

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
CAMPUS DE RIO CLARO**

***GEOLOGIA ESTRUTURAL APLICADA ÀS ROCHAS ORNAMENTAIS NA
PEDREIRA KNAWA, CLÁUDIO (MG)***

SAMUEL NUNES FERREIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro, para a obtenção do título de Mestre em Geologia Regional.

Orientador: **Prof. Dr. Luiz Sérgio Amarante Simões**
Co-orientador: **Prof. Dr. João Carlos Dourado**

Rio Claro
2004

AGRADECIMENTOS

Este trabalho tornou-se possível graças ao apoio de tantas pessoas, mas inicialmente quero agradecer ao orientador, Prof. Dr. Luiz Sérgio Amarante Simões, que desde a graduação transmitiu seus conhecimentos de forma clara e objetiva proporcionando sempre o aperfeiçoamento dos meus conhecimentos. Obrigado pela paciência e dedicação.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. João Carlos Dourado pela ajuda na coleta dos dados de GPR nas questões relacionadas ao tratamento dos dados.

Aos Profs. Drs. Antônio Carlos Artur, Hans Ebert, pelas discussões no texto da qualificação e nos direcionamentos da presente dissertação.

Agradeço a empresa de mineração Fontex Importadora e Exportadora LTDA por ter cedido a Pedreira Knawa como alvo deste trabalho e pelo apoio financeiro para a realização das etapas de campo. A todos os funcionários da pedreira e principalmente ao Geólogo Francisco Videira pelas discussões e apoio, e ao Eng. de Minas Ednaldo Reis.

Foram tantos dias de campo que não posso esquecer destas pessoas que tanto me ajudaram que tenho a maior estima e amizade: Geólogo Fábio Monteiro de Lima (Roxo) e Raquel Cristina Pelicer Coelho (Chú).

Aos amigos de Rio Claro, Luiz e Leila, Laís, Amarildo e Larissa, Harrizon e Auxiliadora, Ivaldo, Carlos e Ana, Pacco, Junior, Adilson, Hamilton, Telma, Edson (PC), Douglas, Magrão e Paula e tantos outros que não relacionei.

Aos meus amigos de Catalão, Rogério (Tex), Marcelo, Leo e Silvinho que sempre compreenderam minha ausência.

Aos meus amigos de Vazante, Douglas, Wender, Vanio, Tolentino Flávio, Ricardo Barbosa, Luiz Flávio, os Romeros, Adriana (Dri), Luciano, Rhuan, Eber, Cristian, Adriano, Kiko, Kelly, Ana e Lucia, agradeço pelo apoio e compreensão nas minhas ausências das festas e nas nossas reuniões.

Agradeço aos meus pais Benigno e Eloísa e a meus irmãos, Aline, Leonardo, ao meu cunhado Niltinho e às minhas lindas sobrinhas Ingrid, Isadora e Arielle, pela paciência na distância um perdão pela ausência e agradeço sempre a Deus por fazerem parte de minha vida.

E não poderia deixar de agradecer a esta pessoa que sempre me ajudou, e que tenho um carinho muito especial, Raquel.

Agradeço a Deus, e aquela pequena rocha que um dia me colocou nos cominhos da Geologia.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	01
1.1 – Apresentação do tema.....	01
1.2 – Objetivos.....	04
1.3 – Método de trabalho.....	04
1.3.1 – Levantamento Bibliográfico.....	05
1.3.2 – Interpretação de fotos aéreas.....	06
1.3.3 – Trabalhos de campo.....	06
1.3.3.1 – Mapeamento geológico e estrutural.....	06
1.3.3.2 – Coleta de amostras.....	08
1.3.3.3 – Aquisição dos dados e aplicação do método GPR.....	08
1.3.3.4 – Tratamento e análise dos dados.....	10
CAPÍTULO 2 – PANORAMA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS.....	14
2.1 – Aspectos Gerais.....	14
2.1.1 – Histórico sobre rochas ornamentais.....	15
2.1.2 - Mercado atual do setor de rochas ornamentais.....	17
2.1.3 – Panorama das rochas ornamentais de Minas Gerais.....	19
2.1.4 – Aplicação das rochas ornamentais.....	24
2.2 – Estudos aplicados às rochas ornamentais.....	27
2.2.1 – Fatores geológicos.....	27
2.2.2 – Caracterização tecnológica das rochas ornamentais.....	31
2.2.3 – Sistemas de lavras e técnicas de corte.....	31
2.2.3.1 – Lavra de matacões.....	32
2.2.3.2 – Lavra por bancadas.....	34
2.2.3.3 – Lavra por painéis verticais.....	34
2.2.3.4 – Lavra por desmoronamento.....	34
2.2.3.5 – Lavra seletiva.....	35
2.2.3.6 – Técnicas de corte.....	36
2.2.4 – Fatores não geológicos.....	37
2.3 – tendência para o setor de rochas ornamentais.....	37
CAPÍTULO 3 – GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO.....	40
3.1 – Localização.....	40
3.2 – Geologia Regional.....	42
3.3 – Geologia da mina “Knawa”.....	48

3.3.1 – Litologia.....	53
3.4 – Análise estrutural das áreas.....	68
3.4.1 – Análise estrutural das áreas adjacentes à pedreira Knawa.....	69
3.4.1.1 – Foliações.....	69
3.4.1.2 – Outras estruturas observadas na área.....	76
3.4.2 – Análise Estrutural da pedreira.....	79
3.4.2.1 – Foliações.....	79
3.4.2.2 – Dobras.....	86
3.4.2.3 – Veios pegmatíticos.....	88
3.4.2.4 – Fraturas.....	90
3.4.3 – Sugestões para a evolução geológica da pedreira e da direção de seu entorno.....	92
CAPÍTULO 4 – ESTUDOS DE OTIMIZAÇÃO DA LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS “KNAWA”.....	95
4.1 – Modelamento geológico.....	96
4.2 – Estudos para um melhor aproveitamento da rocha ornamental da pedreira Knawa.....	101
4.3 – Proposta de redução de custos da pedreira “Knawa”.....	108
4.4 – Teste do método GPR na investigação em superfície dos defeitos ornamentais da rocha na pedreira Knawa.....	113
4.4.1 – O método GPR.....	113
4.4.2 – Levantamento de campo.....	117
4.4.3 – Processamento dos dados.....	119
4.4.4 – Resultado e interpretações dos radargramas.....	121
4.4.5 – Considerações sobre o uso do GPR na pedreira Knawa.....	127
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	128
CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130

INDICE TABELA

Tabela 2.1 Variedade de rochas do estado, e a relação de pedreira por município.....	21
Tabela 2.2 Divisão apresentado por Luades (1992), dos principais fatores que definem a qualidade da rocha ornamental.....	28
Tabela 2.3 Resumo dos principais ensaios físico-mecânicos seguidos pelo – IPT (1993).....	32
Tabela 4.1 Proposta de redução de custo da pedreira Knawa, levando em consideração as regiões de defeitos ornamentais da rocha.....	108
Tabela 4.2 Dados de constante dielétrica (K) e condutividade elétrica dos materiais mais comuns para serem analisados pelo método GPR.....	112

INDICE FIGURAS

Figura 1.1	Representação esquemático da malha de mapeamento 2x2m de cada bancada.....	8
Figura 1.2	Representação esquemático do ponto de amarração adotados para frente de lavra.....	8
Figura 1.3	Arranjo das antenas utilizados no campo.....	10
Figura 1.4	Fluxograma do processamento dos dados de GPR.....	13
Figura 2.1	Avaliação da performance dos maiores exportadores de rochas ornamental.....	19
Figura 2.2	Distribuição das pedras de rochas ornamentais do estado de Minas Gerais.....	20
Figura 2.3	Os quatro grandes centros produtores de rochas ornamentais do estado de Minas Gerais.....	22
Figura 2.4	O uso das rochas ornamentais na antiguidade foi de grande importância para o desenvolvimento da arquitetura da época.....	26
Figura 2.5	Blocos de rocha individualizados por um padrão de faturamento em granitos.....	33
Figura 2.6	Representação esquemática da estação de blocos de rocha pelo método de bancada.....	35
Figura 3.1	Localização da área de estudo e principais vias de acesso.....	41
Figura 3.2	Mapa regional simplificada da porção meridional do Cráton São Francisco.....	43
Figura 3.3	Mapa esquemático e simplificado do Cráton do São Francisco.....	44

Figura 3.4	Coluna estratigráfica da região do Cráton do São Francisco.....	46
Figura 3.5	Mapa das principais estruturas em escala regional da área.....	48
Figura 3.6a	Ilustração das heterogeneidades petrográficas encontrados dentro do contexto do biotita Gnaiss migmatíticos na pedreira Knawa.....	50
Figura 3.6b	Ilustração das heterogeneidades petrográficas encontrados dentro do contexto do biotita Gnaiss migmatíticos na pedreira Knawa.....	51
Figura 3.7	Distribuição das variedades litológicas associadas ao biotita Gnaiss bandado migmatítico na pedreira Knawa.....	52
Figura 3.8	Diagrama QAP mostrando a composição de biotita Gnaiss.....	54
Figura 3.9	Perfil no extremo norte da pedreira evidenciando bandas metadiorítico dobrada.....	54
Figura 3.10	Porção sudoeste da pedreira destaca-se pelas grandes quantidades de veias quartzo + feldspato atribuindo a zonas migmatíticas.....	66
Figura 3.11	Fotografia aérea da região em que se encontra inserido a pedreira Knawa, com destaque para os alinhamentos tectônicos.....	70
Figura 3.12	Frentes de lavras de algumas pedreiras abandonadas próximo à pedreira Knawa apresentando grandes exposições de rocha com presença de estruturas.....	71
Figuras 3.13	Mapa estrutural simplificado da área adjacente à pedreira Knawa.....	72
Figura 3.14	Representação esquemática na forma estereograma mostrando a distribuição dos polos dos planos de Sn e Lm nas áreas adjacentes à pedreira Knawa.....	73

Figura 3.15	Estereograma de polo dos planos de foliação S_{n+1} das áreas adjacentes à pedreira Knawa.....	74
Figura 3.16	Detalhe da foliação S_n dobrado com foliação plano axial associada.....	75
Figura 3.17	Representação esquemática na forma de estereogramas mostrando a distribuição dos pólos de planos das foliações e das veias na área da pedreira Knawa.....	81
Figura 3.18	Perfil esquemático da região norte da pedreira como mostra a DTM, com destaque para as dobras $DN+1$	87
Figura 3.19	Estereogramas de pontos dos veios pegmatíticos e sua relação com a foliação S_{n+1}	88
Figura 3.20	Modelo digital de terreno da Pedreira Knawa com destaque para a orientação espacial das fraturas tectônicas.....	91
Figura 4.1	Maquete da pedreira em escala 1:200 com seu mapa geológico compondo o modelo geológico 3D da pedreira Knawa.....	97
Figura 4.2	Modelo topográfico digital da pedreira knawa.....	98
Figura 4.3	Modelo geológico digital da pedreira Knawa, revelando o comportamento dos corpos geológicos em subsuperfície.....	100
Figura 4.4	Principais defeitos ornamentais da rocha na pedreira Knawa.....	102
Figura 4.5	Mapa de contorno de aproveitamento comercial da rocha na pedreira Knawa.....	103
Figura 4.6	Mapa de contorno de aproveitamento comercial da rocha sobre o mapa geológico da pedreira Knawa.....	105

Figura 4.7	Mapa de contorno de aproveitamento da rocha para o nível cinco de pedreira Knawa, com destaque para as variações petrográficas e suas distribuição conforme recuperação comercial da rocha.....106
Figura 4.8	Modelo de aproveitamento da rocha, para o nível cinco da pedreira, onde a porção cinza representa a região da pedreira com recuperações inferiores a quinze por cento.....109
Figura 4.9	Representação esquemática da furação continua de painéis e blocos de rocha pelo método de bancada, com destaque para o espaçamento dos furos.....111
Figura 4.10	Esquema de sondagem WARR, com espaçamento entre as amostras de 10 em 10cm.....117
Figura 4.11	Localização dos perfis de reflexão (PK1, PK2, PK3) e da sondagem WARR (PWARR) na pedreira Knawa.....118
Figura 4.12	Arranjo das antenas utilizado no levantamento do perfis, com o espaçamento de cada estação amostrada de 20 em 20cm.....119
Figura 4.13	Radargrama da sondagem WARR apresentado tanto à velocidade da onda no ar quanto na rocha.....120
Figura 4.14	Radar PK1 com destaque para seus principais refletores.....122
Figura 4.15	Radargrama PK1 sobreposto na seção geológica apresentando as bandas dioríticas como sendo o principal refletor das ondas eletromagnéticos neste perfil.....123
Figura 4.16	Sobreposição do radargrama PK2 na seção geológica revelando forte concordância dos refletores hiperbólicos do radargrama com os enclaves de rochas máficas e ultrabásicas.....124
Figura 4.17	Perfil GPR PK3, localizado na posição centro sul da pedreira Knawa, realizado com antena de 100MHZ.....125

INDICE DE FOTOS

Foto 3.1	Detalhe microfotográfico da textura granoblásticas do biotita Gnaisse bandado migmatítico.....	57
Foto 3.2 a e b	Fotomicrografia da banda diorítica, mostrando sua textura granoblástica e mineralogia.....	57
Foto 3.3	Direção preferencial de alinhamento dos cristais hornblenda e biotita.....	58
Foto 3.4	Corte mostrando a bandas dioríticos no biotita gnaisse migmatítico.....	58
Foto 3.5	Enclaves de anfibolito, deformado e localmente rotacionados pela foliação principal.....	59
Foto 3.6 a e b	Fotomicrografia de rochas ultrabásicas exibindo grandes cristais de olivina localmente alterados para talco, e, subordinadamente, tremolita.....	59
Foto 3.7	Anfibolito 2 com mobilizados migmatíticos de quartzo + feldspato e manchas de sulfeto na rocha encaixante.....	62
Foto 38	Exposição de um dique de anfibolito 3 evidenciado em bandamento interno e seu comportamento rúptil, Nota-se ainda sua discordância com relação á foliação principal (SN+1).....	62
Foto 3.9	Textura granoblástico com granulação grosso e contatos retos a levemente tabulados entre os cristais.....	63
Foto 3.10	Exposição do leito granítico(LG) "neossama" em uma das frentes da pedreira, revelando contatos penetrantes com assimilação de "paleossamo".....	63
Foto 3.11	Veio pegmatítico ocupando fraturas de tipo t de alto ângulo, discordante da foliação principal (SN+1).....	65

Foto 3.12	Veio pegmatíticos sub-paralelos a foliação principal, Ora assumindo direções paralelas a foliação principal e ora discordante.....	65
Foto 3.13	Zonas mignatíticas ocorrendo na forma de veios ou difusa, deixando a rocha com aspecto nebulítico.....	66
Foto 3.14	Zonas de cisalhamento restritos com foliação SN+2 associada, succesionando a foliação SN+1.....	77
Foto 3.15	Dique de rocha máfica anisotrópica, que em análise microscópica trata-se de um diabásio.....	77
Foto 3.16	Foliação principal das rochas supracrustais com orientações preferenciais (160/60).....	78
Foto 3.17	Dobra encontrado nos quartzitos das rochas supracrustais com orientações dos seus eixos (60/10).....	78
Foto 3.20	Alinhamento de boudins de anfibolito com maior estiramento na direção N50E paralelos as direções da foliação SN+1 e SN.....	85
Foto 3.21	Foliação SN+2 formado por zonas de cisalhamento restritas, que eventualmente apresentam veios associados.....	85
Foto 3.22	Veio pegmatítico dobrados pela deformação progressiva DN+1... ..	89
Foto 3.23	Fratura de alivio no paredão norte da pedreira, evidenciando seu paralelismo com a topografia.....	89

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de mapeamento geológico-estrutural de detalhe numa área piloto (Pedreira Knawa, Cláudio Estado de Minas Gerais) em escala de 1:200 e dos estudos de reconhecimento geológico em suas áreas adjacentes, e da aplicação do método de GPR na identificação de estruturas geológicas na Pedreira Knawa. Onde seu objetivo principal é proporcionar um direcionamento dos trabalhos geológico-estruturais na pedreira, visando otimizar a extração da rocha. As rochas que compõem esta região abrangem tanto rochas do complexo gnáissico-migmatítico de médio a alto grau denominado de Complexo Campo Belo quanto de suas supracrustais o Supergrupo Rio das Velhas, que encontram-se inseridos dentro do contexto geotectônico do Cráton do São Francisco Meridional. A Pedreira Knawa está localizada nos domínios da zona de cisalhamento Cláudio, e o arcabouço litológico predominante corresponde a um biotita gnaiss bandado fortemente migmatizado e deformado, de coloração cinza claro a cinza esbranquiçado, com pequenas quantidades de mobilizados félsicos de coloração rósea e xenólitos de rochas básica e ultrabásicas. As estruturas exibidas por esta rocha são predominantemente gnássica a migmatítica e revelam em escala de detalhe uma grande heterogeneidade, permitindo individualizar outros litotipos dentro deste arcabouço. Podem ser identificados da seguinte forma: biotita gnaiss bandado (rocha predominante), xenólitos de anfibolito e ultramafitos, granito, bandas dioríticas, veios pegmatíticos, zonas migmatíticas, veios migmatíticos de zonas de cisalhamento e diques de anfibolitos. A análise das feições estruturais e geológicas, observadas principalmente na área da pedreira e em seu entorno, permitiu identificar uma seqüência de três eventos geológicos estruturais principais, impressos nos gnaisses (D_n , D_{n+1}

e Dn+2), além da deposição e estruturação das rochas supracrustais e a intrusão de diques de básicas na área. Os trabalhos de avaliação e otimização de lavra iniciaram-se com a identificação dos fatores geológicos que prejudicam o rendimento da jazida. Estes parâmetros foram extraídos da análise do mapa geológico e dos mapas de recuperação comercial da rocha, proporcionando a realização de mapas de aproveitamento e de modelos geológicos tridimensionais. O mapa de aproveitamento do nível cinco da pedreira foi separado em valores inferiores e superiores de 15% de recuperação da rocha, onde os defeitos ornamentais encontram-se dentro dos limites inferiores a estes 15%. A cubagem do nível cinco da pedreira permitiu identificar alguns volumes de grande importância para a otimização de sua lavra, tais como: volume total de rochas do nível cinco 33.731,28 m³, volume dos valores inferiores a 15% de recuperação 14.230,31 m³, e volume de defeitos ornamentais de 8.976.90 m³, representando 25,72% do volume total de rocha deste nível. A proposta de otimização do custo de lavra apresentado neste trabalho, está na redução em 24% do número de furação continua nas regiões de defeitos ornamentais, proporcionando uma redução de 79200 reais no custo total de extração deste nível da pedreira. Os levantamentos de GPR na Pedreira Knawa permitiram concluir que as melhores respostas foram obtidas nas zonas ricas em enclaves anfíbolíticos, pois as propriedades elétricas e magnéticas destas rochas são bem diferentes de sua encaixante.

ABSTRACT

The results of a detailed geologic-structural mapping in the scale 1:200 are presented for a pilot area (Knawa quarry in the village of Cláudio, state of Minas Gerais). Geologic reconnaissance studies in adjacent areas and GPR surveys were performed to identify geologic structures. The main objective of those works was to guide geologic-structural mapping in the quarry to optimize production of dimension stones. The rocks in the region span from the highly metamorphic Campo Belo composed of gneissic-migmatites to supracrustal Rio das Velhas supergroup in the geotectonic context of the southern São Francisco Craton. Knawa quarry is located in the domains of the Cláudio shear zone, where predominant lithology corresponds to a banded strongly migmatized and deformed biotite gneiss showing light grey to whitish color, small felsic masses, pink in color and xenoliths of basic and ultrabasic rocks. These rocks predominantly exhibit gneissic to migmatitic structures but are very heterogeneous, allowing to individualise other lithotypes within the framework, as such: banded biotite gneiss (predominant), xenoliths of amphibolite and ultramafic rocks, granite, dioritic bands, pegmatitic veins, migmatitic zones, migmatitic veins in shear zones and amphibolitic dykes. From the analysis of the structural and geologic features a sequence of structural events was identified, consisting of three main geologic events in the gneisses (D_n , D_{n+1} & D_{n+2}) plus the deposition deformation of the supracrustal and the intrusion of basic dykes. Evaluation and optimization of mining started from the identification of the geologic factors that affect production. These parameters were drawn from the assessment of the geologic map and of the commercial recovery deriving maps of optimized and three-dimensional geologic models. The volume calculation of the fifth level of the quarry identified a total volume of 33731,28 m³, the volume of sectors with a recovery below 15% equal to 14230,31

m³; and a volume of ornamental defects amounting to 8976,90 m³, i.e. 25,72% of the total volume of this level. The proposed cost optimization provides a 24% reduction in the number of drillholes in the regions of ornamental defects, allowing for the reduction of an amount of R\$ 79.200 mining costs in this level of the quarry. GPR surveys showed best responses in anfibolite rich zone where electromagnetic properties are contrasting with the host rock. Hence the application of GPR for the identification of these zone is satisfactory to assist in the mine planning.

I N T R O D U Ç Ã O

1.1 – APRESENTAÇÃO DO TEMA

A produção mundial atual de rochas ornamentais e de revestimento encontra-se em forte expansão, atingindo aproximadamente 67.5 milhões t/ano. Avalia-se que os negócios do setor movimentam uma quantia aproximada de US\$ 41 bilhões/ano (Chiodi Filho, 2003).

Em virtude da grande expansão do setor, as empresas estão sendo obrigadas a elevar seus atuais níveis produtivos e ao mesmo tempo melhorar a qualidade dos produtos, fornecendo um produto com bom padrão estético e qualificação tecnológica dentro de uma faixa de variabilidade aceitável. Somente com a adoção de métodos técnicos e científicos o setor poderá atingir níveis mais avançados, semelhantes aos outros setores da indústria mineral.

Neste contexto, e cientes da carência de profissionais e de estudos voltados para o contexto das rochas ornamentais que um grupo de pesquisadores do Departamento de Petrologia e Metalogenia da UNESP – campus de Rio Claro, se empenhou na implantação e desenvolvimento de uma linha de pesquisa voltada para o setor de “rochas ornamentais”, buscando um aprimoramento técnico – científico do setor e conseqüentemente formar profissionais ainda mais qualificados para atuar na área.

Atualmente a maioria dos trabalhos desenvolvidos pelos membros da equipe desta linha de pesquisa visa a caracterização petrográfica e

tecnológica das rochas ornamentais, objetivando a definição da qualificação dos materiais pétreos e o estabelecimento de diretrizes para a melhor utilização destes materiais em obras civis.

O presente trabalho foi idealizado a partir da constatação de que havia uma carência de trabalhos detalhados envolvendo investigações geológicas sistemáticas com relação à exploração de rochas ornamentais. Sendo assim, busca-se abordar os parâmetros geológicos ligados à caracterização estrutural e litológica dos maciços rochosos para fins ornamentais, com intuito de identificar os possíveis controles que interferem na qualidade da rocha e na otimização da exploração.

Nota-se hoje, que a grande maioria das empresas obteve suas jazidas de rocha ornamental, praticamente, sem nenhum caráter investigativo de cunho técnico-científico e, conseqüentemente, iniciam a extração do bem mineral sem o mínimo conhecimento do depósito, vindo a gerar até mesmo sua dilapidação.

