formas dos grãos:

EU – EUÉDRICA

SUB – SUBÉDRICA

AN – ANÉDRICA

Características macroscópicas das amostras analisadas:

FB-01: Dolomito bege com faixa filítica cinza. Presença de minerais opacos.

FB-02: Dolomito bege claro, com porções ligeiramente avermelhadas, cortada por filmes de sericita verde claro.

FB-03: Filito cinza escuro com finas bandas vermelho escuras.

FB-04: Dolomito vermelho escuro, intercalado com uma massa filítica/dolomítica cinza escuro a avermelhada.

FB-05: Dolomito vermelho com faixas onduladas bege claro de dolomita/calcita e uma matriz quartzo-sericítica-carbonática avermelhada.

Número da amostra/lâmina: FB-01

Nome da rocha:

DOLOMITO

Localização:

CUMBI DO MEIO

Composição Mineral (1)	DOLOMITA / CALCITA	Porcentagem em volume	73
(2)	SERICITA		15
(3)	QUARTZO		10
(4)	CLORITA		<1
(5)	OPACOS		<1
(6)			
(7)			
(8)			
(9)			

Forma (1)	SUB	Granulação	MÉDIA
(2)	SUB		FINA
(3)	SUB/AN		FINA
(4)	SUB		FINA
(5)	SUB/AN		MUITO FINA A MÉDIA (0,05mm)
(6)			
(7)			
(8)			
(9)			

Textura: LEPIDOGRANOBLÁSTICA, INEQUIGRANULAR

Descrição mineralógica: PRESENÇA DE DUAS FAIXAS DISTINTAS-UMA SERICÍTICA E OUTRA CARBONÁTICA. A DIVISÃO DESTAS FAIXAS É NÍTIDA E RETILÍNEA, COM OS CRISTAIS DE QTZO. E SERICITA ORIENTADOS PARALELAMENTE A ELAS. A SERICITA APRESENTA CRENULAÇÃO. HÁ FAIXAS MAIS QUARTZOSAS NO CONTATO COM A PARTE CARBONÁTICA E DENTRO DA PARTE SERICÍTICA. OS CRISTAIS DE QUARTZO APRESENTAM EXTINÇÃO ONDULANTE EM CADA SUBGRÃO, ALÉM DE INDICADORES CINEMÁTICOS (SIGMÓIDES). A ROCHA POSSUI MATRIZ FINA DE QUARTZO E SERICITA.

Número da amostra/lâmina: **FB-02** Nome da rocha: **DOLOMITO (BEGE CLARO)**

Localização: **LAPA**

Composição Mineral (1)	DOLOMITA/ CALCITA	Porcentagem em volume	70
(2)	QUARTZO		17
(3)	SERICITA		5
(4)	OPACOS		4
(5)	CLORITA		<1
(6)			
(7)			
(8)			
(9)			

Forma (1)	SUB	Granulação	MÉDIA
(2)	SUB/AN		FINA
(3)	SUB (ACICULAR)		FINA
(4)	SUB/AN		FINA
(5)	SUB		FINA
(6)			
(7)			
(8)			
(9)			

Textura: **GRANOBLÁSTICA, INEQUIGRANULAR**

Descrição mineralógica: **MATRIZ HOMOGÊNEA EM CONTATO COM MASSA DE DOLOMITA DE FORMA ARREDONDADA. A SERICITA E O QUARTZO ESTÃO CONCENTRADOS, PREENCHENDO OS VAZIOS DE UMA ZONA DE DOLOMITA. OS NÍVEIS SERICÍTICOS MARCAM A FOLIAÇÃO.**

Número da amostra/lâmina: **FB-03** Nome da rocha: **FILITO CARBONÁTICO**

Localização: **CUMBI DO MEIO**

Composição Mineral (1)	SERICITA	Porcentagem em volume	70
(2)	QUARTZO		20
(3)	OPACOS		5
(4)	DOLOMITA/CALCITA		5
(5)	PLÁGIOCLÁSIO		<1
(6)			
(7)			
(8)			
(9)			

Forma (1)	EU/ACICULAR	Granulação	FINA
(2)	SUB		FINA-MÉDIA
(3)	SUB		FINA
(4)	SUB		FINA
(5)	SUB		FINA
(6)			
(7)			
(8)			
(9)			

Textura: **LEPIDOBLÁSTICA, EQUIGRANULAR**

Descrição mineralógica: MASSA SERICÍTICA, QUARTZOSA, COM OPACOS E MINERAIS CARBONÁTICOS COM FAIXAS DE QUARTZO E MICA (UM POUCO MAIS GROSSA) RETILÍNEAS. A MAIOR FACE DOS CRISTAIS DE QUARTZO É PARALELA AO CONTATO, SENDO QUE AS MICAS TAMBÉM ESTÃO ORIENTADAS, DEFININDO A FOLIAÇÃO.
HÁ DUAS DIREÇÕES DE FOLIAÇÃO, FAZENDO ÂNGULO DE APROX. 90 GRAUS ENTRE ELAS NESTE CORTE ALEATÓRIO.

Número da amostra/lâmina: FB-04

Nome da rocha:

DOLOMITO

Localização:

LAPA

Composição Mineral (1)	DOLOMITA/CALCITA	Porcentagem em volume	62
(2)	SERICITA		20
(3)	QUARTZO		15
(4)	OPACOS		3
(5)	ACESSÓRIOS		<1
(6)			
(7)			
(8)			
(9)			

Forma (1)	AN	Granulação	MÉDIA
(2)	FILITO CARBONÁTICO		FINA
(3)	EU/SUB		FINA
(4)	SUB/AN		FINA
(5)	SUB		FINA
(6)			
(7)			
(8)			
(9)			

Textura: GRANOLEPIDOBLÁSTICA, INEQUIGRANULAR

Descrição mineralógica: PODE-SE DIVIDIR EM DUAS PORÇÕES-UMA CARBONÁTICA, COM GRÃOS BEM MACLADOS DE GRANULAÇÃO MAIS GROSSA E COM PEQUENOS GRÃOS DE QUARTZO EUÉDRICOS A SUBÉDRICOS ENTRE ELES. A OUTRA PORÇÃO É COMPOSTA POR UMA MATRIZ FINA DE QUARTZO, SERICITA, CARBONATOS E OPACOS QUE ESTÃO ORIENTADOS PARALELOS AO SIGMÓIDE DEFINIDO PELA DOLOMITA.

Número da amostra/lâmina: **FB-05**

Nome da rocha:

DOLOMITO (+ VERMELHO)Localização: **JACARANDA**

Composição Mineral (1)	DOLOMITA	Percentagem em volume	90
(2)	SERICITA		5
(3)	QUARTZO		5
(4)			
(5)			
(6)			
(7)			
(8)			
(9)			

Forma (1)	SUB	Granulação	GROSSEIRA
(2)	SUB		MÉDIA
(3)	SUB		FINA-MÉDIA
(4)			
(5)			
(6)			
(7)			
(8)			
(9)			

Textura: **GRANOBLÁSTICA, INEQUIGRANULAR**

Descrição mineralógica: HÁ DUAS FAIXAS DE GRÃOS GROSSEIROS (DOLOMITA/CALCITA), MACIADOS, ENVOLTOS POR QUARTZO, DOLOMITA E SERICITA DE GRANULAÇÃO MÉDIA. NA FAIXA GROSSA HÁ SUBGRÃOS DE QUARTZO SEM EXTINÇÃO ONDULANTE EM CONTATO FACE A FACE, FORMANDO ÂNGULOS DE APROX. 120 GRAUS.