Ressalta-se, entretanto, que a localização geológica das áreas é apenas o início da pesquisa de viabilidade econômica de uma jazida, sendo necessário examinar as condições morfológicas e a logística de cada uma delas e principalmente os parâmetros geológicos que irão condicionar a viabilidade do depósito, onde uma dos mais importantes é o estudo estrutural dos maciços rochosos.

Segundo Selonen *et al.* (2000), o processo de pesquisa para exploração de rochas ornamentais visando à viabilidade do jazimento, deve ser um procedimento geológico sistemático seguindo passos que vão desde estudos de escritório, levantamentos de campo gerais e de detalhe, até investigações de subsuperfície utilizando tanto sondagem destrutiva quanto geofísica.

Taboada *et al.* (1999) afirmam que um maciço granítico para ser considerado de qualidade para o propósito ornamental, deve levar em consideração os seguintes fatores: geológico, geotécnico e estético.

Alencar et al. (1996) destacam a necessidade de estudos de caracterização da jazida de rocha ornamental, através de levantamentos geológicos de detalhe e sondagens, obtendo informações que permitam prever, dentre outras coisas, as dimensões dos blocos exploráveis e as variações da qualidade do material.

Nota-se que o enfoque dos autores a respeito de pesquisa, extração e qualidade de rochas ornamentais são sempre muito semelhantes e quase todos relacionam a importância de uma caracterização geológica bem feita, levando em consideração parâmetros ligados às características do maciço, como as variações litológicas, suas estruturas e condições geomecânicas. O presente estudo foi realizado em uma pedreira da região centro-oeste de Minas Gerais, que representa, atualmente, a maior produção de granito ornamental e é detentora da maior diversidade de rochas ornamentais do estado. Nota-se também, que esta região destaca-se pelos altos índices de abandono de frentes de lavras. Este fato pode estar diretamente relacionado à falta de estudos geológicos adequados para avaliar as jazidas.

A área escolhida para o desenvolvimento do trabalho obedece alguns critérios primordiais, dentre os quais pode-se destacar a facilidade de realizar mapeamento de detalhe; possuir cortes e/ou seções de profundidades razoáveis para a aplicação do GPR; estar em constante processo produtivo, permitindo assim a familiarização com os padrões estéticos adotados para a escolha de material e a diferenciação entre minério e estéril para que se possa tentar estabelecer critérios de recuperação; infra-estrutura para a realização do trabalho.

Levando em consideração estes preceitos básicos, e também o constante interesse da empresa FONTEX Importadora e Exportadora Ltda em realizar trabalhos de parceria com as universidades e de estar sempre à frente na tentativa de buscar cada vez mais o conhecimento técnico-científico para aprimorar os seus produtos, foi selecionada uma

de suas pedreiras para o estudo: a pedreira Knawa, localizada na cidade de Cláudio (MG).

1.2 – OBJETIVOS

A presente dissertação tem como objetivo principal buscar métodos e técnicas que proporcionem um melhor direcionamento dos trabalhos geológico-estruturais, visando a sua aplicabilidade no setor de rochas ornamentais.

De forma específica, os objetivos são:

1. estudar o padrão estrutural da pedreira Knawa, elaborando mapas geológicos e estruturais de detalhe;
2. identificar parâmetros estritamente geológicos que caracterizem a qualidade da rocha para fins ornamentais;
3. definir diretrizes para a extração desta área, buscando maximizar a rentabilidade da jazida com base na previsão da recuperação de rocha com qualidade ornamental;
4. avaliar os principais problemas geológicos que interferem na exploração da rocha;
5. avaliar o método e testar a eficiência da técnica de GPR na identificação de fraturas, veios pegmatíticos e xenólitos/restitos, em subsuperfície;

1.3 – MÉTODO DE TRABALHO

Para o desenvolvimento do trabalho foi selecionada a pedreira Knawa por sua complexidade geológico-estrutural e pelo baixo aproveitamento de lavra. O projeto envolve quatro atividades principais: levantamento bibliográfico, interpretação de fotos aéreas, trabalhos de campo, tratamento dos dados, cujo detalhamento é apresentado a seguir.

1.3.1 – LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

O levantamento bibliográfico consistiu na etapa inicial do trabalho e teve como objetivo principal resgatar trabalhos que enfocam os assuntos propostos. Para a realização deste levantamento foram pesquisados banco de dados via Internet (probe, google e o georef) e revistas especializadas no Brasil e no exterior. Após um exame bibliográfico minucioso da literatura atual pode-se notar uma carência de trabalhos sobre alguns dos temas ora propostos, tais como: trabalhos de caracterização de maciço rochosos para fins ornamentais; trabalhos de geologia estrutural aplicados as rochas ornamentais; e aplicação de métodos investigativos diretos ou indiretos na caracterização da qualidade dos maciços rochosos para fins ornamentais. No entanto alguns autores têm se dedicado a estes temas, cabendo destaque para os trabalhos de: Selonon *et al.* (2000), Luodes *et al.* (2000), Taboada *et al.* (1997), Taboada *et al.* (1999), Vega (1999).

Destaca-se nesta revisão um aspecto fundamental: a falta e/ou a dificuldade de se encontrar trabalhos geológicos estruturais de detalhe com o enfoque em rochas ornamentais. O que pode ser visto na literatura são trabalhos de cunho mais regional, sem o nível de detalhamento necessário para a caracterização de um jazimento; e os trabalhos que foram encontrados que possuíam mais detalhes não apresentavam um enfoque em rochas ornamentais.

No contexto da geologia da região estudada, também carente em estudos de detalhe, os trabalhos concentram-se em três autores principais: Teixeira (1985), Teixeira *et al.* (1997 b e c; 1997) Carneiro *et al.* (1996 a,b; 1997 a, b, c) e Oliveira (1999).

1.3.2 – INTERPRETAÇÃO DE FOTOS AÉREAS

A interpretação de fotografias aéreas teve por intuito traçar os principais alinhamentos tectônicos e também auxiliar no reconhecimento de campo no entorno da pedreira para o entendimento do quadro tectônico da área.

As fotos aéreas utilizadas neste trabalho são de escala 1:25000, obtidas pelo IBC-Gerca em sobrevôo de 1979, e fornecidas pela empresa FONTEX para realização deste trabalho.

1.3.3 – TRABALHOS DE CAMPO

Os trabalhos de campo tiveram seu início através da realização de visitas técnicas com duração de dois dias em pedreiras de rochas ornamentais das regiões de Cláudio e Itapeçerica (MG), visando selecionar a área de estudo e firmar acordo de cooperação com a empresa FONTEX.

Corresponderam, em sua grande maioria, a mapeamentos geológicos e estruturais de detalhe, com coleta de amostras visando estudos petrográficos da rocha para melhor distinção de suas fácies. Foram levantados também alguns perfis com GPR na pedreira para testar este método na identificação de estruturas da rocha em subsuperfície.

1.3.3.1 – MAPEAMENTO GEOLÓGICO E ESTRUTURAL

O mapeamento realizado na pedreira Knawa teve como preceitos básicos cartografar os diferentes corpos rochosos, levantar o padrão estrutural da pedreira (bandamento, foliações, fraturas, veios e xenolitos e/ou restitos de rocha básica). Para a realização deste mapeamento foi utilizada uma base topográfica de escala 1:200 (base cedida pela empresa) devidamente georeferenciada, apresentando todas as frentes de lavras e bancadas existentes na jazida.

O trabalho de mapeamento de detalhe desta área teve a duração de aproximadamente 42 dias, distribuídos em quatro etapas de campo durante os períodos de dezembro de 2001 a fevereiro de 2004.

O mapeamento desta pedreira visou apresentar as estruturas da rocha da forma mais realista possível e para isto estabeleceu uma malha quadrada 2X2m para o piso de cada bancada, como esquematizado na **figura 1.1**.

Esta malha ficou impressa na pedreira com tinta *spray* como uma forma de facilitar a localização das estruturas e heterogeneidades litológicas.

Para cada parede e/ou frente de lavra criou-se uma malha de pontos de amarração de 4m (**figura 1.2**), que foi fotografada, servindo estas fotografias de base para o mapeamento. Cada estrutura (bandamento, junta, falha, fratura, zona de cisalhamento, planos axiais de dobras) foi medida e lançada no mapa com base na sua orientação e distância medida em relação à malha de referência. Para os corpos rochosos, além da orientação, media-se a espessura e comprimento, para obtenção de um mapa que refletisse, com grande precisão, a realidade do maciço.

Além dos mapeamentos de detalhe no maciço da pedreira, fez-se também reconhecimento estrutural do seu entorno, buscando entender melhor o padrão estrutural da área e a situação da pedreira neste contexto.

Como produtos deste reconhecimento obtiveram-se mapas estruturais gerados a partir de interpretações de fotos aéreas e dados de campo com a finalidade de se ilustrar o padrão estrutural da região em que se encontra a pedreira e permitir uma correlação com as descrições da literatura.



1.3.3.2 – COLETA DE AMOSTRAS

A coleta de amostras foi feita durante a última etapa de campo visando os estudos petrográficos das principais fácies cartografadas na pedreira, sendo coletadas 8 amostras representativas dos diferentes litotipos.

1.3.3.3 – AQUISIÇÃO DOS DADOS E APLICAÇÃO DO METODO GPR

A utilização de métodos indiretos não destrutivos na investigação das jazidas de rochas ornamentais se faz necessária devido ao fato de que a pesquisa direta (sondagem) pode inviabilizar partes do jazimento.

A aplicação do método GPR "Ground Penetrating Radar" consiste em obter uma imagem de alta resolução de subsuperfície, através da transmissão de um curto pulso de altas frequências para gerar ondas eletromagnéticas, que são transmitidas de uma antena transmissora para dentro do maciço. As ondas eletromagnéticas que são transmitidas para interior da terra podem ser refletidas quando ocorrem grandes mudanças nas propriedades elétricas dos materiais. Estas reflexões são captadas pela antena receptora, que as transmite os dados obtidos para um *notebook* (Porsani, 1999).

Os levantamentos GPR obtidos na pedreira foram conduzidos utilizando-se o sistema RAMAC – GPR, construído pela empresa Sueca MALA Geoscience.

Para a aquisição dos perfis de reflexão deve-se levar em consideração alguns parâmetros, tais como: a frequência da antena, a amostragem espacial, a abertura da janela temporal, o espaçamento entre as antenas, a localização e orientação do perfil e a orientação das antenas (Porsani, 1999).

Os trabalhos com GPR na pedreira iniciaram com o teste de penetração da onda eletromagnética no maciço utilizando a técnica WARR "*Wide Angle Reflection and Refraction*" para conhecer a velocidade da onda no meio. Nesta técnica, uma antena é mantida fixa, enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira por intervalos constantes de 10cm, sendo que as antenas utilizadas neste teste foram as de 50MHz e 200MHz. Posteriormente foram levantados alguns perfis na pedreira que seguiram parâmetros básicos apresentados por Porsani (*op cit*), tais como: intervalo de amostragem espacial de 10 e 20cm,

orientação da antena conforme a **figura 1.3**, e frequências de 200MHz e 100MHz.

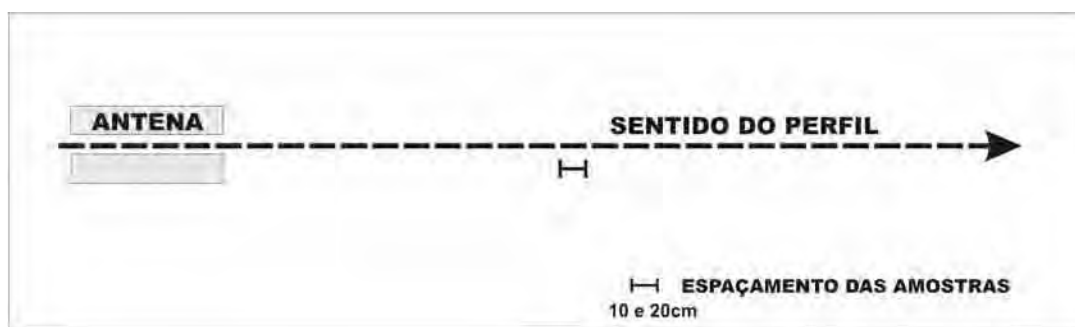


Figura 1.3

Arranjo das antenas utilizadas no campo, com o espaçamento de cada estação amostrada.

O dados de GPR gerados neste trabalho são perfis de reflexão, denominados de radargramas, que foram obtidos movendo as antenas transmissoras e receptoras por intervalos de espaçamento constante. Os perfis gerados neste trabalho foram rebatidos nos perfis geológicos de detalhe, visando obter parâmetros indicativos da eficácia do método neste tipo de litologia.

As principais vantagens deste método são: rapidez dos resultados e a eficácia para a identificação de estruturas rasas da subsuperfície. Sua grande limitação é a baixa penetração das ondas eletromagnéticas, que impossibilita a investigação em maiores profundidades.

1.3.4 – TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

a) Elaboração dos mapas em meio Digital

Os mapas topográficos, geológicos, de aproveitamento da rocha e os perfis geológicos foram digitalizados, em mesa digitalizadora, com a utilização do Auto Cad 2000 como software de reconhecimento das

informações geradas, incluindo curvas de nível, frentes de lavra e todas as informações geológicas cartografadas na pedreira (bandamento, foliações, zonas de cisalhamento, xenólitos de rochas básicas e etc..).

As frentes de lavra foram fotografadas, para uma melhor visualização das feições geológicas, e posteriormente escaneadas e digitalizadas também em Auto Cad 2000.

Em busca de uma melhor compreensão da relação minério/estéril na pedreira Knawa foram elaborados mapas de contornos de porcentagens de recuperação comercial da rocha para níveis já lavrados (dados de recuperação foram cedidos pela empresa) para o estabelecimento das relações do comportamento minério/estéril e os dados geológicos. Estes mapas foram elaborados a partir dos dados de recuperação comercial da rocha extraída de níveis superiores aos lavrados no momento e sobre mapas topográficos de cada nível extraído.

Para gerar estes mapas foi necessário estabelecer o centro da bancada como sendo a coordenada (X,Y), à qual atribuiu-se um valor de recuperação comercial da rocha com base nos registros de aproveitamento de cada bancada. O termo bancada apresentado neste trabalho corresponde a uma denominação da empresa para representar uma porção do maciço com dimensões (9x9m), e isto corresponderia a uma célula da malha de referência que cobre todo maciço.

Estes dados foram, então, analisados para verificar se existe inter-relação entre os mapas de aproveitamento comercial de rocha e o mapa geológico da pedreira.

b)- Análise das seções delgadas

Foram analisadas 8 lâminas petrográficas do maciço, para caracterizar os litotipos estudados, visando estabelecer melhor as diferentes mineralogias/texturas que apresentam. As análises foram feitas em microscópios petrográficos de luz transmitida, e as observações enfatizaram a textura, a mineralogia e microestrutura presente na rocha.

Para a classificação da rocha seguiu-se as recomendações da IUGS através dos trabalhos de Streckeisen (1976) e Le Bas & Streckeisen (1991).

c)- Modelamento 3D (Físico e Digital) da pedreira

Para uma melhor visualização e compreensão do comportamento geológico e estrutural da pedreira Knawa desenvolveu-se uma maquete na escala 1:200 que contem todos os dados geológicos. Esta maquete deverá ajudar a empresa em sua programação de lavra uma vez que a facilidade de visualização da geologia, e das principais zonas de defeitos ornamentais que a rocha apresenta (xenólitos de rochas básicas, veios pegmatíticos, fraturas, restitos de camadas biotíticas) é muito grande.

Além do modelamento geológico físico (maquete), viu-se a necessidade de aplicar softwares típicos de modelamento geológicos de jazidas de minerais metálicos na tentativa de realizar um modelamento digital para o cálculo de volumes de rocha aproveitável para a extração. Sendo assim, foi criado um modelo digital da pedreira utilizando o software Datamine.

Verificar se existe inter-relação entre os mapas de aproveitamento comercial de rocha e o mapa geológico da pedreira.

d) – Tratamento de dados de GPR

O processamento dos dados de GPR envolve algumas etapas que foram bem descritas por Porsani (1999) e Gandolfo (1999) em seus trabalhos e podem ser resumidas da seguinte forma: a) edição dos dados; b) processamento do sinal e c) apresentação da imagem processada. A **figura 1.4** apresenta um fluxograma de todo o processo de tratamento dos dados.

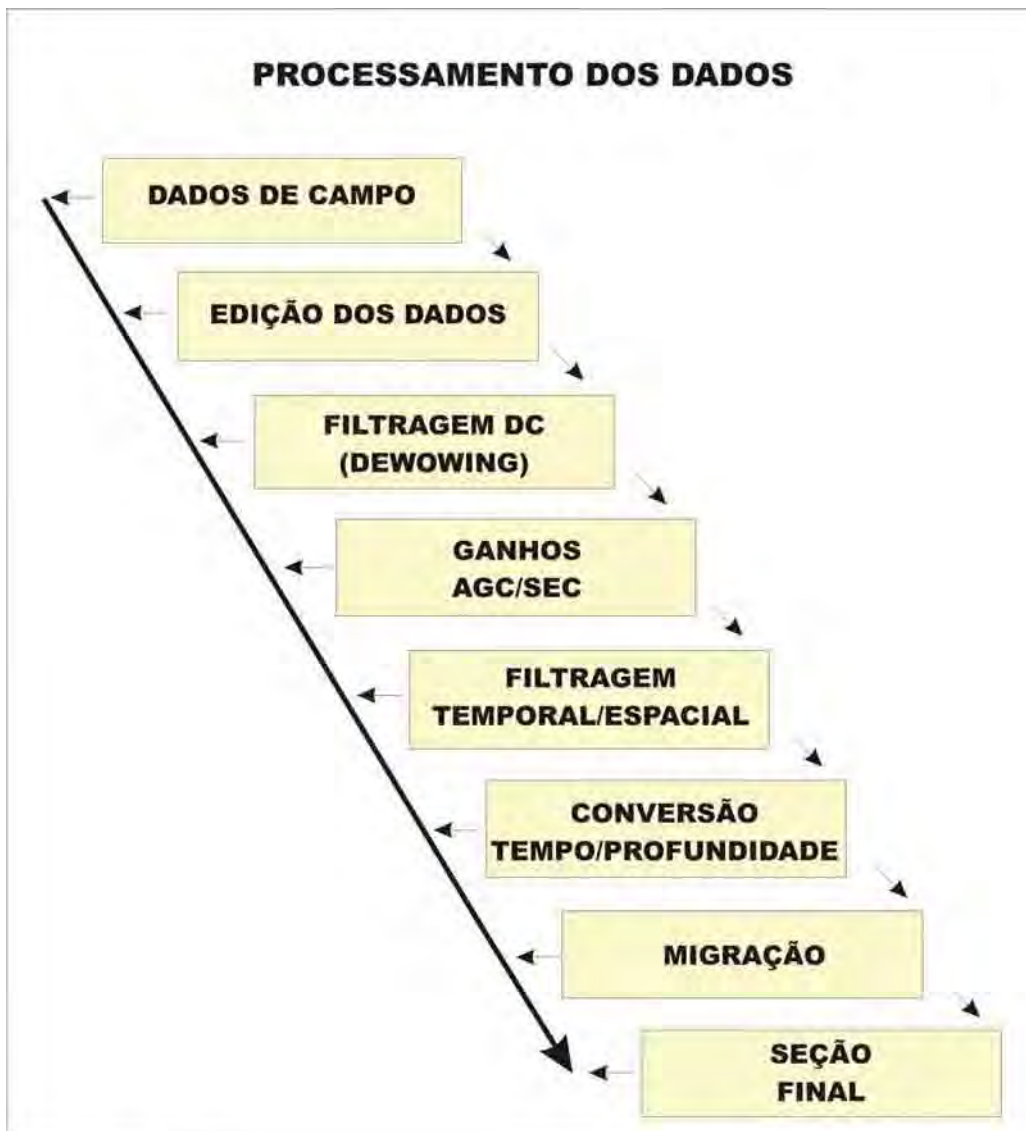


Figura 1.4

Fluxograma do Processamento dos dados de GPR, compilado de Porsani (1999).

e) – Tratamento de dados estruturais

Os dados estruturais coletados foram tratados estatisticamente através do *software* Stereonet, e os resultados plotados em estereogramas equiárea.

PANORAMA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS

2.1 – ASPECTOS GERAIS

A definição “rochas ornamentais” já passou por várias designações, mas a que mais se adequou à atual pode ser observada em Brandão et al. (1995):

“O termo rocha ornamental deve ser empregado para designar aquelas rochas passíveis de polimento e utilização na construção civil como revestimento de piso, paredes e na confecção de pias e outros objetos assemelhados”

O mesmo autor considera que alguns fatores devem ser levados em consideração no aproveitamento das rochas ornamentais, são eles: estéticos, técnicos e mercadológicos.

O padrão estético da rocha está intimamente relacionado à cor e seus aspectos texturais, sendo assim uma rocha de qualidade possui altos padrões estéticos e normalmente não são toleradas grandes variações deste padrão (Selonen, 2000).

Os parâmetros que determinam o método de lavra e a viabilidade econômica da jazida até aqueles fatores físico-mecânicos empregados no estudo e caracterização das rochas ornamentais foram considerados por Brandão et al. (1995) como sendo fatores técnicos.

Os aspectos mercadológicos são considerados por Brandão et al. (1995) como sendo os mais importantes para a viabilidade de uma pedreira. Ainda que a rocha se enquadre em todos os quesitos anteriores,

não havendo interesse do mercado consumidor, todo projeto é considerado economicamente inviável.

As rochas ornamentais são divididas comercialmente em dois grupos: Mármore e Granito. Comercialmente o mármore é toda rocha carbonatada, passível de ser serrada e polida, incluindo-se rochas calcárias metamórficas ou sedimentares; e o granito rocha não calcária, capaz de ser serrada e polida. Ambos os tipos podem ser utilizadas como material de revestimento e adorno (Cedraz Nery, 2001).

Esta definição é criticada por autores como Vega (1999), como sendo um erro, porque muitas rochas denominadas de granito no mercado de rochas ornamentais fogem da definição litológica primordial, incluindo uma grande variedade de rochas ígneas e metamórficas, desde granitos propriamente ditos à rochas básicas (basaltos tonalitos), ultrabásicas (peridotitos dunitos) e até mesmo rochas metamórficas (quartzitos e brechas) e sedimentares (arenitos).

Para Shadmon (1988) *apud* Vega (1999), o termo *Dimension Stone* destina-se às rochas usadas como material para construção, e subdividem-nas em nove variedades mais comuns: mármore, calcário, dolomito, granito, arenito, basalto, quartzitos, ardósias e os tufos vulcânicos.

2.1.1 – HISTÓRICO SOBRE ROCHAS ORNAMENTAIS

O mais antigo registro do uso da pedra pelo homem remonta a tempos pré-históricos (Paleolíticos), há cerca de 2,5 milhões de anos quando era empregada para a confecção de artefatos usados para cavar, caçar ou arrancar plantas. A maior parte destas ferramentas eram trabalhadas em materiais difíceis, tais como quartzo, quartzito, seixos rolados e silex (Howell, 1969).

A estagnação do desenvolvimento humano perdurou até 8000 a.C, quando o aprimoramento das práticas agrícolas proporcionou o

estabelecimento de comunidades humanas maiores e suficientemente permanentes para desenvolver uma arquitetura de tijolos e pedra.

Neste mesmo período surgiram os primeiros registros da utilização da pedra como objeto de ornamento nas aldeias neolíticas do Oriente Próximo, destacando-se belas pedras verdes, tais como a malaquita (Atlas Estadão). Mas, para Alencar et al. (1996), a utilização das rochas como elemento estético e ornamental ocorreu por volta de 3000 a.C, na região da Mesopotâmia e Egito, onde os faraós utilizavam-nas para esculpir grandes personalidades da época.

As rochas utilizadas nestas esculturas eram calcários de granulação fina, e, eventualmente, rochas mais duras como granitos e quartzitos.

As mais antigas cavas de mármore conhecidas encontram-se na Grécia, e provavelmente correspondem ao período entre Neolítico inferior (4500 a. C.) e Médio, na região de Creta e Cíclades (Vega 1999).

A utilização das rochas ornamentais na antiguidade foi bastante restrita, todavia a humanidade as utilizava nas produções artísticas e arquitetônicas durante o período clássico da cultura grega e nos impérios romanos, onde seu uso era considerado símbolo de status. A grande prova disto está registrada nos livros de história romana, onde o grande imperador romano César Augusto gabava-se de ter encontrado Roma - uma cidade de tijolos - e de tê-la deixado de mármore (Grant, 1991).

Ferrari (2001), salienta que o uso da pedra além de ter marcado a história da arquitetura e das construções em geral, pode ainda contribuir para o desenvolvimento econômico e social dos povos.

Segundo Alencar et al. (1996), a extração de rochas ornamentais neste período era controlada pelos faraós no Egito, imperadores em Roma e pelas cidades-estados na Grécia. Cada um destes proprietários possuía seu próprio técnico especializado na extração e no beneficiamento da rocha e estes serviços eram realizados pelos escravos, com uso de técnicas e ferramentas rudimentares.

Com o desenrolar da história por volta do período medieval surgiu a regulamentação do uso do solo, que proporcionou a descentralização do direito de lavra, que até então era restrito aos imperadores e faraós. Deste modo novos materiais passaram a ser lavrados e o emprego de rochas ornamentais se difundiu por catedrais e palácios das mais importantes cidades da época. Desde então, a diversidade de rochas de coloração variada passou a ser grande e seu emprego controlado basicamente pelo estilo artístico e arquitetônico vigentes em cada período da história.

A utilização da rocha ornamental na construção civil em geral perdeu força a partir dos meados do século XX, quando surgiram novos materiais para substituí-la, principalmente como elemento estrutural e especialmente nas utilizações externas, dando início a era do concreto aparente e do vidro para revestimento e, principalmente asfalto para as pavimentações das praças, ruas e calçadas (Ferrari, 2001). E mais recentemente a cerâmica de alta qualidade a preços mais acessíveis à população.

Atualmente alguns autores consideram a década de 90 como sendo a nova era da pedra, principalmente pelo seu emprego como material de revestimento. Sendo o revestimento externo, sem dúvida, a mais significativa inovação da utilização das rochas ornamentais dos últimos anos.

2.1.2 – MERCADO ATUAL DO SETOR DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Atualmente a produção mundial atingiu a marca de 67,5 milhões t/ano, dos quais 57,8% são rochas calcárias (mármore, travertinos) e serpentinitos, sendo que as rochas silicáticas (granitos, quartizitos, basaltos) perfazem cerca de 37,0% e as ardósias 5,2% (Montani, 2003). Estima-se que os negócios do setor já atingiram a marca dos US\$ 41 bilhões/ano.

Segundo Chiodi Filho (2001), o consumo de rochas ornamentais por ano é estimado em 650 milhões de m²/ano ficando bem abaixo do seu maior concorrente no mercado da construção civil que são os produtos cerâmicos com uma produção de 4 bilhões de m²/ano.

Atualmente segundo a Montani (2003), os maiores produtores em volume físico seria respectivamente, a China com cerca de 14,0 milhões t/ano, a Itália com 8,0 milhões t/ano, Índia 6,5 milhões e o Irã 4,25 milhões de t/ano.

O gráfico **(figura 2.1)** apresentado por Chiodi Filho (2001) representa a atual situação das exportações em volume físico no cenário internacional de rochas ornamentais. Nota-se uma peculiaridade, a China assumindo o papel de maior exportadora mundial em volume físico superando até mesmo a Itália. E o crescimento asiático no setor é devido ao forte fluxo comercial com o Japão e aos grandes investimentos em máquinas e equipamentos nos últimos anos.

De acordo com o Sumário Mineral (DNPM, 1999), as exportações brasileiras de rochas ornamentais movimentaram em 1998 cerca de 906,8 mil toneladas, proporcionando uma cifra de US\$ 202,2 milhões.

Para Chiodi Filho (2003), atualmente o Brasil ocupa o 4º lugar na exploração de rocha em volume físico com 6 milhões t/ano, com um faturamento global de cerca de US\$ 2,1 bilhões em 2003.



Figura 2.1

Avaliação da performance dos maiores exportadores de rocha ornamental, levando em consideração o volume físico. Fonte (Montani *apud* Chiod Filho, 2001)

No Brasil, os estados que se destacam na produção nacional de rochas ornamentais são: Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia respondendo por 80% da produção, sendo que o Espírito Santo é responsável por 47% do total, seguido pelo estado de Minas Gerais que possui a maior diversidade de rochas (Cedraz Nery, 2001).

2.1.3 – PANORAMA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS DO ESTADO DE MINAS GERAIS

O estado de Minas Gerais encontra-se situado em uma posição privilegiada regionalmente o que permite um excelente escoamento de sua produção, tanto para o mercado interno quanto para o mercado externo (**Figura 2.2**), além de possuir uma geologia com grandes variedades de rochas comercialmente interessantes.

A grande variação de rochas com qualidade ornamental, como granitos, ardósias, quartzitos, mármore, serpentinitos, sienitos, diabásios

e esteatitos, é devido à ampla diversidade de ambientes geotectônicos que compõem a geologia do estado.

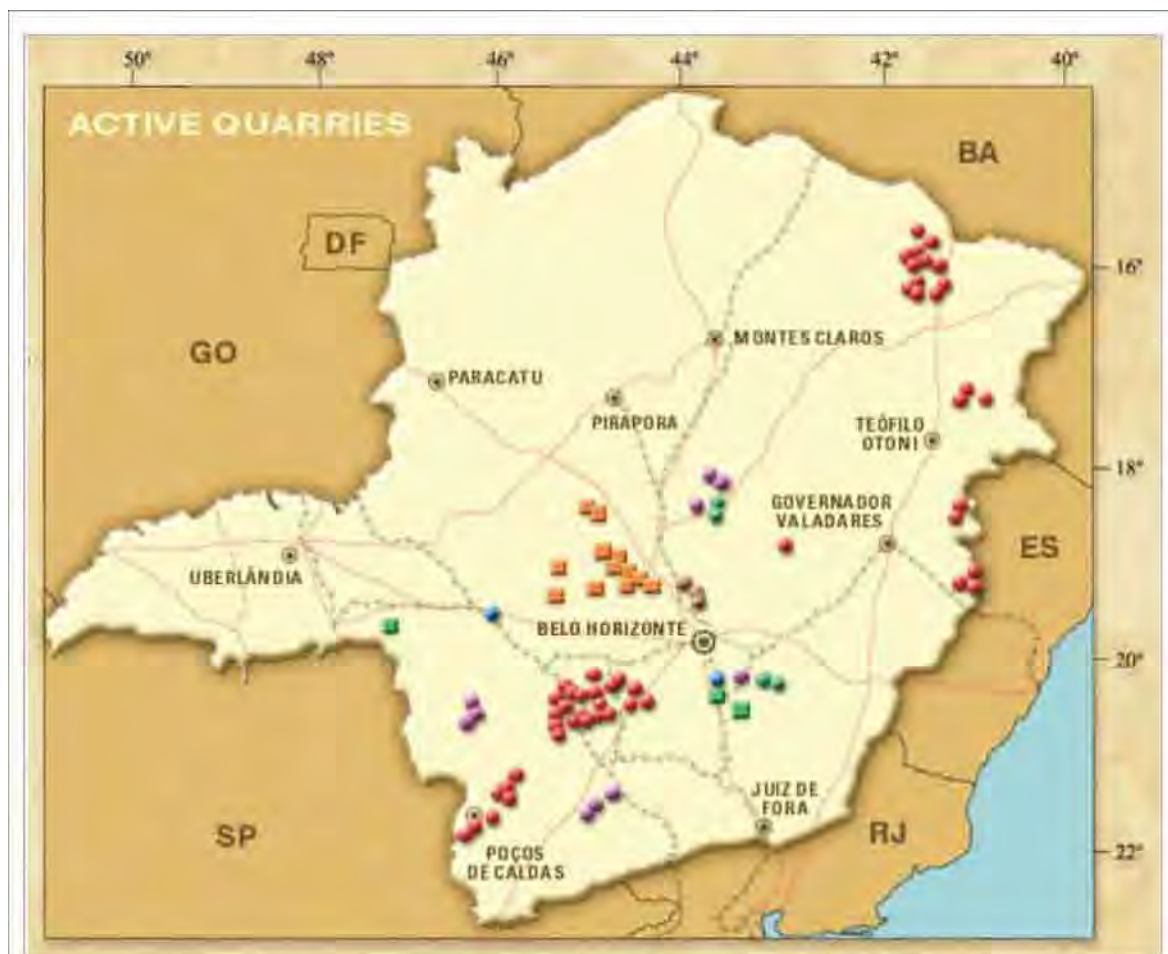


Figura 2.2

Distribuição das pedreiras de rochas ornamentais do estado de Minas Gerais, as principais estradas e ferrovias utilizadas para o escoamento da produção, e sua localização privilegiada perante aos mercados consumidores (Mapa da COMIG, 2001).

LEGENDA

Granito	Lagoa Santa Stone
Mármore	Ardósia
Quartzito	Serpentinito
Pedra de Mariana	

Esta grande diversidade de rocha pode ser observada no trabalho da COMIG (2001), que relaciona as rochas pelas regiões produtoras e com o número de pedreiras (**tabela 2.1**).

Tabela 2.1

Variedade de rochas do estado, e a relação de pedreiras por município.

PANORAMA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS DO ESTADO DE MINAS GERAIS		
ROCHAS	NÚMERO DE PEDREIRAS	NÚMERO DE PEDREIRAS POR MUNICÍPIO
GRANITO	82	Candeias (11), Cachoeira de Pajeú (11), Itapeçerica (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 Guanhães (1), Itueta (1), Passa-Tempo (1), Pavão (1), Santa Cruz de Salinas (1), Santa Rita de Caldas (1).
ARDOSIA	28	Papagaios (11), Felixlândia (5), Paraopeba (4), Curvelo (3), Pompéu (2), Caetanópolis (1), Leandro Ferreira (1), Martinho Campos (1).
QUARTZITO	54	São Tomé da Letras (15), Luminárias (10), Mariana (8), Alpinópolis (7), Capitólio (3), São João Batista do 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).
SERPENTINITO	3	Conselheiro Lafaiete (1), Sacramento (1), Piranga (1).

No total o estado produz cerca de 1.28 Mt/ano, onde 608 400 t são granitos, 410000 t ardósias, 22000 t quartzitos, 21600 t mármore, e o restante está dividido entre os esteatitos, serpentinitos e diabásios. Sendo que o estado responde por 35% das importações de granitos em blocos do Brasil (COMIG, 2001).

A rocha que se destaca na produção mineira é o granito e as principais regiões produtoras podem ser divididas em quatro grandes centros produtores da seguinte forma: Candeias, Medina, Caldas e Rio Doce –Mucuri (**figura 2.3**).



Figura 2.3

Os quatro grandes centros produtores de rochas ornamentais do estado de Minas Gerais segundo a interpretação da COMIG (2001). A distribuição espacial destes centros é a seguinte: a norte distrito de Medina (azul), a leste Rio doce/Mucuri (amarelo), na porção central Candeias (verde) e ao sul Poços de Caldas (vermelho). Figura modificada da COMIG (2001).

A região que compreende o centro produtor de Candeias tem aproximadamente 5000 km². As rochas extraídas estão situadas na porção sudeste do cráton do São Francisco, onde geologicamente são conhecidas por complexo Campo Belo (Teixeira, 1985), e as rochas que o constituem são gnaisses de composição granítica e tonalítica, ambos migmatizados. Esta região destaca-se na produção mineira com 340000t/ano de granitos ornamentais, o que representa cerca de 60% da produção de granitos do estado (COMIG, 2001). As rochas ornamentais de destaque nesta região são os granitos movimentados, correspondem a granitos deformados e/ou migmatitos que apresentam o aspecto movimentado.

O centro produtor Medina encontra-se localizado a nordeste do estado e compreende uma área de aproximadamente 6750 km² (COMIG, 2001), e está inserido no contexto do cinturão orogênico do Araçuaí (faixa Araçuaí). As rochas exploradas neste ambiente são granitóides ricos em minerais aluminosos como granada e silimanita, típico de granitos gerados em ambiente colisional. A região destaca-se por produzir granitos amarelos tipo granitos homogêneos, que são rochas com textura isotrópica.

A região produtora conhecida por Caldas localiza-se na região sul do estado, ocupa uma área de 5000 km², e geologicamente compreende os complexos Varginha e Poços de Caldas, que encontram-se inseridos na cunha de Guaxupé. As rochas extraídas desta região são em sua grande maioria granitos movimentados e sienitos. Sua produção de rochas ornamentais representa para o estado somente 8% (COMIG, 2001).

O setor produtor Rio Doce – Mucurí situa-se a leste do estado e compreende uma área de aproximadamente 18000 km² que possui uma geologia típica de terrenos de alto grau, denominado de complexo Juiz de Fora, onde os litotipos predominantes são granulitos e granitos (COMIG, 2001). Exporta aproximadamente 7,5% dos granitos produzidos no estado.

O quadro de fotos abaixo representa bem a diversidade de rochas existentes no estado de Minas Gerais, e as diferenças litológicas de cada setor (**Prancha 1**).

2.1.4 – APLICAÇÃO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS

As aplicações das rochas como ornamento e como elemento estrutural na construção civil nasceu com o homem e tem sido caracterizada em cada momento da evolução humana.

Antigamente as rochas eram usadas mais na arquitetura e na construção de grandes palácios e monumentos (**figura 2.4**) – sendo importante lembrar do “arco”, elemento estrutural de pedra, para entender a importância no desenvolvimento da civilização romana (Ferrari, 2001).

Segundo Ferrari (2001), a utilização das rochas como elemento estritamente estrutural e até mesmo estético, nos anos 50, em parte foram abandonadas devido à grande utilização do concreto (elemento estrutural), vidro para revestimento e principalmente o uso do asfalto para as pavimentações de ruas e praças.

Mas, atualmente, com desenvolvimento tecnológico o homem conseguiu desdobrar grandes blocos de rocha até chapas de aproximadamente 20mm, levando o surgimento de um novo conceito para sua utilização, o de rochas ornamentais - empregado para designar aquelas rochas passíveis de serem serradas, polidas e utilizadas na construção civil como revestimento de pisos, paredes e confecções de pias e outros objetos assemelhados.

Para autores como Ferrari (2001), o uso das rochas ornamentais para revestimentos externos foi, sem dúvida, a melhor inovação no mundo da construção civil dos últimos anos, por se tratar de revestimentos seguros, duráveis, estéticos e econômicos.

PRANCHA 1

Este quadro de fotos representa a grande diversidade de rochas ornamentais do estado de Minas Gerais.



Sienite "Café Imperial" - Distrito de Caldas



Migmatito avermelhado "granitos movimentados" - Distrito de Candeias



Migmatito cinza "granitos movimentados" - Distrito de Candeias



Granito amarelo "granitos homogêneos" - Distrito de Medina



Serpentinito



Granito amarelo "granitos homogêneos" - Rio Doce/Mucuri

Hoje com a popularização das rochas ornamentais sua utilização está cada vez mais abrangente, chegando também em espaços urbanos, como praças, calçadas, ruas de pedestres. As rochas mais utilizadas são granitos e mármore, que em geral possuem alta resistência, durabilidade, baixo custo e manutenção, valor estético, bem como facilidade de aplicação.



Figura 2.4

O uso das rochas ornamentais na antiguidade foi de grande importância para o desenvolvimento da arquitetura da época, influenciando as culturas grega (esquerda - Parthenon) e romana (direita - Arcos Romados na vila de Adriana em Tívole).

O grande avanço do setor de rochas ornamentais, aliado a grande demanda de mercado, promoveu uma grande corrida em busca de materiais novos, o que levou a um aumento da diversidade de tipos de rochas no mercado, e, conseqüentemente, queda na qualidade da rocha. É freqüente presenciar rochas ornamentais com problemas de uso. Foi visando resolver estes tipos de problemas que a ABNT está revendo e criando algumas normas técnicas de identificação e especificação dos produtos, elaboração de projetos de revestimentos, e de execução e fiscalização de obras de revestimentos (Alencar et al. 1996).

2.2 – ESTUDOS APLICADOS ÀS ROCHAS ORNAMENTAIS

Brandão *et. al* (1995) resumem bem os principais aspectos que são levados em consideração no aproveitamento de rochas ornamentais, e os agrupam da seguinte forma: estéticos, técnicos, econômicos e mercadológicos. Os fatores estéticos são aqueles que estão diretamente relacionados aos aspectos da rocha como: textura, estrutura, composição mineralógica (cor da rocha) e gênese.

Segundo o mesmo autor os fatores técnicos são aqueles parâmetros que determinam o método de lavra e a viabilidade econômica da jazida, bem como os parâmetros físico-mecânicos considerados nas rochas ornamentais, tais como: resistência ao desgaste, resistência ao impacto, resistência à compressão uniaxial, resistência à flexão, módulo de deformação estático, dilatação térmica, alterabilidade.

As características estéticas e técnicas muitas vezes não são suficientes para viabilizar uma pedreira de rocha ornamental, sendo necessária uma boa estratégia empresarial para colocação da rocha no mercado externo e interno (Brandão *et al*, 1995).

Luodes (1992) define que a qualidade de um depósito de rocha ornamental está relacionada a dois fatores principais: 1. fatores baseados na geologia; e 2. fatores não geológicos. A **tabela 2.2** resume os parâmetros considerados pelo autor.

2.2.1 – FATORES GEOLÓGICOS

As investigações geológicas sistemáticas com relação à exploração de rochas ornamentais foram baseadas em métodos científicos escassos, e pouco para a exploração foi desenvolvido. Ao contrário da prospecção de minerais metálicos que se tornou tão sofisticada com aplicação de técnicas

de geoquímica e geofísica, indispensáveis nos tempos modernos (Selonen et al. 2000).

Tabela 2.2

Divisão apresentada por Luodes (1992), dos principais fatores que definem a qualidade da rocha ornamental.

Fatores baseados na Geologia		Fatores Não Geológicos		
Fatores Geológicos		Fatores Técnicos	Fatores Econômicos	Infraestrutura
Macroscópico	Microscópico			
Aparência da rocha (cor, estrutura, inclusões, bandas)	Composição mineral	Densidade de porosidades e capacidade de absorção de água	Market, Fashion e valor cultural	Aspectos Legizacionais
Estruturas do Depósito (fratura, falhas, juntas e veios)	Contato entre grãos	Módulos de ruptura (Compressibilidade)	Mercado Consumidor	Estoque de blocos ou de rocha cortada
Área, forma e profundidade do depósito	Forma e distribuição	Resistência a abrasão e Força de flexura		Logística
Geomorfologia da área (topografia)	Deformação (microestruturas)			Vias de acesso

No entanto, os depósitos de rochas ornamentais e todos os seus padrões industriais são governados por fatores estritamente geológicos que, uma vez identificados, pode-se localizar novas áreas de modo mais sistemático.

Selonen *et al* (2000) definem um depósito de rochas ornamentais como sendo de qualidade do mesmo modo que Luodes (1992) e apresentam uma série de parâmetros geológicos que devem ser considerados para definirem a qualidade do maciço rochoso para ornamental, são eles:

1. Cor e estrutura da rocha, aspecto de grande importância no que diz respeito aos padrões comerciais (*market*);
2. Espaçamento e característica das fraturas, fator que define o tamanho dos blocos a serem extraídos;

3. Sendo a jazida um maciço rochoso, deve-se levar em consideração a topografia do maciço, visando a avaliação da jazida e a otimização da lavra;
4. Fatores petrográficos, como a composição dos minerais, sua forma, distribuição e contato entre os grãos e micro-deformações.

Há na literatura outros autores que defendem esta mesma teoria, de que existem poucos estudos sobre jazidas de rochas ornamentais quando comparados com os estudos de jazidas de minerais metálicos (Diehl 1996 *apud* Vega, 1999).

Este mesmo autor, de acordo com estudos realizados em depósitos de rochas ornamentais da Alemanha, com o enfoque em granitos, estabeleceu que o aspecto econômico mais importante na avaliação geológica de uma jazida de rochas ornamentais (*in situ*), é o volume de recuperação dos blocos com qualidade econômica. Sendo assim, considerou alguns parâmetros que implicam diretamente na recuperação dos blocos em uma jazida de rocha granítica.

1. Distribuição dos padrões de fraturamento (espaçamento, frequência);
2. Grau de homogeneidade da rocha (estrutura e textura);
3. A rocha deve manter constante a forma e tamanho dos grãos;
4. Possuir um padrão constante de cor;

Para Diehl (1996 *apud* Vega, 1999), a atribuição destes parâmetros à avaliação geológica de uma jazida de rochas ornamentais permitiria determinar a recuperação dos blocos com qualidade ornamental.

Segundo Brandão et al. (1995), a pesquisa de rochas ornamentais é relativamente simples, se comparada a outros bens minerais. Assim os principais parâmetros a serem considerados são: infra-estrutura; topografia da área; volume aflorante (presença de blocos e matacões); caracterização das propriedades físicas e decorativas das rochas.

Este mesmo autor revela que pode-se obter um resultado bem satisfatório do cálculo de reserva utilizando métodos convencionais de cubagem, sendo dispensável os conceitos geoestatísticos de Pattenon.

Em contrapartida Luodes et al. (2000) e Taboada *et al.* (1997), afirmam a importância da aplicação de técnicas de prospecção sofisticadas envolvendo o conhecimento geológico, métodos geofísicos (GPR e resistividade) e sondagens, com o intuito de reconhecer o padrão da rocha em sub-superfície.

Taboada *et al.* (1997), revela que atualmente é cada vez mais utilizado na cubagem de jazidas de rochas ornamentais a geoestatística, e apresenta um bom exemplo de sua aplicabilidade na extração de ardósia na Espanha, onde à utiliza nos aprimoramentos das técnicas de extração. Seu trabalho pode ser dividido em três fases:

Fase 1: consiste em montar um banco de dados com parâmetros geotécnicos;

Fase 2: aplicou-se técnicas de geoestatística multivariada para avaliar a função qualidade (esta função e expressa como um índice de recuperação da massa de ardósia);

Fase 3: aplicou-se a geoestatística para avaliar a qualidade da massa e planejar os trabalhos de extração.

A mesma metodologia pode ser aplicada às jazidas de granitos, onde o cálculo do índice da qualidade para este tipo de rocha leva em consideração além dos fatores geotécnicos os padrões estéticos. Para o autor, sua metodologia pode ser aplicada na avaliação da qualidade das pedreiras de rochas ornamentais, de um modo geral.

Há autores que trabalham com avaliação potencial de caráter regional do tipo de rochas ornamentais esperada para uma determinada área e defendem a importância de uma classificação das rochas granitóides, baseadas na tipologia de zircão. Com intuito de reconhecer as seis séries granitóides (crustais, cálcio-alcalinos, subalcalinos potássicos, alcalinos, plagiogranitos oceânicos e continentais e os charnockitos), onde

estes seis grupos são caracterizados por numerosas feições estruturais, composicionais, mineralógicas e petrográficas de grande importância para a definição da aplicação ótima de cada grupo nos diversos empregos de granitos ornamentais (Artur *et al.* 1998).

As pesquisas mais recentes que versam sobre a caracterização dos maciços de rochas ornamentais, estão ligadas às técnicas de planejamento de lavra com aplicação de técnicas de modelagem de detalhe de jazidas de rochas ornamentais utilizando *software* de mineração, como o Datamine. A grande dificuldade no planejamento de lavra para a finalidade ornamental está associada ao conhecimento da morfologia dos maciços rochosos (Mastrela *et al.* 2001).

2.2.2 – CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS

O termo “caracterização tecnológica das rochas ornamentais” representa diferentes ensaios que as rochas são submetidas em função de sua utilização e inclui aspectos mineralógicos, físicos, químicos e mecânicos.

Esta caracterização segue alguns procedimentos ou normas técnicas de entidades nacionais e estrangeiras tais como: ABNT “Associação Brasileira de Normas Técnicas”, ASTM “American Society for Testing and Materials”. Estes procedimentos são ensaios recomendados em função do tipo de uso dos materiais (Vega 1999). Os principais ensaios indicados podem ser observados nas **tabelas 2.3** (IPT - 1993).

2.2.3 – SISTEMAS DE LAVRAS E TÉCNICAS DE CORTE

Alencar *et al.* (1996), revela que a escolha do método de lavra está associada à morfologia do depósito, ao volume da reserva, à análise estrutural da jazida e às características intrínsecas do material a ser explorado.

Tabela 2.3

Resumo dos principais ensaios físico-mecânicos sugeridos pelo IPT (1993).

Fase/uso	Análise petrográfica	Índices Físicos	Resistência ao Desgaste	Resistência ao impacto	Resistência compressão Uniaxial	Resistência a Flexão	Módulo de Deformação bistático	Dilatação Térmica	Alterabilidade
Extração	X	X	X						
Beneficiamento	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Revestimento Externo	X	X	X			X		X	X
Revestimento Interno	X	X	X			X		X	
Pisos	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Colunas e Pilares	X	X			X	X	X	X	X
Pedestrais	X	X			X		X		X
Tampas de mesa e balcões	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Pias	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Soleiras	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Esculturas	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cilindros (granitos) para papel	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Mesas e aparelhos de desempenho	X	X	X	X	X	X	X	X	X

As rochas ornamentais são geralmente lavradas a céu aberto, e normalmente suas jazidas são exploradas sob duas formas: matacões e maciços rochosos.

Os principais métodos de lavra aplicados na exploração destes depósitos de rochas ornamentais são: Lavra de Matacões, lavra por bancadas, lavra por painéis verticais, lavra por desmoronamento, lavra seletiva.

2.2.3.1 – LAVRA DE MATAÇÕES

Trata-se de um método bem arcaico e ainda largamente utilizado nos países tropicais, onde existem matacões de grandes dimensões devido aos fenômenos de alteração dos maciços rochosos. Segundo Chiodi Filho e Akira Kono (1995 *apud* Vega 1999), constituem porções específicas do próprio maciço que foram individualizados a partir de fraturas e de agentes intempéricos (**figura 2.5**).

Geralmente, os trabalhos de exploração nos matacões são bem simples e seguem as seguintes etapas: sua individualização; seu desaterro; e seu desdobramento em blocos propriamente ditos. A individualização dos blocos normalmente é obtida através de furação e detonação utilizando-se pólvora negra (Alencar et al. 1996).



Figura 2.5

Blocos de rocha individualizados por um padrão de fraturamento em granitos nas proximidades da cidade de Madri, Espanha. Região conhecida por "La Pedriza". Foto extraída do *site* (www.geocities.com/geoapunttes/fotosgeo)

2.2.3.2 – LAVRA POR BANCADAS

São desenvolvidas em maciços rochosos e seus componentes funcionais da exploração podem ser subdivididos em praças, degraus, pistas, rampas, frentes, bancadas e níveis. As bancadas são lavradas obedecendo uma determinada seqüência lógica, oferecendo espaços operacionais para a realização dos trabalhos de extração (**figura 2.6**).

Este método permite uma melhor otimização das operações possibilitando trabalhar em mais de uma frente de lavra, de modo a compensar eventuais deficiências qualitativas, ou para adaptar, de maneira rápida, as oscilações dos níveis de produção desejados (Alencar, 1996).

2.2.3.3 – LAVRA POR PAINÉIS VERTICAIS

A lavra pelo método de painéis verticais é muito semelhante ao método de bancada e a principal diferença é que a jazida é dividida em painéis verticais que um dos seus lados coincide com uma das dimensões do bloco comercial.

Segundo Alencar *et al.* (1996), a maior vantagem do método esta na facilidade de separar grandes heterogeneidades na rocha.

2.2.3.4 – LAVRA POR DESMORONAMENTO

Para Vega (1999), o método consiste no desabamento amplo ou seletivo dos maciços, para posteriormente ser selecionados e cortados em fragmentos menores para obtenção de blocos.

Este método aplica-se para maciços delimitados por falhamentos ou planos de estratificação subverticais, dispostos em afloramentos com altos gradientes verticais.

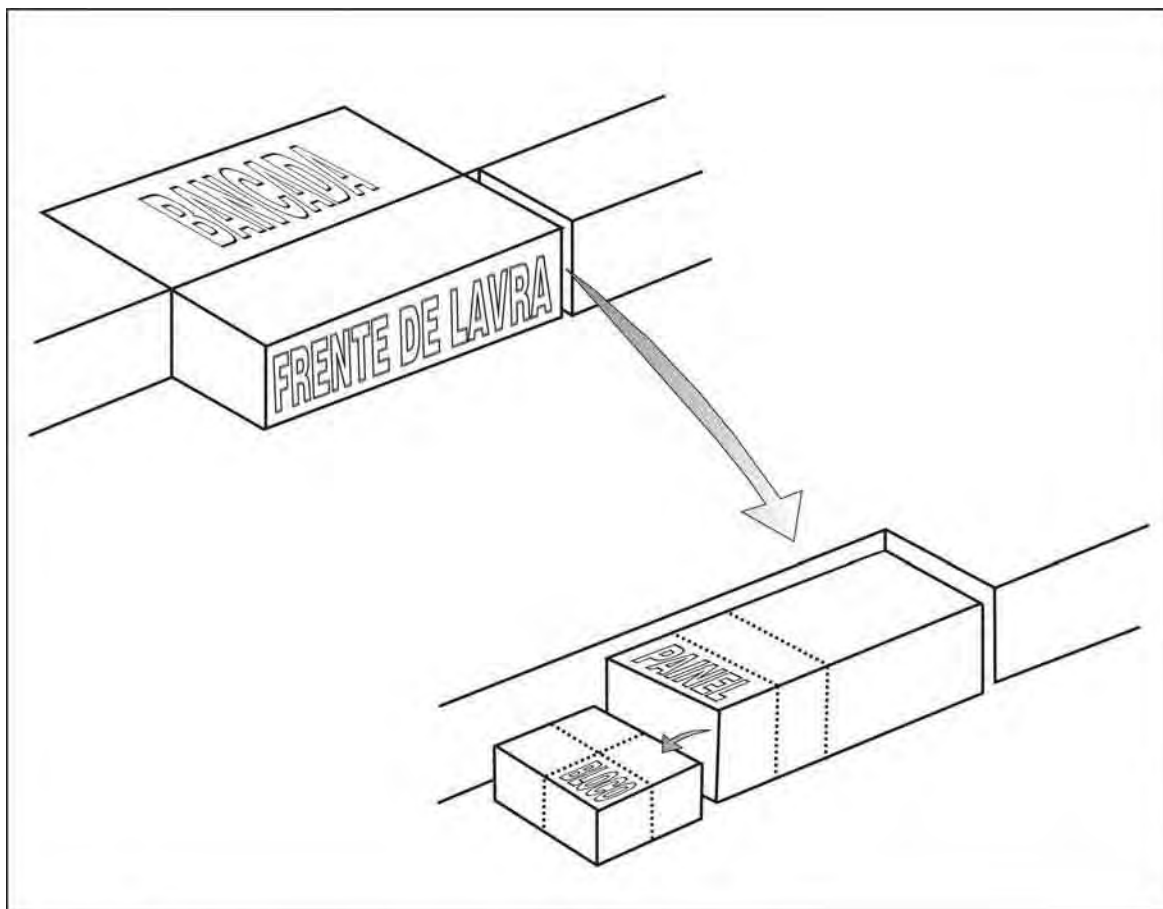


Figura 2.6

Representação esquemática da extração de bloco de rocha pelo método de bancadas, e os principais componentes da lavra por bancadas.

2.2.3.5 – LAVRA SELETIVA

As lavras seletivas são praticadas em maciços rochosos com fraturamentos ortogonais, onde proporcionaram a formação de blocos naturais. Sendo assim, seu aproveitamento é realizado de forma direta com a separação dos blocos naturais, que conseqüentemente serão cortados até dimensões adequadas.

A recuperação deste tipo de lavra é muito baixa, e seu planejamento de lavra deve levar em consideração suas variáveis estruturais, para

dimensionar as frentes de lavra, as praças, rampas de acesso e bota fora (Alencar et al. 1996).

2.2.3.6 – TÉCNICAS DE CORTE

As técnicas de corte para desmonte de rocha dependem da morfologia da jazida, de suas características mineralógicas, petrográficas e estruturais da rocha de sua infra-estrutura local, dos aspectos comerciais do material.

Para Vega (1999), as técnicas de corte podem se resumir basicamente em, corte em costura e corte contínuo. O mesmo autor apresenta um resumo das principais técnicas de corte utilizadas no desmonte de rochas ornamentais;

1. corte em costura
2. furos espaçados(explosivos)
3. furos adjacentes
4. corte contínuo
5. fio helicoidal
6. fio diamantado
7. jato d'água
8. jato de chama
9. correias diamantadas

O desenvolvimento tecnológico proporcionou grandes aperfeiçoamentos nas técnicas de corte, abaixando os custos e melhorando ainda mais sua precisão e conservando íntegras as características qualitativas das rochas.

O fio diamantado surgiu no aperfeiçoamento das lavras de rochas calcárias, mas atualmente sua principal aplicação está sendo nas rochas silicáticas, onde ainda é dominada pelos métodos e técnicas tradicionais.

Atualmente, a maioria das empresas mineradoras de granitos ornamentais do Brasil ainda trabalham aplicando as técnicas tradicionais, mas muitas destas empresas já utilizam o fio diamantado no corte de suas bancadas, mas o desmembramento delas em painéis ainda é feito utilizando perfuração contínua com explosivo.

2.2.3 – FATORES NÃO GEOLÓGICOS

Embora muitos autores tratem deste assunto, o que melhor aborda o tema são Selonen *et al* (2000), que o subdivide em fatores econômicos e infra-estruturais.

Considerando os fatores econômicos, os autores ressaltam que além das características geológicas e técnicas, responsáveis pela a qualidade da rocha, o seu valor de mercado está intimamente ligado aos valores estéticos, culturais e religiosos de cada país. Como regra geral, cores fortes e incomuns parecem ser desejáveis.

Os aspectos ligados a infra-estrutura relacionam-se principalmente a posição da lavra no contexto econômico, a distância dos centros consumidores e as facilidades de transporte. Mas considera outros fatores como sendo relevantes:

1. Aspectos ambientais da área
2. Estoque de blocos
3. Logística, se existe técnicas suficientes para garantir quantidade e qualidade ao produto final.

2.3 – TENDÊNCIAS PARA O SETOR DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Embora nos últimos cinco anos as exportações brasileiras tenham registrado um acréscimo anual de 15%, a vulnerabilidade das exportações é muito grande pois seu enfoque principal é o mercado norte-americano. Assim, o setor necessita de assumir uma maior competitividade frente à

Índia e China no mercado internacional (Chiodi Filho, 2001). Revela ainda a grande importância dos programas institucionais de fomento, para os mercados internos e externos.

Segundo Cedraz Nery (2001), percebe-se uma tendência de expansão de materiais com alto valor estético e de rara beleza, como os granitos com características exóticas apresentam, também, uma perspectiva de futuro para o mercado interno, onde a primeira possibilidade ocorreria em condições mais conservadoras, com o crescimento do setor acompanhando o crescimento geral da economia brasileira, e o outro ocorreria em condições bem mais ousadas prevendo um consumo interno expressivo com o aquecimento do setor da construção civil.

No que diz respeito à exploração de rochas ornamentais, em muitos casos as rochas têm sido extraídas e beneficiadas por processos manuais lembrando garimpos, com mal aproveitamento das reservas, falta de segurança no trabalho e desrespeito ao meio ambiente. Infelizmente este quadro ainda representa uma realidade da maioria das extrações deste tipo de mineral no Brasil.

Segundo Alencar *et al.* (1996), algumas destas causas estão na falta de uma orientação, na dispersão das áreas produtivas e na pouca experiência dos empresários no setor mineral, além da baixa disponibilidade de capital. Estes autores consideram estes fatores como as prováveis causas da adoção de metodologias e tecnologias de lavra das mais variáveis possíveis.

No fim dos anos noventa, com as fiscalizações mais intensas por parte dos órgãos ambientais, e com o esgotamento dos matacões lavráveis a céu aberto, as empresas por razões econômicas e ambientais viram-se obrigadas a adotar novas tecnologias que permitem reduzir os impactos ambientais das lavras e do beneficiamento das rochas, bem como também procurar otimizar o aproveitamento das reservas abolindo as lavras predatórias.

Assim, para (Alencar *et al.* 1996), as perspectivas de futuro para as decisões de investimento para a abertura de uma pedreira em maciço deverão considerar os potenciais de produção, sua recuperação, a vida útil da pedreira, a metodologia a ser empregada, o nível de produção, os custos e o preço de comercialização do material a ser lavrado, e um amplo conhecimento da geologia da área.

O uso de softwares no aprimoramento das lavra de rochas ornamentais, juntamente com estudos geológicos de detalhe dos maciços, tanto em superfície quanto em subsuperfície, vão ser talvez os principais aprimoramentos das pedreiras de rochas ornamentais para os próximos anos.

GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

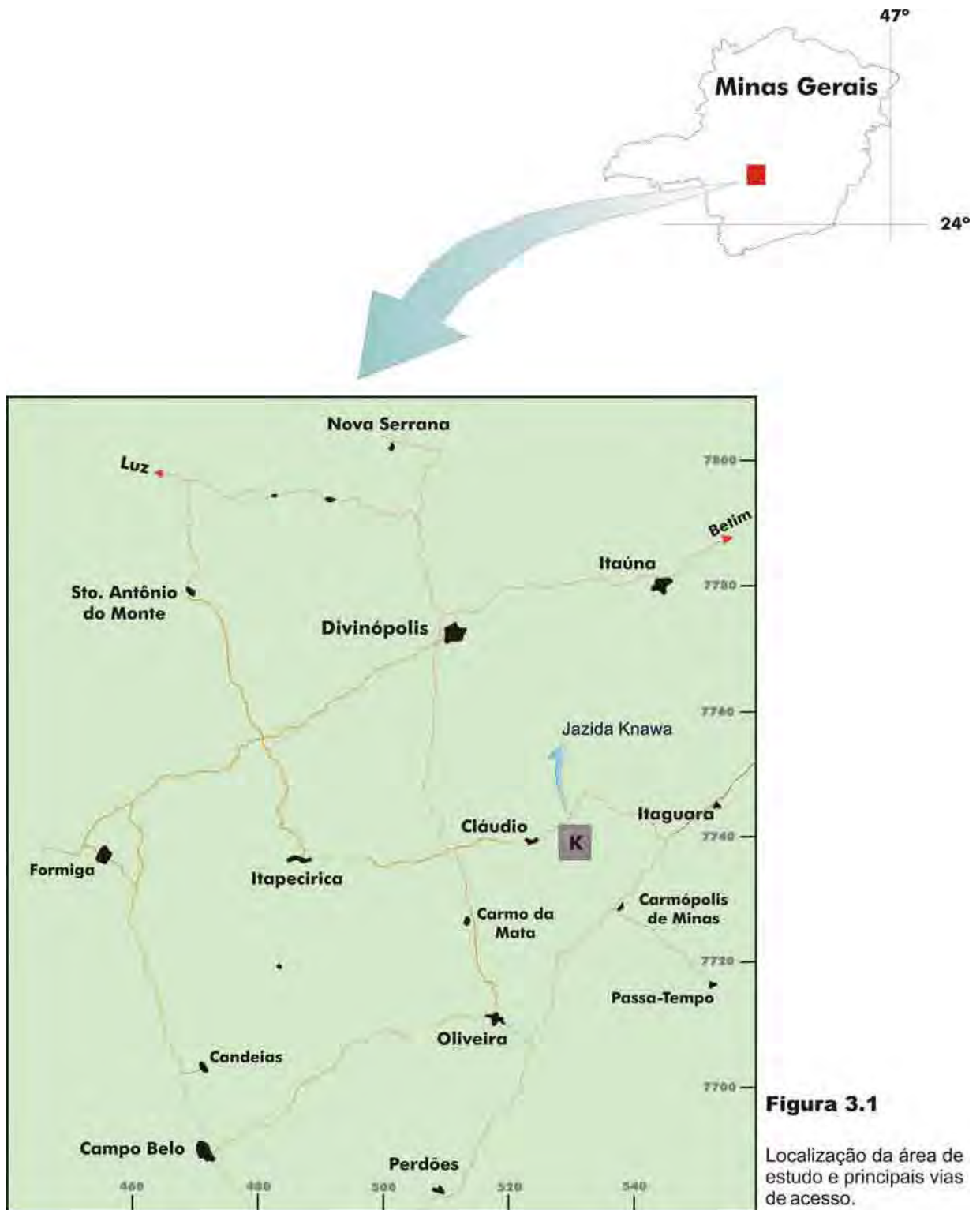
3.1 - LOCALIZAÇÃO

A área estudada encontra-se localizada na região centro-oeste do estado de Minas Gerais, no município de Cláudio (**figura 3.1**). O principal acesso à região faz-se pela rodovia federal BR – 381 (Fernão Dias) seguida por rodovias estaduais pavimentadas e por ferrovias que ligam as principais cidades da região, como: Cláudio, Itapeçerica, Oliveira, Camacho e Carmo da Mata.

Além disso, a região apresenta relativa facilidade de locomoção pela grande quantidade de rodovias secundárias, não pavimentadas, que completam a rede rodoviária, facilitando deste modo o escoamento de toda a produção de rochas ornamentais da região.

As rochas que compõem a região abrangem tanto rochas do complexo metamórfico Divinópolis quanto do Barbacena (ambos pertencentes ao atual complexo metamórfico Campo Belo de Teixeira *et al.*, 1996b), que estão inseridas dentro do contexto geotectônico do Cráton do São Francisco Meridional.

A área da mina “pedreira Knawa” encontra-se localizada muito próximo da cidade de Cláudio, cerca de 7km a nordeste da cidade, em um local conhecido por “Rocinha”.



3.2 – GEOLOGIA REGIONAL

Esta descrição tem como finalidade principal situar a mina “pedreira Knawa” no contexto geológico regional e apresentar sucintamente suas características gerais, como: tipos litológicos principais, padrão estrutural (foliações, fraturas, bandamento).

A área a ser estudada encontra-se localizada a oeste de Belo Horizonte, em uma região conhecida por quadrado granítico. Este polígono é representado pelas cidades de Divinópolis, Formiga, Oliveira, Campo Belo (**figura 3.2**). Para a COMIG (2001), esta região é denominada de Distrito Granítico de Candeias, como visto anteriormente neste trabalho.

As rochas que compõem a área de estudo correspondem ao embasamento do Cráton do São Francisco, mais precisamente em sua porção sul-sudoeste (**figura 3.3**), envolvendo rochas gnáissicos-migmatíticas de idade Arqueana (Teixeira, 1985).

O Cráton do São Francisco, definido por Almeida (1977), é entendido, fundamentalmente, como uma feição do neoproterozóico, que foi moldada pelo Evento Brasileiro, embora tenha se consolidado como segmento da litosfera continental no Arqueano (Alkmim et al., 1993).

Dentro de um contexto geológico regional mais detalhado, a região do quadrado granítico está inserida nos terrenos arqueanos chamados de complexos gnáissico-migmatítico de médio a alto grau metamórfico, denominado Complexo Barbacena por Fonseca et al. (1979). Posteriormente esta denominação foi revista por Machado Filho et al. (1983), partindo da proposta stratigráfica Ebert (1956), que propõem a idéia de que o embasamento cristalino da porção sul Cráton do São Francisco fosse dividido em dois grandes complexos denominados Divinópolis e Barbacena.

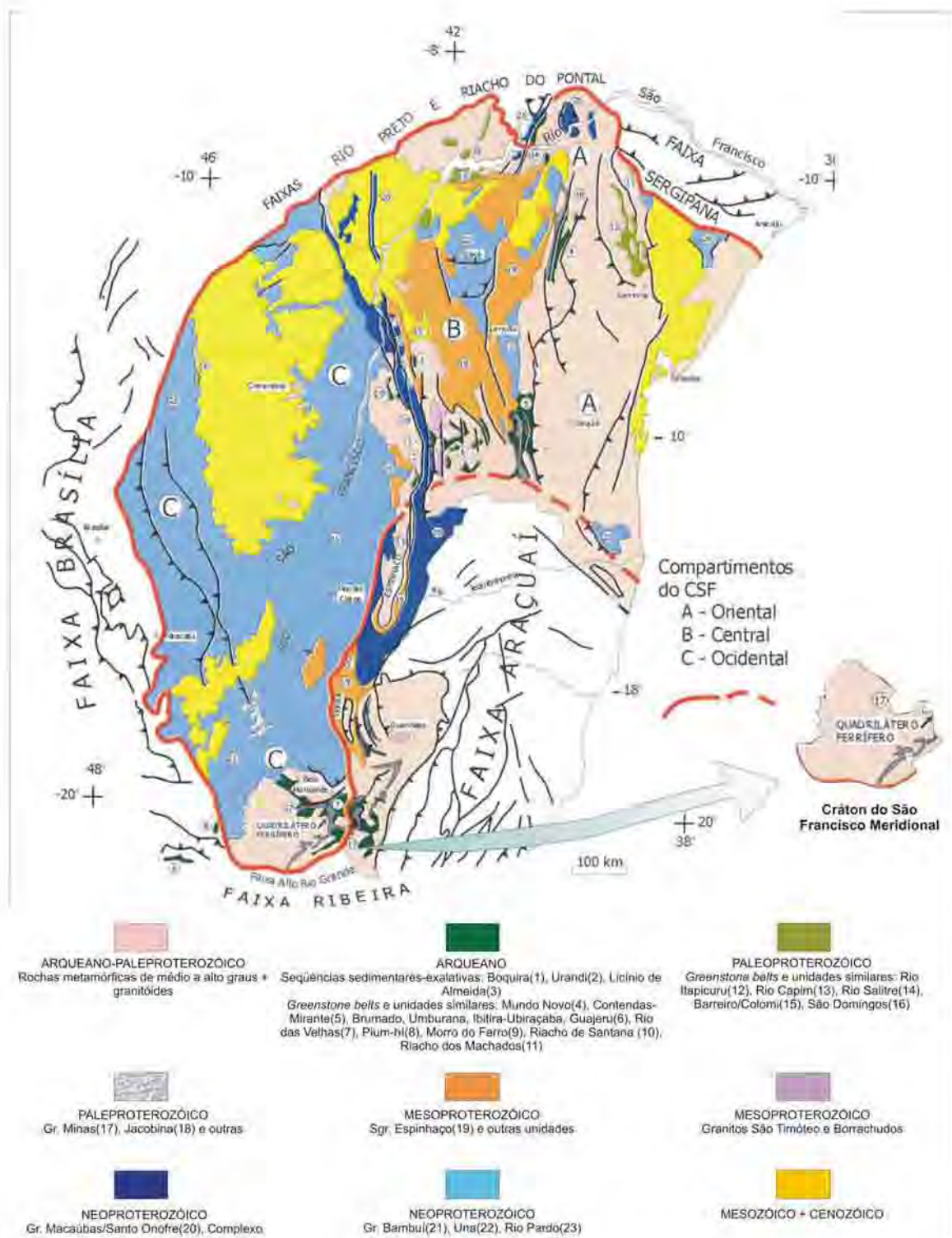


FIGURA 3.3

Mapa esquemático e simplificado do Cráton do São Francisco, segundo Schobbenhaus e Bellizzia 2000. Destacando-se sua porção meridional.

O complexo Divinópolis corresponderia a um conjunto de granitóides diatexiticos, de composição predominantemente granítica a granodiorítica, que passaria gradualmente para rochas do complexo Barbacena (Machado Filho op cit.).

Para Fonseca et. al. (1979), os litotipos que compõem o complexo Barbacena são principalmente anatexitos diversos, migmatitos de injeção, ortognaisses, granulitos, intrusivas máficas-ultramáficas e granitóides, com intercalações maiores ou menores de supracrustais.

Teixeira (1985) adotou, como mapa geológico base, uma compilação de vários autores, para representar as unidades mais regionais da porção meridional do Cráton do São Francisco (**figura 3.2**).

Para Teixeira (1985), as rochas da porção meridional do Cráton do São Francisco só poderão ser individualizadas através de suas idades geocronológicas. Considera ainda que os terrenos gnáissico-migmatíticos possuem uma grande diversidade litológica com características metamórficas de médio a alto grau, tais como; gnaisses metatexiticos e metatexitos com ocorrência mais restrita de diatexitos, anatexitos, charnockitos, anfibolitos e gnaisses facoidais.

Foi nas imediações da cidade de Campo Belo que Teixeira *et al.* (1996 a,b *apud* Oliveira, 1999) descreveram os dois complexos (Divinópolis e Barbacena) como sendo uma única unidade denominando-a de Complexo Metamórfico de Campo Belo. Sendo assim, os autores apresentam nova coluna estratigráfica para a região (**Figura 3.4**), e consideram as rochas do complexo Campo Belo como sendo as que apresentam as idades mais antigas da porção cratônica meridional.

Oliveira (1999), em estudos mais detalhados na região, subdivide a geologia desta área em unidades litodêmicas da seguinte forma: Suíte gnáissica (unidades Cláudio, Itapeçerica e Candeias), Suíte anfibolítica (*boudins* de anfibolitos), Supergrupo Rio das Velhas (metaultramáficas,

anfíbolitos, quartzitos, xistos (granada-silimanita xisto) e ferríferas), Suíte máfica fissural (diques de rochas básicas “gabróicas”).



FIGURA 3.4

Coluna estratigráfica proposta por Teixeira et al. (1996), para a região do cráton do São Francisco meridional.

As principais características das unidades que constituem a suíte gnáissica de Oliveira (*op cit*), são:

1. **Gnaiss Cláudio:** são gnaisses deformados, migmatizados e possui uma coloração predominantemente cinza, embora apresentem mobilizados pegmatíticos de coloração rósea, podendo apresentar intrusões graníticas, diques de pegmatito concordantes ou não e diques anfíbolíticos boudinados.
2. **Gnaiss Itapeçerica:** são rochas de coloração rósea, deformadas e migmatizadas, podendo observar porções de gnaisses mais cinza no

seu interior. Nota-se que estas rochas apresentam-se mais afetadas pelo evento de migmatização regional, motivo pelo qual se apresentam mais rosadas. Comumente apresentam diques pegmatíticos e anfibolíticos, mas não encontra-se indícios de corpos graníticos.

3. **Gnaisse Candeias:** são rochas de coloração verde, de aspecto homogêneo, com pouca deformação. Estas rochas apresentam veios pegmatíticos e diques de rochas básica como as demais. Quanto à quantidade de mobilizados róseo é muito semelhante a unidade de gnaisses tipo Cláudio, com poucas ocorrências.

A análise estrutural desta área sob a ótica deste mesmo autor, indicam que estas rochas foram submetidas a três grandes eventos deformacionais. Sendo o segundo o mais expressivo na região e, simultaneamente a ele deve ter ocorrido o processo de migmatização regional que possivelmente gerou a intrusão dos corpos graníticos dentro das suítes gnáissicas.

A foliação principal impressa nestas rochas é evidenciada por um fino bandamento composicional representado pela orientação dos minerais prismáticos e micáceos, sua estrutura pode ser difusa do tipo nebulítica. Possui direções preferenciais NE/SW com mergulhos, em geral, de médio a alto ângulo e caimento variando de NW para SE (Oliveira, 1999).

Este mesmo autor seleciona a região de domínio da zona de cisalhamento Cláudio (**Figura 3.5**), como sendo o melhor local de caracterização desta foliação.

Mais regionalmente, autores como Carneiro *et al.* (1998), destacam a ocorrência de quatro gerações de diques máficos na porção meridional do Cráton do São Francisco, mais precisamente na região conhecida por complexo metamórfico do Bonfim. Estes diques apresentam orientações preferenciais NNW a NNE.

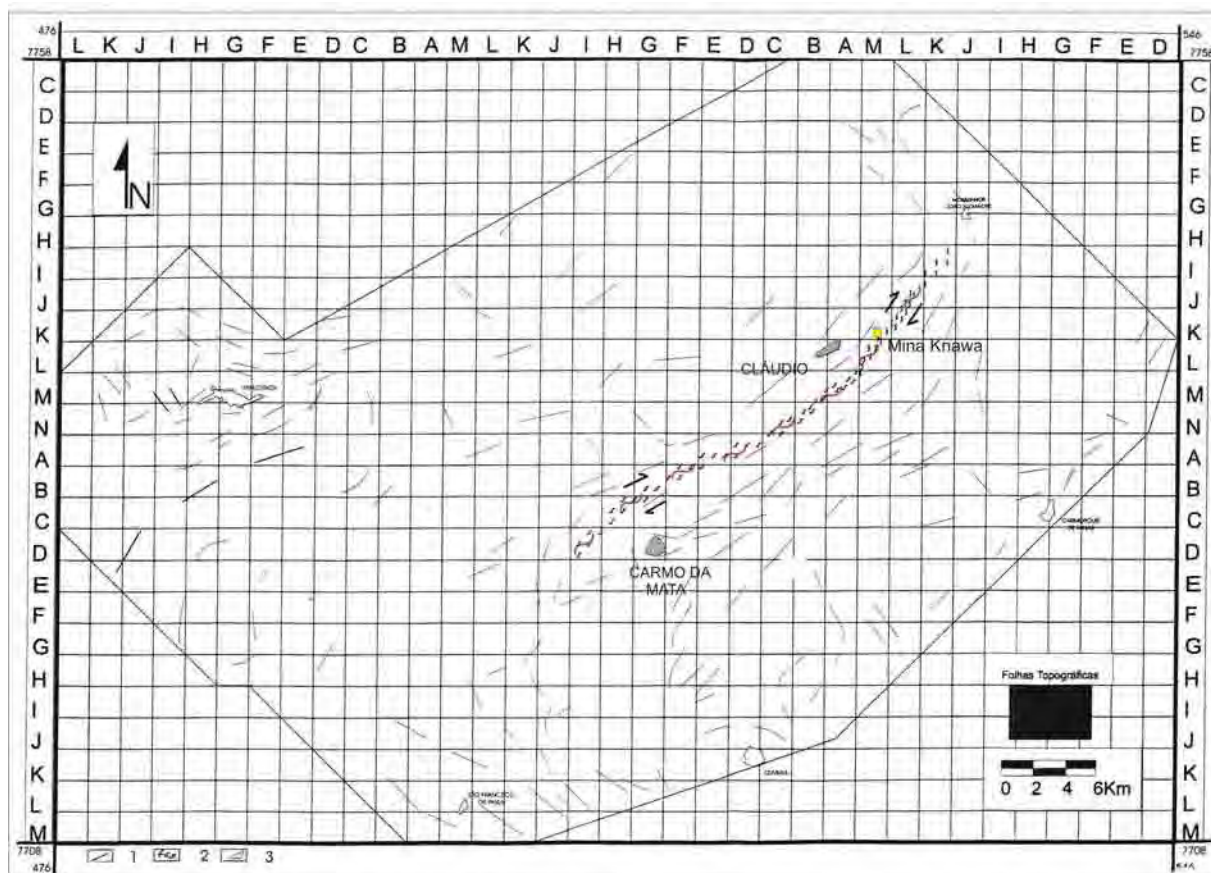


Figura 3.5

Mapa das principais estruturas em escala regional da área. Com ênfase na zona de cisalhamento Cláudio(2), em vermelho. Os demais traços são alinhamentos tectônicos extraídos de imagem de satélite (Oliveira, 1999).

3.3 – GEOLOGIA DA MINA “KNAWA”

A mina “Knawa” encontra-se localizada nos domínios da zona de cisalhamento Cláudio (estrutura definida por Oliveira ,1999; **Figura 3.5**), e compõe-se de um gnaiss de coloração cinza que o mesmo autor denominou de “Gnaiss tipo Cláudio”.

O morro que constitui a pedra de rochas ornamentais “Knawa” apresenta uma elevação morfológica de forma elíptica, onde seu maior lado

coincide com os alinhamentos tectônicos NE-SW descritos por Oliveira *op cit*, como sendo da zona de cisalhamento Cláudio.

As informações apresentadas neste capítulo constituem um conjunto de observações geológicas de superfície e de exposições de frentes de lavra, que permite compor parte da complexa história geológica desta jazida, com descrição da litologia predominante, variedades petrográficas associadas, e dos processos de migmatização e deformação que afetaram estas rochas.

O arcabouço litológico predominante corresponde a um biotita gnaisse bandado fortemente migmatizado e deformado, de coloração cinza claro a cinza esbranquiçado, com pequenas quantidades de mobilizados félsicos de coloração rósea e xenólitos de rochas básicas e ultrabásicas. As estruturas exibidas por esta rocha são predominantemente gnássica a migmatítica e revelam, em escala de detalhe, uma grande heterogeneidade, permitindo individualizar litotipos dentro deste arcabouço. Podem ser identificados: biotita gnaisse bandado (rocha predominante), xenólitos de anfibolito e ultramáfitos, granito, bandas dioríticas, veios pegmatíticos, zonas migmatíticas, veios migmatíticos de zonas de cisalhamento e diques de anfibolitos (**Figura 3.6 a,b**).

A **figura 3.7** é o mapa geológico simplificado da pedreira, onde pode-se visualizar a distribuição das variedades petrográficas mencionadas acima e estabelecer também, de forma aproximada, uma proporção volumétrica dos principais constituintes do arcabouço rochoso estudado.

As estruturas impressas nestas rochas revelam uma história complexa, porém parte de sua história pode ter sido perdida devido à obliteração causada pelas estruturas mais novas.

Para Passchier *et al.*, (1990) um gnaisse pode não revelar claramente todos os aspectos de sua história, pois processos de deformação mais jovens tendem a achatar estruturas mais antigas obscurecendo-as ou mesmo obliterando-as.



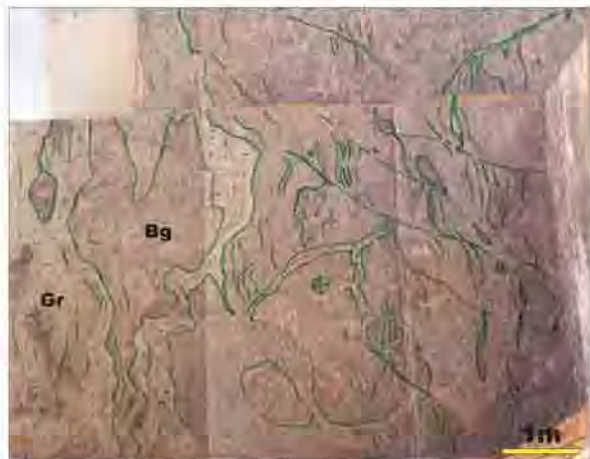
Frente de Lavra do nível 5 da pedreira "Knawa", com predominância de Biotita Gnáisse migmatítico (Bg) e subordinadamente zonas migmatíticas (Zm) e veios pegmatíticos (Vp).



Frente de Lavra do nível 4, próximo ao Paredão Nordeste da Pedreira com grandes xenólitos de anfibolito (Xa1) inserido no contexto de seu arcabouço litológico (Bg).



Frente de Lavra do nível 4, localizada a noroeste da Pedreira com camadas de rochas máficas "diorito" (Di).



Frente de Lavra dos níveis 4 e 3 na posição centro-leste da pedreira com destaque para o Granito anatéctico (Gr) oriundo da fusão do Biotita Gnáisse migmatítico (Bg).

Figura 3.6a

Ilustração das heterogeneidades petrográficas encontradas dentro do contexto do Biotita Gnáisse Migmatítico na Pedreira Knawa.

As observações do conjunto de feições geométricas impressas no maciço da pedreira e em seu entorno permitiu identificar uma foliação principal (Sn+1) bem marcante na área, de direção NE, com mergulhos, em

geral, de alto ângulo e caimentos tanto para NW quanto para SE, mas com predominância para SE.



Frente de Lavra dos níveis 4 e 3 na posição centro suldeste da pedreira com destaque para a litologia principal Biotita Gnáisse migmatítico (Bg) e subordinadamente veios pegmatíticos (Vp) e diques boundinados de anfibolito metassomático (Am).



Frente de Lavra do nível 2 com predominância de Biotita Gnáisse Migmatítico ocorrendo litotipos menores, tais como; veios migmatíticos de zonas de cisalhamento (Vzc), zonas migmatíticas (Zm).

Figura 3.6b

Ilustração das heterogeneidades petrográficas encontradas dentro do contexto do Biotita Gnáisse Migmatítico na Pedreira Knawa.

Além da foliação principal foram reconhecidas na área duas outras foliações bem marcantes, o bandamento composicional paralelo a uma xistosidade (Sn) e zonas cisalhamento menores que deformam as duas estruturas anteriores.

O bandamento composicional (Sn) apresenta direções paralelas à foliação principal, mas com mergulhos variados, em geral, com caimentos para NW. A relação de sobreposição destas foliações pode ser melhor visualizada nas charneiras de algumas dobras, onde o bandamento apresenta-se dobrado e a foliação principal plano axial destas dobras.

As estruturas menores bem como a evolução estrutural proposta para esta área serão apresentadas neste capítulo no sub-item geologia estrutural da área.

3.3.1 – LITOLOGIA

O litotipo predominante na pedreira é um biotita gnaiss bandado de coloração cinza levemente rosado e muito deformado que representa o produto avo de extração da pedreira. Porém, em algumas de suas porções, principalmente no centro e SSW (**Figura 3.7**), apresenta mobilizados pegmatíticos de coloração rósea, conferindo à rocha tons rosados. Adicionalmente, ocorrem leitões graníticos anatéticos de coloração branca, zonas migmatíticas, veios de pegmatitos concordante ou não com a foliação principal e tipos de ocorrência de anfibolitos boudinados, sendo uma delas associada a rochas metaultramáficas (**Figura 3.6a**).

O biotita gnaiss é bandado, em geral na escala centimétrica, mas localmente as bandas escuras ocorrem com espessura decimétrica a métrica. Tendo em vista que estas rochas são utilizadas para fins ornamentais, no mapa geológico as bandas escuras com espessura superior a 1 metro foram individualizadas como bandas dioríticas.

A caracterização microscópica do biotita gnaiss revelou uma textura granoblástica a granolepdoblástica com granulação média, podendo exibir grandes cristais de plagioclásio. Sua mineralogia é composta predominantemente de plagioclásio (35%), quartzo (30%), feldspato potássico (25%), biotita (15%) e subordinadamente ocorrem hornblenda, clorita, sericita e apatita. As proporções de seus constituintes revelam uma composição monzogranítica conforme indicado no diagrama QAP (**Figura 3.8**) de Streckeisen (1976b).

Abaixo segue a caracterização petrográfica dos diferentes litotipos, cuja distribuição espacial, é fornecida pelo mapa geológico (**Axeno 1**) e **Figura 3.7**.

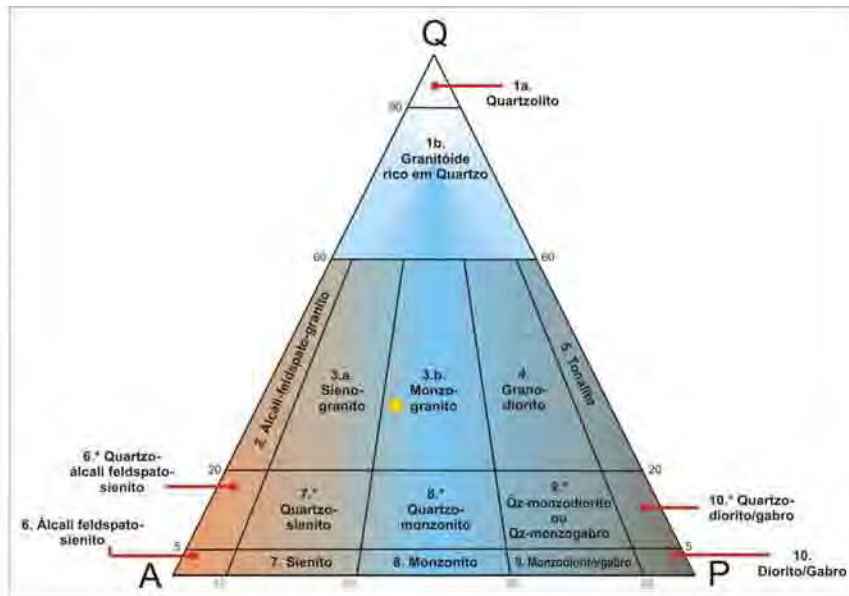


Figura 3.8

Diagrama QAP mostrando a composição da rocha principal o biotita gnaiss (ponto amarelo).

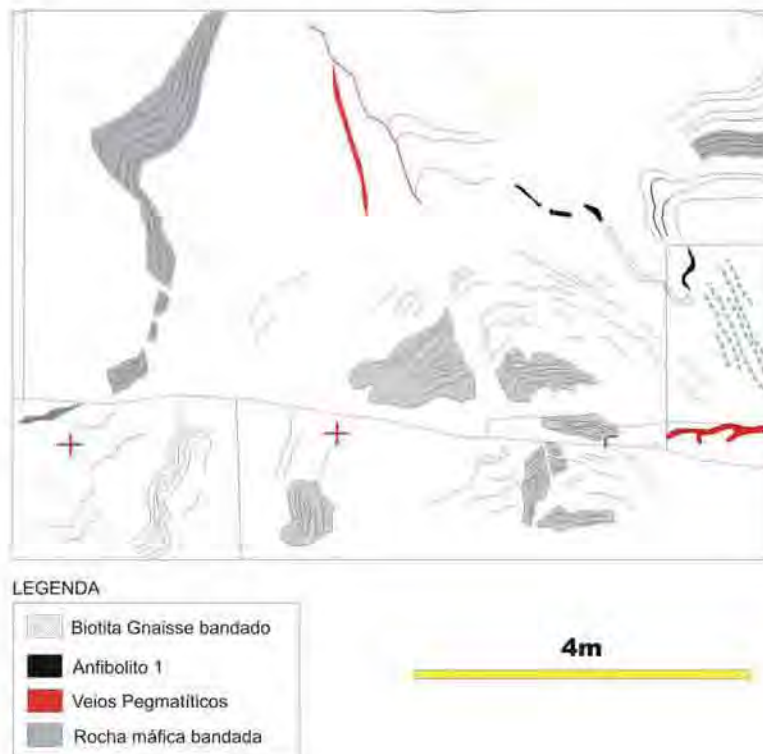


Figura 3.9

Perfil no extremo norte da pedra, evidenciando rocha metadiorítica dobrada.

BANDAS DIORÍTICAS

Trata-se de rochas máficas bandadas, de granulação média, podendo ocorrer bandas de anfibolito boudinados com mobilizados migmatíticos de coloração rósea.

A distribuição destes litotipos na pedreira pode ser visualizada no mapa geológico (**Anexo 1**, cartografada na cor marrom), onde nota-se que ocorre em maior quantidade a oeste da pedreira, comportando-se como uma camada de aproximadamente 2m de espessura que corta toda a pedreira de SW-NE acompanhando o sentido da foliação principal.

Microscopicamente, este litotipo apresenta uma textura granolepdoblástica de granulação fina a média, e seus minerais constituintes são predominantemente o plagioclásio (45%), quartzo (20%), biotita (25%), hornblenda (5%) e subordinadamente apatita, pistacita, zircão, titanita, sericita, carbonato e feldspato potássico (**Foto 3.1**). É importante ressaltar que os cristais de hornblenda são substituídos pela biotita em um processo retrometamórfico, sendo possível visualizar também, um alinhamento preferencial da hornblenda em direções diferentes do alinhamento da biotita (**Foto 3.2 e Foto 3.3**).

Em alguns pontos da pedreira, este litotipo apresenta-se dobrado e seccionado por zonas de cisalhamento D_{n+2} paralelo à foliação S_{n+1} ou ainda parcialmente apagado pelo processo de migmatização, dificultando o reconhecimento de algumas estruturas (**Foto 3.4 e Figura 3.9**).

O litotipo representa bem o bandamento reliquiar "paleossoma", que provavelmente se concentrou pela fusão parcial do material quartzo-feldspático da rocha original que migrou para planos da foliação principal. Há duas grandes implicações para o aproveitamento ornamental deste litotipo: coloração preta característica, que o diferencia do geral da rocha e quebra a homogeneidade litológica da biotita gnaisse bandado migmatítico, tornando

esta área inapropriada para ser explorada com a finalidade ornamental; e quantidade de minerais máficos (biotita e anfibólio) placóides podendo acarretar problemas em seu beneficiamento.

ANFIBOLITO 1 (X_{A1})

Rochas de granulação fina, melanocrática, densa, fanerítica, de coloração preta e fortemente foliada, ocorre na forma de enclaves e/ou diques boudinados e é encontrado em praticamente toda a pedreira (**Foto 3.5**), mas concentra-se predominantemente em sua porção NNE (**figura 3.7 e Anexo 1**).

Nota-se que estes enclaves possuem uma orientação preferencial paralela à orientação da foliação principal e mergulhos ora discordantes e ora concordantes.

Macroscopicamente a rocha possui uma mineralogia pobre, com três minerais predominantes biotita, anfibólio e plagioclásio e, subordinadamente pirita. Associado a estes anfibolitos encontra-se rocha metaultrabásica, que em lâmina apresenta uma textura granoblástica a granonematoblástica e granulação média, onde seus constituintes principais são olivina, talco, tremolita. A composição modal de (90%) olivina, (8%) talco e (2%) de tremolita revela ser um dunito (**Foto 3.6**).

Esta rocha possui característica de quebrar a homogeneidade do biotita gnaisse migmatítico explorada com a finalidade ornamental. Sendo assim este litotipo é interpretado neste trabalho como sendo defeito ornamental da rocha, e a área que apresentar este litotipo será considerada região de baixa recuperação.



Foto 3.1

Detalhe microfotográfico da textura granoblástica do biotita gnaisse bandado migmatítico e sua mineralogia predominantemente de plagioclásio (PL-35%), quartzo (QZ-30%), microclina (FK-25%), biotita (Bt-10%).



Foto 3.2 - a e b

Fotomicrografias da banda diorítica, mostrando sua textura granolepdoblástica com plagioclásio (PL-45%), quartzo (QZ-20%), biotita (Bt-25%) e subordinadamente pseudomorfos de hornblenda, titanita, carbonato e traços de feldspato potássico.

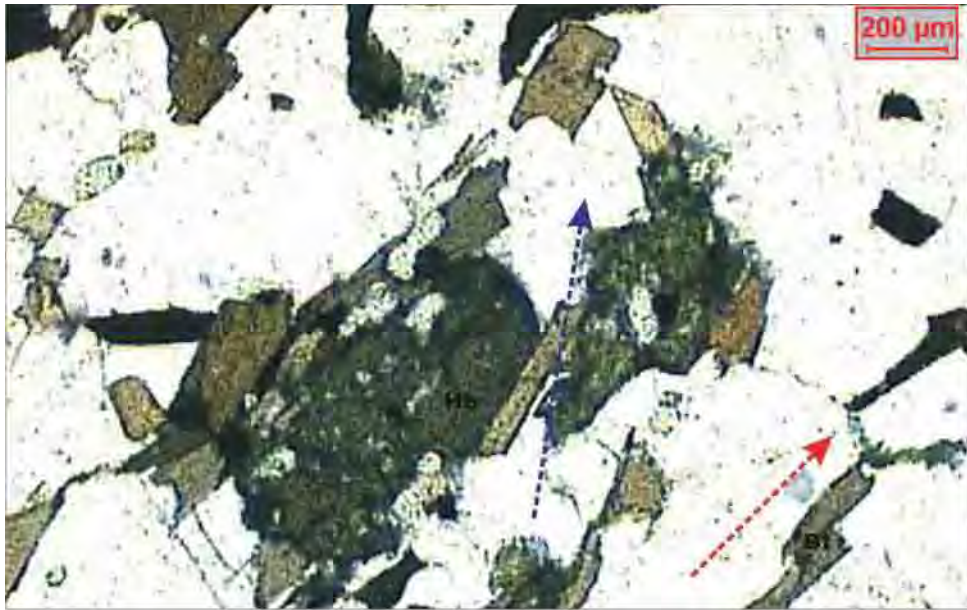


Foto 3.3

Direção preferencial de alinhamento dos cristais hornblenda (seta azul) e de biotita (seta vermelha). Destacando direções preferenciais distintas com retrometamorfismo de hornblendas passando para biotitas.



Foto 3.4

Corte mostrando as bandas dioríticas (Di) no biotita gnaisse migmatítico (Bg). Encontram-se dobradas e seccionadas pela foliação principal, mas ainda preservando restitos do bandamento composicional da rocha.

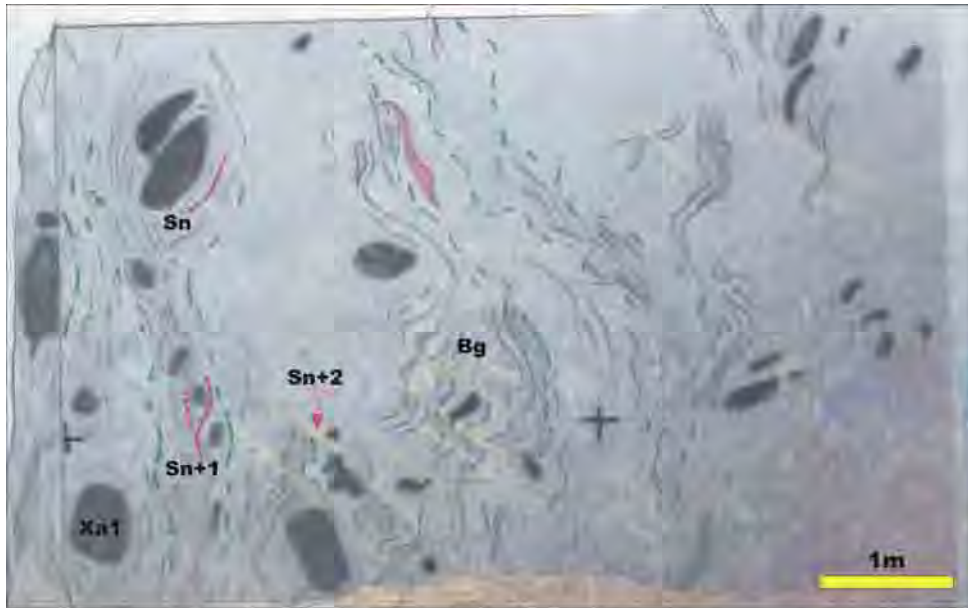


Foto 3.5

Enclaves de anfobolito 1 (Xa1), deformados e localmente rotacionados pela foliação principal, representando bem seu principal modo de ocorrência. Afloramento localizado a nordeste da pedreira e corresponde a uma seção e/ou corte ortogonal a foliação principal.



Foto 3.6 - a e b

Fotomicrografia de rocha ultrabásicas exibindo grandes cristais de olivina (OL) localmente alterados para talco (Ta), e, subordinadamente, tremolita.

ANFIBOLITO 2 (X_{A2})

Este litotipo petrograficamente é uma associação de anfibolito 1 (X_{A1}) e mobilizados de quazto+feldspato que aparentemente representa um produto de fusão parcial do anfibolito 1 e da rocha encaixante (biotita gnaisse bandado migmatítico). É importante ressaltar, neste local, a grande ocorrência de manchas esverdeadas na rocha encaixante, que está sendo interpretada como sendo disseminação de pirita devido à fusão parcial destes anfibolitos (**Foto 3.7**).

Neste sentido viu-se a necessidade de diferenciar esta variação petrográfica local em mapa como anfibolito 2. Esta variação petrográfica ocorre na porção central da pedreira próximo ao leito granítico anatético, e em mapa (**Anexo 1 e Figura 3.7**) está cartografada na cor cinza.

ANFIBOLITO 3 (**Da**)

Este litotipo apresenta-se discordante da foliação principal (S_{n+1}) da rocha, ocorre na forma de diques boudinados e possui característica petrográfica distinta dos demais anfibolitos estudados na pedreira. Foram observados 3 corpos tabulares desta litologia que ocorrem ao longo de quase toda a pedreira com uma orientação preferencial aproximadamente paralela à foliação principal, mas com mergulhos bem distintos. Em mapa, o litotipo está cartografado na cor rosa (**Anexo 1 e Figura 3.7**).

Macroscopicamente a rocha apresenta anfibólio, biotita, plagioclásio e pequenos leitos róseos de feldspato potássico, podendo apresentar um fino bandamento composicional (**Foto 3.8**).

Estes diques apresentam-se boudinados em duas direções, sendo o maior estiramento registrado no sentido da direção da foliação principal,

indicando que foram deformados pela fase Dn+1. Estas características geométricas sugerem que representam diques pós-Dn.

LEITOS GRANÍTICOS

Este litotipo é bem marcante em toda a mina e possui as seguintes características, que o distinguem dos demais litotipos:

- Possui cor branca, textura fanerítica de granulação grossa, onde seus constituintes principais são plagioclásio, feldspato potássico, quartzo e apresenta como acessórios a magnetita, pirita e muito raramente a molibdenita (**foto 3.9**).
- Seu contato é difuso e penetra na encaixante, levando à assimilação completa de algumas porções do biotita gnaisse (**foto 3.10**).
- Apresenta-se como corpos irregulares de espessuras variando de centimétricas a métrica, cortando toda a extensão da pedreira; em mapa esta rocha encontra-se cartografada na cor laranja (**Anexo 1, Figura 3.7 e foto 3.10**).

Esta rocha tem o aspecto de neossoma que se segrega em forma de leitões ou de veios até formar porções maiores como pode-se observar na **Foto 3.10**, sugerindo ser produto de fusão parcial do biotita gnaisse encaixante.

Para o ponto de vista de exploração ornamental este litotipo também se comporta como defeito, uma vez que sua ocorrência oblitera as estruturas da rocha descaracterizando-a para a finalidade ornamental.

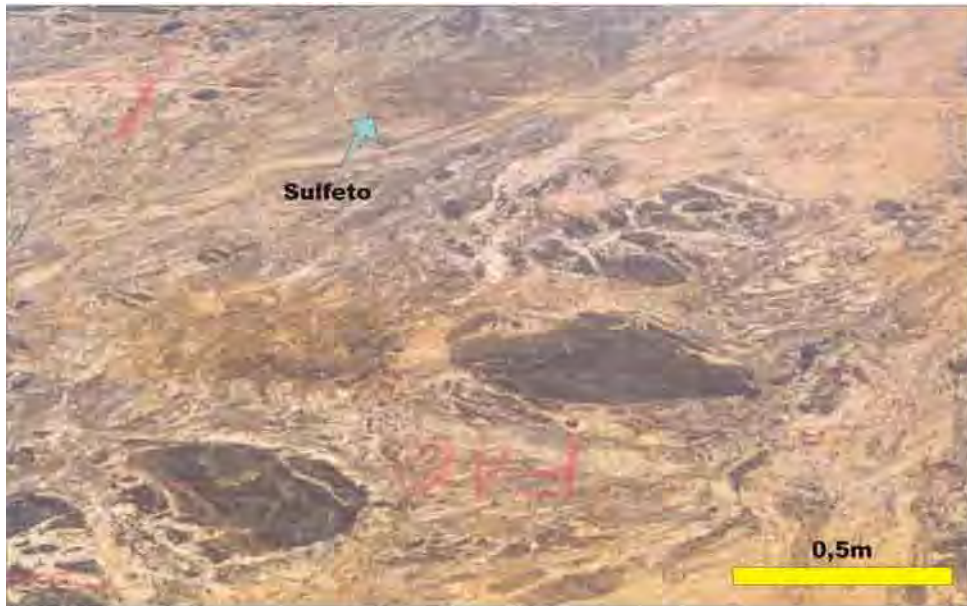


Foto 3.7

Anfibolito 2 com mobilizados migmatíticos de quartzo + feldspato e manchas de sulfetos na rocha encaixante.

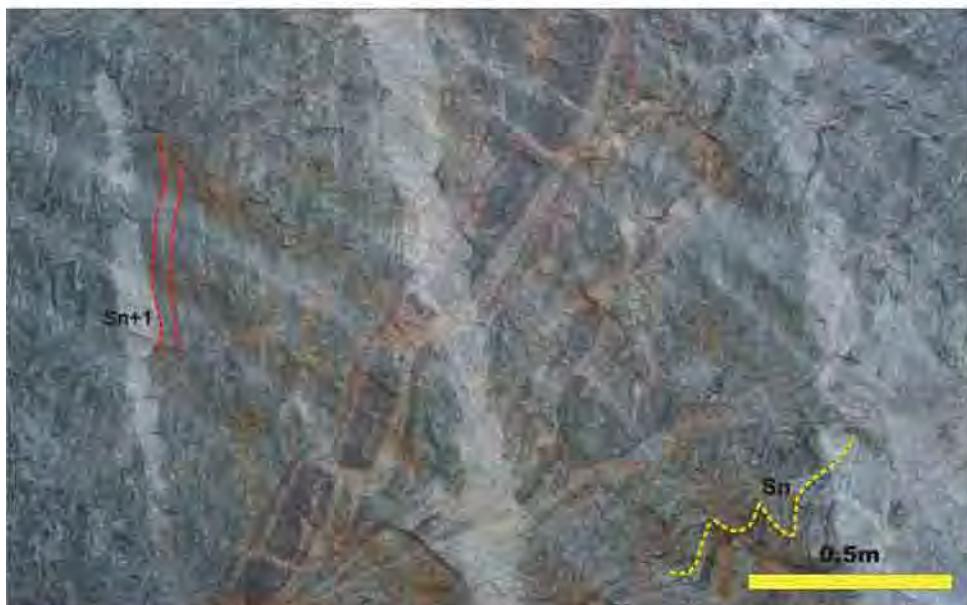


Foto 3.8

Exposição de um dique de Anfibolito 3 evidenciando um bandamento interno e seu comportamento rúptil. Nota-se ainda sua discordância com relação à foliação principal (S_{n+1}).

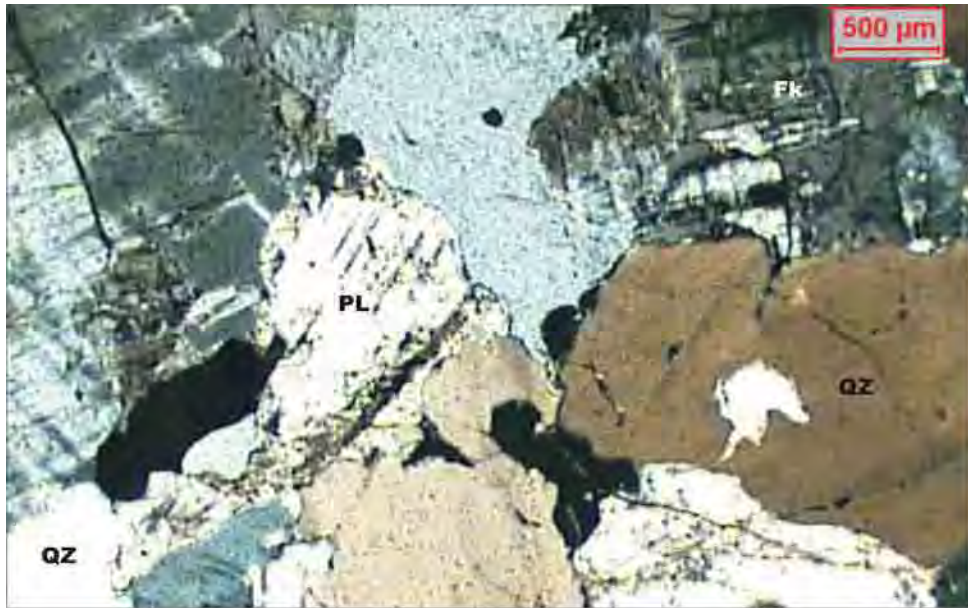


Foto 3.9

Textura fanerítica de granulação grossa e contatos retos a levemente lobulados entre os cristais. Nota-se a grande predominância de composição granítica: plagioclásio (PL), feldspato potássico (Fk) e quartzo (QZ).



Foto 3.10

Exposição do leito granítico (LG) "neossoma" em uma das paredes da pedra, revelando contatos penetrantes com assimilação de "paleossoma". (Xa1) - Anfibolito 1 parcialmente consumido pelo granito.

VEIOS PEGMATÍTICOS

Este litotipo se apresenta na forma de veios que cortam o maciço tanto de forma concordante quanto discordante (**Foto 3.11**), apresentando espessuras centimétricas e comprimento variável de centimétrico a métrico. Sua mineralogia predominante é quartzo, feldspato potássico, e eventualmente biotita. O tamanho de seus cristais varia muito em média de um centímetro, podendo chegar a 7 cm.

A grande maioria dos veios pegmatíticos (WNW) discordam em alto ângulo com as foliações S_{n+1} e S_n , mas pode-se observar que alguns destes veios convergem para direções (NNE) paralelas às mesmas foliações, como pode-se ver no centro da pedreira (**Foto 3.12 – da veio grande na centro da pedreira**). Os veios têm direções NNE e WNW, entretanto, com predominância desta última orientação. Estes veios estão representados no mapa na cor vermelha e podem ser melhor visualizados na porção centro sul da pedreira (ver mapa geológico, **anexo 1**).

ZONAS MIGMATÍTICAS

Apresenta-se de forma heterogênea e difusa na rocha principal formando veios e leitos de neossomas de coloração rósea imprimindo à rocha tons rosados, característica importante no aspecto ornamental da rocha. É importante ressaltar a grande dificuldade de se reconhecer e mapear estas zonas principalmente pelo aspecto difuso de seus limites (**Foto 3.13**). A foliação S_n torna-se pouco perceptível nestes domínios e por vezes totalmente apagados.

Estas zonas são ricas em mobilizados graníticos de composição quartzo feldspática, destacando-se a presença de feldspato potássico responsável pelos tons rosados à rocha.

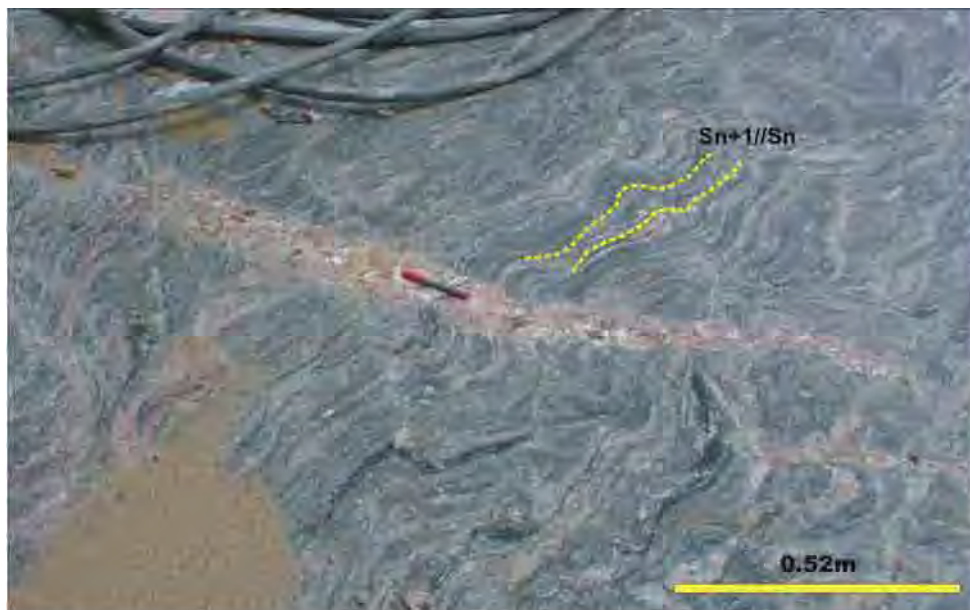


Foto 3.11

Veio pegmatítico ocupando fraturas de tipo T de alto ângulo, discordante da foliação principal (S_{n+1}) com direção WNW-ESE. Macroscopicamente possui mineralogia com plagioclásio, feldspato potássico, quartzo e biotita. Vista de planta.



Foto 3.12

Veio pegmatítico sub-paralelos a foliação principal. Ora assumindo direções paralelas a foliação principal e ora discordantes. Vista de planta.



Foto 3.13

Zonas migmatíticas ocorrendo da forma de veios (Zmv) ou difusa (Zmd), deixando a rocha com aspecto nebulítico. Parede do nível 5 próximo a região com maior aproveitamento da pedreira.

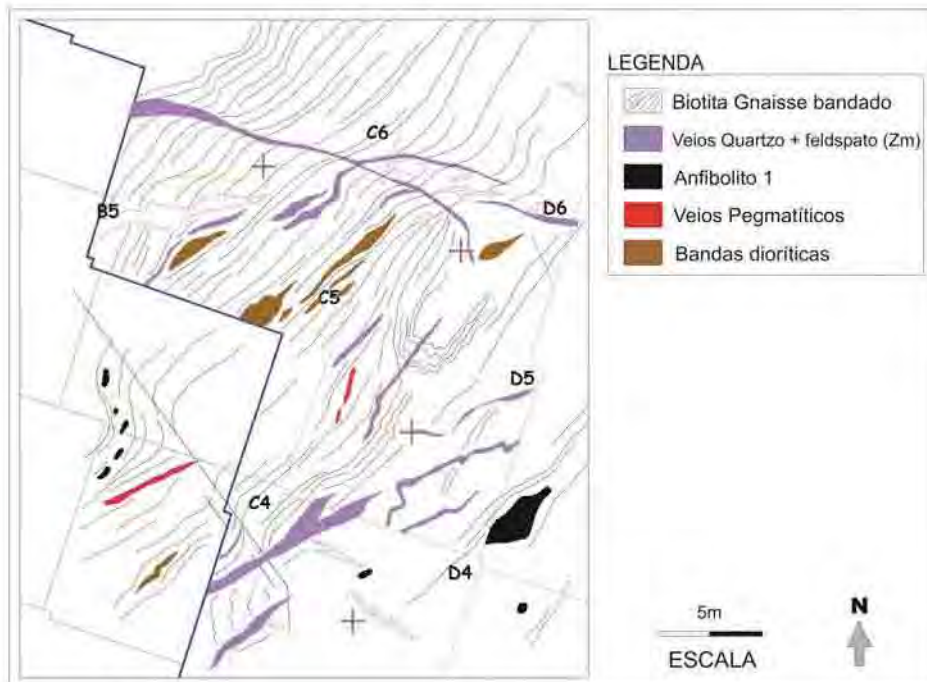


Figura 3.10

Porção sudoeste da pedreira destaca-se pelas grande quantidade de veios quartzo+feldspato atribuido a zonas migmatíticas (Zm), deixando a rocha com tons rosados. Representa grande área produtiva da pedreira.

Apresenta uma distribuição um pouco caótica, podendo, no entanto assumir preferencialmente a direção da foliação S_{n+1} . Seu principal local de ocorrência está na porção centro sul da pedreira.

Estas zonas são responsáveis por imprimir na rocha tons rosados deixando-a com aspecto nebulítico, tornando-a, do ponto de vista ornamental, mais atrativa (**figura 3.10**). Por isso, áreas reveladas como sendo as mais produtivas da pedreira (mapa comercial da rocha – **figura 4.5**) coincidem bem com a ocorrência destas zonas.

3.4 – ANÁLISE ESTRUTURAL DA ÁREA

A análise estrutural do trabalho baseia-se na descrição das estruturas encontradas nas rochas da pedreira e de seu entorno, com o intuito de caracterizar a geometria destas estruturas e posteriormente interpretar o significado tectônico, podendo assim, formular hipóteses sobre os processos cinemáticos impressos na área.

Os conceitos de análise estrutural foram postulados principalmente por TURNER & WEISS, 1963; RAMSAY (1967); RAMSAY & HUBER, (1987) e aprimorados ao longo do tempo, conforme pode ser visto em vários livros textos atuais. Em todos estes textos são destacados três aspectos principais para uma análise estrutural: análise geométrica e/ou descritiva, análise cinemática e análise dinâmica. A análise geométrica visa o reconhecimento das estruturas, sua descrição e orientação espacial. A análise cinemática identifica e interpreta os movimentos (rotações, translações - deformação) que geram as estruturas observadas na etapa anterior. Finalmente, a análise dinâmica é a que busca reconhecer as forças e tensões aplicadas nas rochas.

As estruturas neste trabalho são agrupadas de acordo com os critérios de superposição, e ordenadas, temporalmente, da mais antiga para a mais nova, denotando a idade relativa entre as estruturas (por ex. S_n , S_{n+1} , para a foliação e etc..). O mesmo critério foi adotado para a ordenação temporal das estruturas em fases de deformação (D_n , D_{n+1} , etc...).

A análise estrutural sistemática da região foge ao escopo da presente dissertação de mestrado, todavia foram efetuadas algumas observações no entorno da pedreira, visando facilitar uma melhor correlação entre as estruturas observadas na pedreira knawa e aquelas descritas na região. Desta forma a análise estrutural do trabalho fez-se em duas escalas, a

primeira considera as estruturas do entorno da pedreira, e a segunda aborda o contexto geológico estrutural da pedreira.

3.4.1 – ANÁLISE ESTRUTURAL DAS ÁREAS ADJACENTES À PEDREIRA KNAWA

Os estudos de fotografias aéreas evidenciaram bem os principais lineamentos tectônicos contidos na área, destacando-se principalmente os de direção NE/SW encontrados ao sul da cidade de Cláudio, região onde encontra-se inserida a Pedreira Knawa (**figura 3.11**).

Este lineamento tectônico é interpretado por Oliveira (1999) como sendo parte de uma zona de cisalhamento dextral de alto ângulo com direção NE/SW.

O registro de memória e/ou evolução geológica das rochas estão impressos sob a forma de elementos de trama como foliações, lineações, dobras, associações minerais, *boudins* e etc..No entanto, nas rochas gnáissicas de alto grau o seu reconhecimento é uma tarefa difícil, pois seus registros são parcialmente destruídos pelas intensas recristalizações e deformações que obliteram seus elementos prévios.

Apesar destas dificuldades, o autor optou por separar os elementos de trama da rocha para efeito de descrição em vários grupos: estruturas (foliações) e as suas estruturas lineares correlatas, dobras, *boudins*, zonas de cisalhamento, juntas e veios.

3.4.1.1 – FOLIAÇÕES

Nas áreas adjacentes à Pedreira Knawa foram reconhecidas duas foliações bem marcantes, e uma terceira bem restrita contida nos planos das zonas de cisalhamento menores.

Seguindo os critérios de superposição observados, principalmente nas relações de campo, tais como relações de cortes das foliações, diferenças de orientação e truncamento de estruturas, pode-se separar temporalmente as três foliações em S_n , S_{n+1} , S_{n+2} , refletindo sua idade relativa.

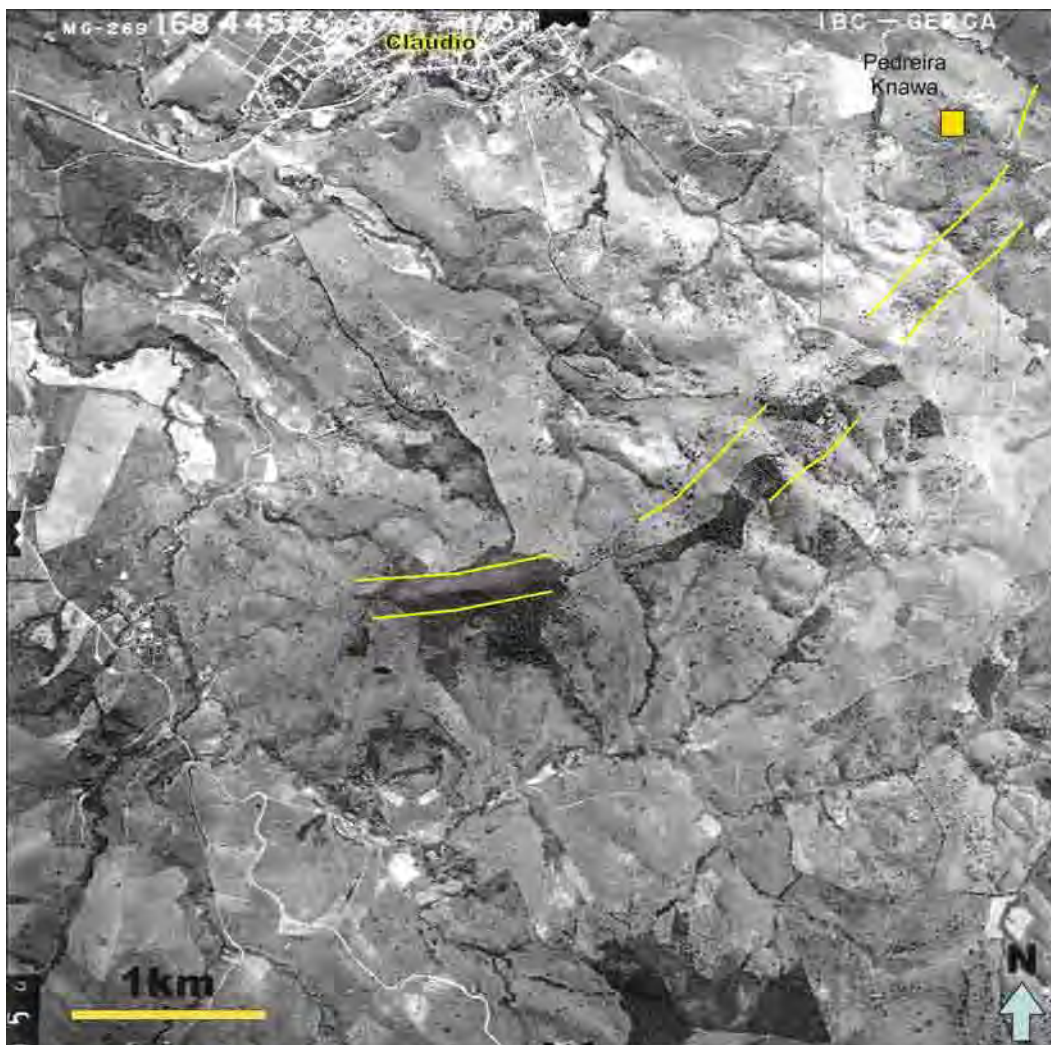


Figura 3.11

Fotografia aérea da região em que encontra-se inserida a Pedreira Knawa, com destaque para os alinhamentos tectônicos de direção NE-SW de escala regional observados ao sul da cidade de Cláudio.

FOLIAÇÃO Sn

A foliação Sn é marcada pelo alinhamento dos minerais placóides (biotitas e anfibólios) e pela ritmicidade de camadas de mobilizados quartzo-feldspáticos e biotíticas, sendo esta xistosidade paralela ao bandamento composicional da rocha.

Em alguns pontos seu reconhecimento se torna difícil, devido a parcial obliteração e rotação para os planos da foliação mais nova (Sn+1).

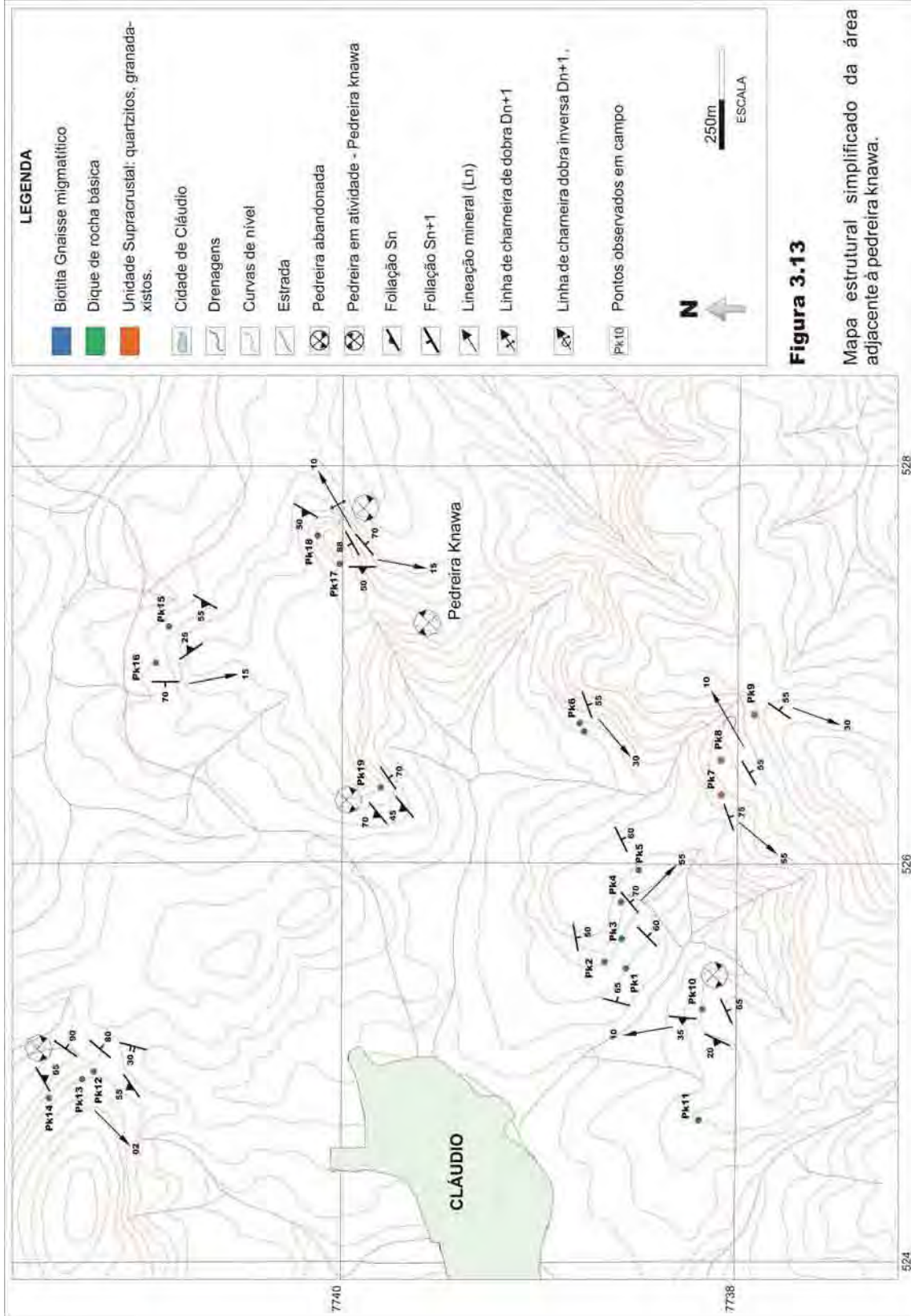
O reconhecimento desta foliação tornou-se possível em algumas pedreiras abandonadas na área, onde encontram-se grandes cortes na rocha permitindo observar melhor sua orientação (**Figura 3.11**). Sua distribuição na área pode ser observada no mapa estrutural simplificado (**figura 3.12**).



Figura 3.12

Frentes de lavras de algumas pedreiras abandonadas próximo a pedreira knawa apresentando grandes exposições de rocha com presença de estruturas. **Foto A** (Pk10), exibe a relação de sobreposição da foliação Sn+1 sobre a Sn. **Foto B**, também no ponto (Pk10), revela bem a orientação preferencial dos planos de Sn. **Foto C**, revela também a orientação preferencial da foliação Sn.





A foliação Sn possui duas concentrações preferenciais de direção (máximos: 268/55; 275/37), e subordinadamente apresenta variações na sua direção e mergulhos, indicando que a foliação foi dobrada e rotacionada para orientações mais subverticais (**Figura 3.14**). A dispersão da foliação Sn pode ser adaptada a uma guirlanda que reflete o dobramento Dn+1, com um eixo construído aproximadamente WNW- ESE.

A lineação mineral de estiramento marcada pelos alinhamentos dos minerais placoides biotita e, raramente, anfibólio apresenta-se contida nos planos da foliação Sn, podendo variar de *strike* a *dip* com predominância para direção *strike*. Dentro do domínio da pedraira esta lineação é predominantemente strike.

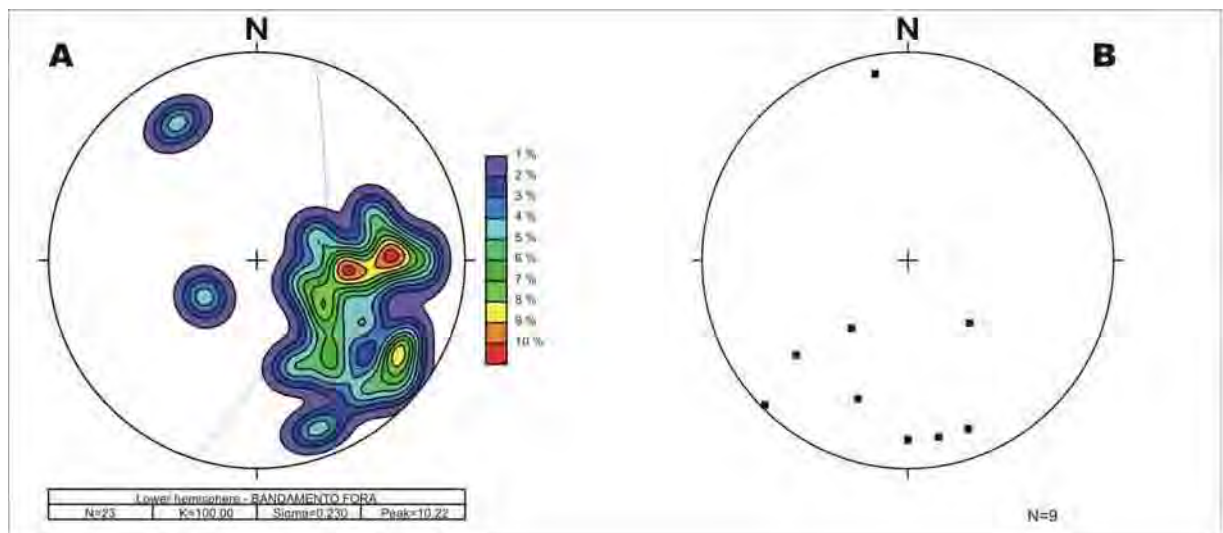


Figura 3.14

Representação esquemática na forma de estereogramas mostrando a distribuição dos polos de planos das estruturas nas áreas adjacentes à Pedreira Knawa. **A.** Estereogramas de Sn com máximos principais (268/55, 275/37). **B.** Distribuição dos pontos de Lm.

A distribuição de pontos da lineação de estiramento mineral (**Figura 3.14**) revela uma grande dispersão dos dados, mas no entanto, a grande

maioria das lineações encontra-se em baixo ângulo entre os quadrantes SW e SE.

As variações na orientação de S_n e da lineação de estiramento mineral observadas no mapa da **figura 3.13** são atribuídas a deformações da fase D_{n+1} .

FOLIAÇÃO S_{n+1}

Esta foliação ocorre de forma generalizada em toda a área, podendo-se observar que, localmente, esta inflexão da foliação S_n , corresponderia a dobras que têm S_{n+1} como foliação plano axial.

A foliação S_{n+1} corresponde à foliação principal da área, pois pôde ser observada em quase todos os afloramentos visitados, tanto nos gnaisses quanto nas supracrustais. Apresenta direções preferenciais NE/SW e mergulhos subverticais para SE, podendo ocorrer também mergulhos para NW (**Figura 3.15**).

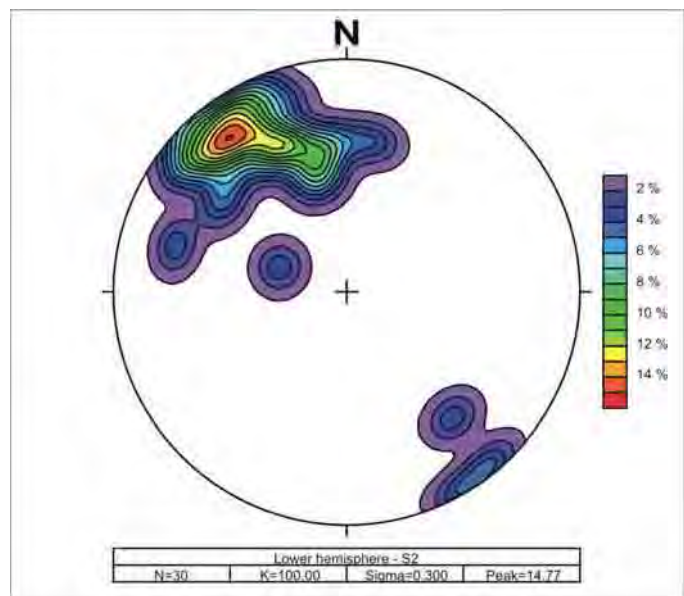


Figura 3.15

Estereograma de polos dos planos da foliação S_{n+1} das áreas adjacentes a Pedreira Knawa. Com máximo em torno de 142/70.

A foliação é marcada principalmente pelas orientações de bandas félsicas, compostas majoritariamente de quartzo e feldspato, intercalando-se com pequenas bandas máficas (biotita) recristalizadas e rotacionadas da foliação S_n . A forte migmatização impressa nestas rochas, de certa forma acompanha os planos da foliação principal,

que em alguns locais formam zonas migmatíticas que apagam completamente a foliação S_n .

Em alguns locais da área pode-se reconhecer a foliação S_n dobrada com foliação plano axial, que apresenta orientações similares às encontradas para as foliações S_{n+1} sendo por isso, interpretada como a própria foliação S_{n+1} (figura 3.16).



Figura 3.16

Detalhe da foliação S_n dobrada com foliação plano axial associada. **Foto A.** Detalhe da foliação S_n dobrada com foliação plano axial S_{n+1} associada, ponto Pk19. **Foto B.** Detalhe de dobras na foliação S_n com linha de charneira 60/10 e plano axial 130/85, ponto Pk 17.

FOLIAÇÃO S_{n+2}

A foliação S_{n+2} ocorre associadas zonas de cisalhamento restritas, com direções preferenciais NE-SW e NW-SE e mergulhos baixos a médios, ângulos que seccionam as foliações anteriores (S_{n+1} – foto 3.14).

É importante salientar que o mergulho de seus planos é difícil de ser determinado, pois a maioria dos afloramentos são cortes de pedreiras e correspondem a exposições bidimensionais. Estas estruturas são observadas na maioria dos afloramentos visitados.

3.4.1.2 – OUTRAS ESTRUTURAS OBSERVADAS NA ÁREA

As estruturas mais marcantes na área adjacente à Pedreira Knawa foram apresentadas acima, mas outras estruturas menores também foram observadas tais como: veios, juntas, diques de rocha máfica e estruturas, como dobras, lineações e veios de quartzo, que estão relacionadas à unidade supracrustal, observada ao sul da área estudada.

Os veios observados na área estão diretamente relacionados ao evento de migmatização. São mobilizados pegmatíticos de quartzo e feldspato potássico que posicionam-se na direção da foliação principal S_{n+1} e/ou obliquamente. Onde suas orientações possuem um predomínio na direção NE.

A área não apresenta grandes zonas de fraturas, mas as observadas formam subverticais com orientações preferenciais (270/75; 310/75). Pode-se verificar em uma pedreira abandonada - ponto PK10 fraturas escalonadas com orientação N-S e mergulhos de alto ângulo para este.

O dique observado na área encontra-se localizado nos pontos PK-03 e PK-06 (**figura 3.13**), e corresponde a uma rocha básica aparentemente indeformada, podendo ser um diabásio. O dique possui direção NE-SW com mergulho de alto ângulo para NW (**foto 3.15**).

As rochas que compõem a unidade supracrustal, observadas ao sul da área (ver mapa estrutural simplificado da área, **figura 3.13**) são quartzitos intercalados com xistos granatíferos. Nestas rochas encontram-se impressas uma foliação principal com direções preferenciais NE-SW com mergulhos de médio a alto ângulo para SE (**Foto 3.16**) e uma lineação mineral associada apresentando direções SSW e caimentos variando de baixo a médio ângulo.

Neste domínio, principalmente nos quartzitos, encontram-se dobras apertadas simétricas, com linha de charneira com orientação 60/10, e apresentando a foliação principal em posição plano axial (**Foto 3.17**).



Foto 3.14

Zonas de cisalhamento restritas com foliação (285/30) associada, secceccionando a foliação S_{n+1} .



Foto 3.15

Dique de rocha máfica anisotrópica, que em análise macroscópica interpreta-se como um diabásio, ponto Pk3.



Foto 3.16

Foliação principal das rochas supracrustais com orientações preferenciais (160/60), ponto Pk8.



Foto 3.17

Dobra encontrada nos quartzitos das rochas supracrustais, com orientação dos seus eixos (60/10).

3.4.2 – ANÁLISE ESTRUTURAL DA PEDREIRA

As estruturas observadas na pedreira de rochas ornamentais Knawa são, em geral, as mesmas observadas em sua área adjacente, no entanto, a caracterização detalhada permitiu reconhecer melhor o comportamento das estruturas, bem como definir com mais precisão suas superposições.

A análise estrutural deste maciço rochoso identificou um conjunto de feições geométricas representadas principalmente por foliações, e subordinadamente pode-se reconhecer também lineações, veios, rochas intrusivas, dobras, *boudins* de anfibolito e metaultramáficas, juntas tectônicas e de alívio do maciço (ver mapa geológico e estrutural, anexo I).

Além da compreensão do comportamento estrutural da pedreira, este levantamento possibilitou também estabelecer o controle estrutural das principais feições geológicas que apresentam baixo rendimento na exploração da rocha para fins ornamentais. Deste modo, a projeção destas estruturas possibilita prever recuperações para níveis não lavrados.

Abaixo apresenta-se a descrição pormenorizada destas estruturas, seguindo os mesmos critérios de superposição e ordenação temporal já apresentadas.

3.4.2.1 – FOLIAÇÕES

A análise estrutural do maciço rochoso permitiu reconhecer um conjunto de feições geométricas representadas principalmente por foliações, e subordinadamente, lineações, veios, rochas intrusivas, dobras, Boudins de rochas metamáficas e metaultrabásicas, fraturas tectônicas e de alívio do maciço (ver mapa geológico e estrutural, anexo 1).

As foliações foram divididas em três grupos distintos e separadas temporalmente de acordo com os critérios adotados para as foliações encontradas nas áreas adjacentes (S_n , S_{n+1} e S_{n+2}).

FOLIAÇÃO S_n

A foliação S_n é marcada por um bandamento gnáissico caracterizado pela ritmicidade de leitos de mobilizados quartzo-feldspáticos e de leitos de composição diorítica, ricas em biotita. Apresenta padrão fortemente anastomótico, sendo no geral uma foliação contínua em alguns trechos descontínua em outros (**foto 3.18**).

A foliação S_n possui direção preferencial NE-SW, com mergulho variando de médio a alto e caimentos tanto para NW quanto para SE. As variações de mergulhos e caimentos observados na pedreira sugerem uma foliação dobrada.

Na pedreira, a foliação S_n pode ser facilmente confundida com a foliação S_{n+1} por apresentarem direções subparalelas, e sua relação de superposição pode ser melhor compreendida nas charneiras de algumas dobras, onde a foliação S_{n+1} apresenta-se como foliação plano axial destas dobras.

No entanto, cabe salientar que o reconhecimento da foliação S_n somente é possível em alguns pontos da pedreira, tais como sua porção NW. No geral, a foliação S_n apresenta marcada por processos de deformação e migmatização impressos na rocha.

As concentrações preferenciais das direções dos pólos dos planos da foliação S_n são (172/70; 160/40) e, subordinadamente, (350/70 e 325/85), e podem ser obtidas no estereograma apresentado na **figura 3.17**. A análise mais aprofundada deste estereograma permite verificar, além da marcante

direção preferencial de seus planos, duas concentrações de dados, uma a NW e outra a SE, refletindo dobramento da foliação Sn.

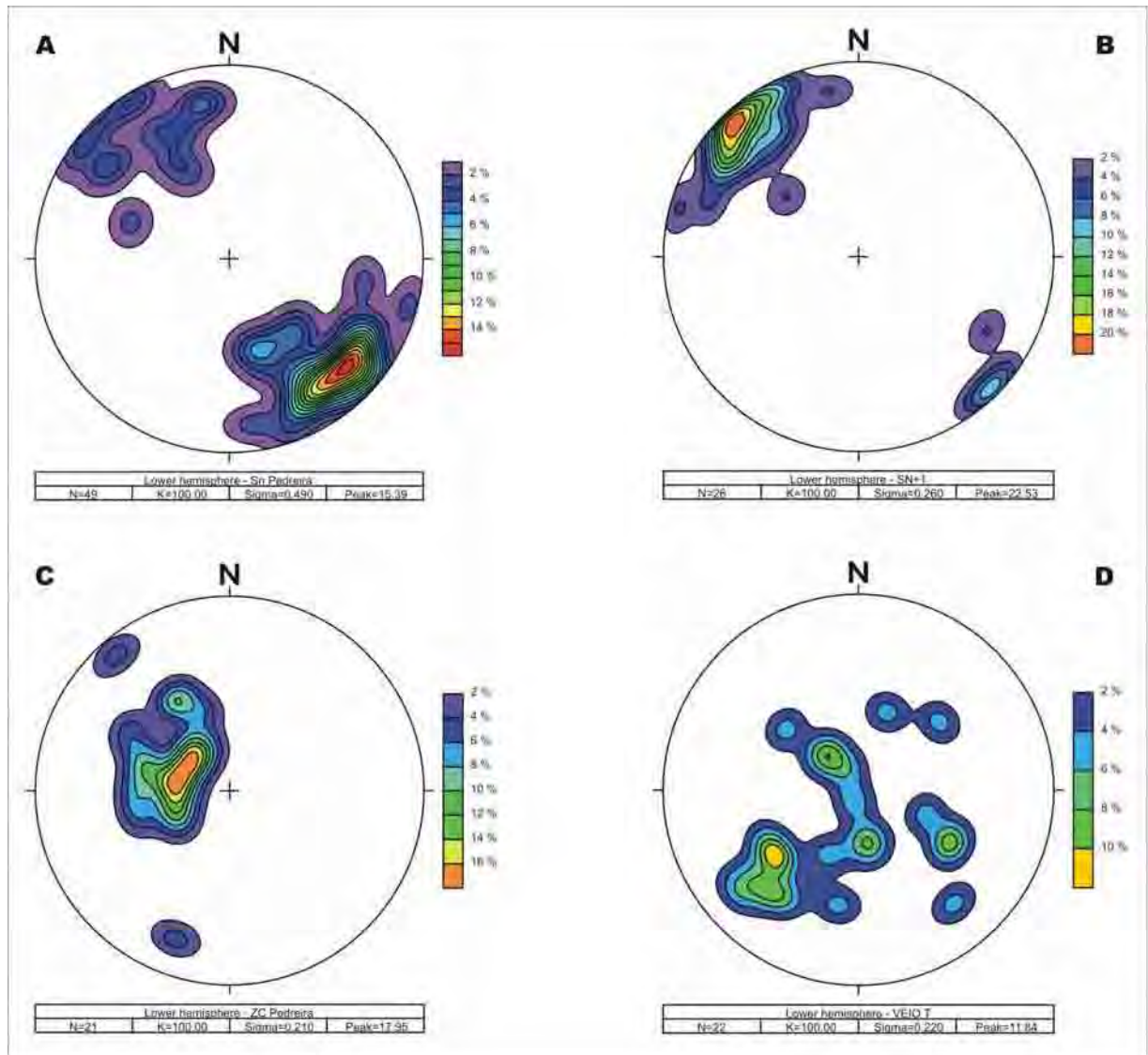


Figura 3.17

Representação esquemática na forma de estereogramas mostrando a distribuição dos polos de planos das foliações e dos veios na área da pedreira knawa. **A.** Estereograma de Sn com máximos principais 312/72 e 340/40, e variações para 170/70 e 145/70. **B.** Estereograma de Sn+1 com máximos 137/83. **C.** Estereograma de Sn+2 com máximos 137/20. **D.** Estereograma de veios pegmatíticos com máximos 52/45 e 140/20.



Foto 3.18

Foliação S_n bem marcada na porção norte da pedreira.



Foto 3.19

Foliação S_{n+1} na porção central da pedreira marcada bandas félsicas intercalando-se com bandas máficas rotacionadas para planos verticais.

FOLIAÇÃO S_{n+1}

A foliação S_{n+1} é caracterizada principalmente pelas orientações de bandas félsicas, compostas de quartzo, plagioclásio e feldspato potássico, intercalando-se com pequenas bandas máficas, ricas em biotita e raramente hornblenda, que foram rotacionadas da foliação S_n para planos mais verticais onde se encontra a foliação S_{n+1} (**foto 3.19**). Porém, em grande parte da pedreira S_n e S_{n+1} estão subparalelas, e os ângulos maiores entre estas foliações encontram-se nas charneiras das dobras D_{n+1} .

A estrutura pode se tornar difusa em alguns pontos da pedreira, dificultando ainda mais o reconhecimento das estruturas.

Esta foliação apresenta direções NE-SW bem definidas com mergulhos, em geral, de alto ângulo tanto para NW quanto para SE, mas com predominância para SE. O estereograma desta foliação apresenta máximos bem definidos na posição 316/82 (**figura 3.17**).

As bandas quartzo-feldspáticas que, em geral, são encontradas paralelas à foliação principal S_{n+1} apresentam um aspecto de mobilizados migmatíticos que penetram ou se formaram na direção da foliação S_{n+1} , como produtos de fusão parcial.

Associada à foliação S_{n+1} é observada, muito raramente em alguns pontos da pedreira, uma lineação mineral e de estiramento definida preferencialmente pela orientação de lamelas de biotita, mineral secundário produto de retrometamorfismo de hornblendas.

As direções das lineações minerais observadas foram (215/10, 220/12 e 220/10) e paralelo a esta lineação nota-se um alinhamento de *Boudins* de anfibolito sugerindo estiramento na mesma direção da lineação mineral (**foto 3. 20**). Estas lineações são definidas pelo alinhamento da biotita nos planos de S_{n+1} , e apresentam direções NE-SW com suaves mergulhos para SW.

O evento deformacional D_{n+1} que gerou a foliação S_{n+1} está sendo considerado neste trabalho como o responsável pela deformação e obliteração das estruturas anteriores, e foi contemporâneo à forte migmatização impressas nestas rochas.

Os processos de migmatização observados na área da pedreira podem ser discutidos somente com base nas evidências de campo, e não foi possível estabelecer um critério mais correto de uma caracterização, tais como balanço de massa.

Porém, cabe salientar que as feições observadas na pedreira permitem sugerir dois processos de migmatização da rocha, um por fusão parcial e o outro por anatexia. As fusões parciais podem ser verificadas nos necks do *boudins* e nos veios de tensão, e ocorrem quando o material fundido migra para estas zonas de baixa pressão.

O granito observado na pedreira e mapeado no anexo 1 (cor laranja), pode ser interpretado como sendo um grande leucossoma, produto de anatexia do biotita gnaiss migmatítico. E que geralmente formam manchas na rocha apagando os elementos de trama mais antigos.

FOLIAÇÃO S_{n+2}

A foliação S_{n+2} é representada por zonas de cisalhamento estreitas e espaçadas com direções preferenciais NE-SW de baixo a médio ângulo, podendo ocorrer muito raramente zonas de cisalhamento de alto ângulo. Estas zonas de cisalhamento deformam as foliações anteriores (S_n , S_{n+1}) e podem apresentar, em alguns locais, mobilizados quartzo-feldspáticos em seus planos, formando pequenos veios pegmatíticos de coloração branca que são diferentes dos veios pegmatíticos avermelhados ($S_{in-D_{n+1}}$) encontrados na área (**foto 3.21**).



Foto 3.20

Alinhamento de Boudins de anfibolito com maior estirramento na direção N50E paralelo as direções das foliações S_{n+1} e S_n .



Foto 3.21

Foliação S_{n+2} formada por zonas de cisalhamento restritas, que eventualmente apresentam veios associados.

Esta foliação possui concentrações de atitudes com máximo (293/20) como revela a **figura 3.17**.

O aspecto movimentado da rocha está diretamente relacionado a superposição de foliações observada na área, sendo este fator preponderante para a qualidade ornamental desta rocha.

3.4.2.2 – DOBRAS

Foram poucas as dobras observadas na área da pedreira, no entanto, pode-se destacar um padrão de dobramento que está sendo interpretado neste trabalho como pertencente ao evento de deformação D_{n+1} .

DOBRAS D_{n+1}

São dobras assimétricas em “S” olhando para NE, que deformam a foliação S_n , encontram-se fortemente obliteradas apresentando eixos de direção NE-SW e inclinações subhorizontais com suaves mergulhos para SW (**figura 3.18**), onde sua envoltória apresenta direções NE-SW e mergulhos íngremes para NW.

Uma característica importante destas dobras é apresentar a foliação principal na posição plano axial, e esta relação pode ser vista na porção norte da pedreira no seu paredão principal. Na mesma direção desta foliação, é comum encontrar camadas de anfibolito boudinados subparalelas a camadas dobradas.

É importante ressaltar que a única conclusão direta que se pode tirar da mera presença de *boudins* dobrados em terreno gnáissico de alto grau é que uma fase de deformação é posterior às tramas afetadas (Passchier et al. 1993). Sendo assim, os boudins, ao menos em parte, devem ter se formado na fase D_n .

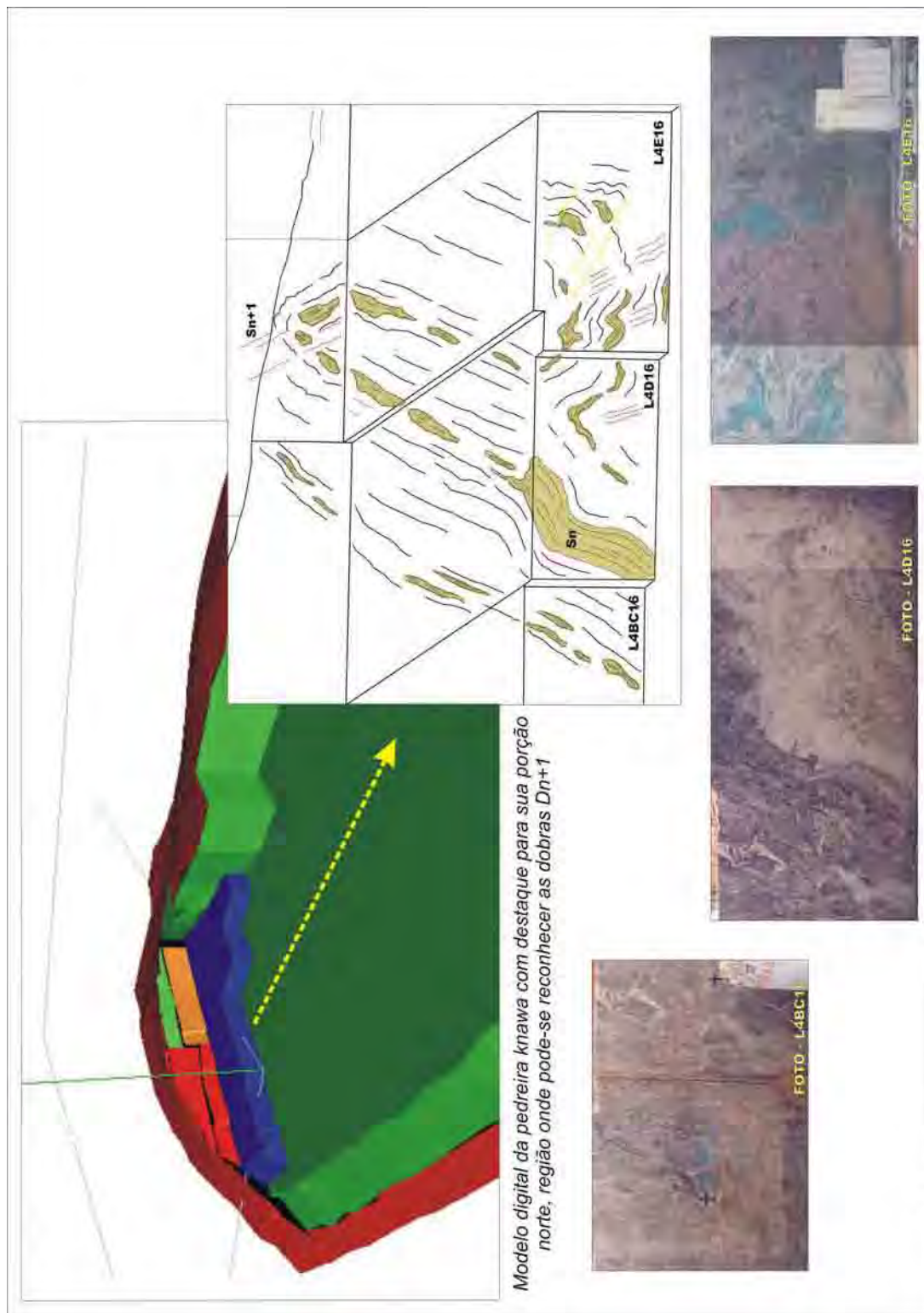


Figura 3.18

Perfil esquemático da região norte da pedraira como mostra o MDT, com destaque para as dobras $Dn+1$.

Pode-se observar na área algumas pequenas inflexões das foliações que possivelmente podem ser confundidas com dobras D_{n+1} , mas que no entanto representa um padrão de interferência destas foliações com zonas de cisalhamento de baixo ângulo D_{n+2} .

3.4.2.3 – VEIOS PEGMATÍTICOS

Os veios pegmatíticos observados na pedreira possuem espessuras centimétricas e comprimento variável de centimétrico a métrico, apresentando-se ora discordantes da foliação principal S_{n+1} e ora concordantes (**Figura 3.17**). Pode-se observar em alguns pontos da pedreira alguns veios discordantes passando a concordar com a foliação principal (ver mapa geológico estrutural, anexo I), sugerindo que a formação destes veios ocorreu concomitantemente com a foliação S_{n+1} . Outra evidência que indica a contemporaneidade com S_{n+1} é a ocorrência de veios dobrados, com plano axial paralelo a S_{n+1} (**foto 2.22**).

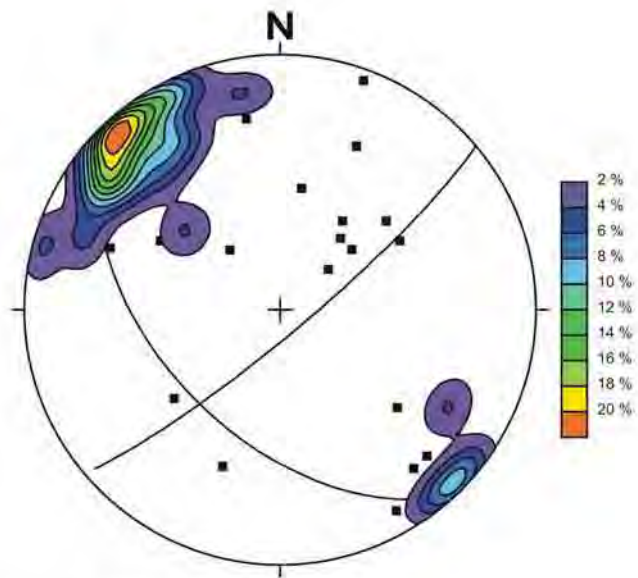


Figura 3.19

Estes veios apresentam direções preferenciais NW-SE

Estereograma de contagem dos planos de foliação S_{n+1} com relação aos veios pegmatíticos (pontos pretos).

com mergulhos de médio ângulo para SW, apresentando estereograma com relação destes veios com a foliação principal S_{n+1} (**figura 3.19**).



Foto 3.22

Veio pegmatítico dobrados pela deformação progressiva D_{n+1} .



Foto 3.23

Fraturas de alívio na paredão norte da pedreira, evidenciando seu paralelismo com a topografia.

Estes veios são mobilizados pegmatíticos que estão diretamente relacionados ao evento de migmatização impressos na pedreira e na área como um todo.

Segundo Oliveira (1999), a estrutura que gerou a foliação de alto ângulo observada na área é descrita neste trabalho como sendo a foliação S_{n+1} , tratando-se de uma zona de cisalhamento dextral. Sendo assim, a relação geométrica dos veios pegmatíticos com esta foliação pode ser entendida como foliação de alto ângulo em zona de cisalhamento com os pegmatitos na posição dos veios de extensão.

3.4.2.4 – FRATURAS

As fraturas observadas na região da pedreira foram poucas e podem ser agrupadas em três famílias principais: fratura preenchida com mobilizado pegmatítico, fraturas tectônicas e fraturas de alívio do maciço.

A fratura preenchida por mobilizado pegmatítico pode ser observada na porção sudeste da pedreira (ver mapa geológico, **anexo 1** e **figura 3.20**), possui uma orientação NW-SE com mergulho de médio ângulo para NE.

Estas fraturas foram preenchidas por mobilizados pegmatíticos que provavelmente corresponderia à fase final de percolação destes fluidos pegmatíticos.

São poucas as fraturas tectônicas observadas na área da pedreira e as observadas possuem orientações NW-SE com mergulhos de alto ângulo para NE (**figura 3.20**).

As fraturas mais comuns na pedreira são as neoformadas, mais conhecidas como fraturas de alívio, que ocorrem de forma paralela a encosta do maciço. Segundo Vega (1999) este fato ocorre por que a tensão principal σ_1 encontra-se paralela à encosta do maciço e sua tensão σ_3 perpendicular (**Foto 3.23**).

Nota-se que a orientação destas fraturas variam de acordo com topografia do maciço, desta forma pode ocorrer fraturas de alívio com orientação NE-SW apresentando caimentos suaves tanto para NW quanto para NE.

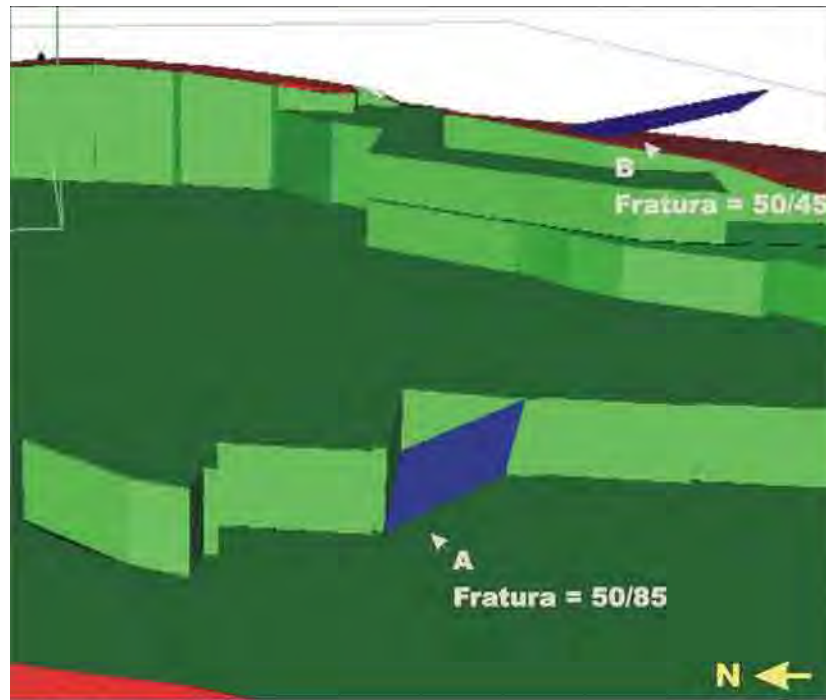


Figura 3.20

Modelo digital de terreno da Pedreira Knawa com destaque para a orientação espacial das fraturas tectônicas. **A.** Fratura sem preenchimento de mobilizado pegmatítico com orientação (50/85). **B.** Fratura com mobilizado pegmatítico com orientação (50/45).

3.4.3 - SUGESTÕES PARA A EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DA PEDREIRA E DA REGIÃO DE SEU ENTORNO

Os dados levantados na pedreira revelam algumas informações importantes sobre os processos geológicos que afetaram esta área.

Sendo assim, a partir da análise das feições estruturais e geológicas observadas principalmente na área da pedreira e em seu entorno, permitiu elaborar uma breve discussão sobre a evolução geológica e estrutural que considera três eventos deformacionais principais impressos nos gnaisses (D_n , D_{n+1} e D_{n+2}), mais a deposição e estruturação das rochas supracrustais e a intrusão de diques de rochas básicas na área.

O primeiro evento observado (D_n) pode ser reconhecido através de sua principal estrutura correlata, a foliação S_n , e os *boudins* de anfibolitos e metaultrabásicas, onde ambas estruturas encontram-se parcialmente apagadas e deformadas pelos eventos posteriores prejudicando o reconhecimento de sua cinemática e de sua própria continuidade lateral.

O segundo e principal evento observado nestas rochas (D_{n+1}) é bem caracterizado tanto nas rochas que compõem a região da pedreira quanto no seu entorno, e suas estruturas principais são: foliação S_{n+1} , dobras assimétricas, veios pegmatíticos e intrusões associadas.

Este evento pode ser aparentemente entendido por uma transpressão na direção NW-SE responsável pela formação de dobras não coaxiais na foliação S_n , e geração da foliação S_{n+1} e estiramentos nesta mesma direção da foliação S_{n+1} , comprovados pelos *boudins* de anfibolitos de direção NE-SW observados na área.

A grande maioria dos veios pegmatíticos encontra-se na direção perpendicular a foliação S_{n+1} , mas, no entanto alguns destes veios

encontram-se dobrados e convergindo para posições paralelas a esta foliação.

Cabe salientar que em escala regional as foliações interpretadas neste trabalho como sendo de eventos distintos podem ser entendidas também como sendo produtos de um mesmo evento tectônico progressivo, onde a foliações S_n comportaria como produto primário da deformação enquanto a foliação S_{n+1} seria o produto tardio deste evento, e as dobras D_{n+1} poderiam ser entendidas como sendo de um mesmo evento tectônico que gerou tanto as Foliações S_n , S_{n+1} e as dobras. Mas, no entanto, optou-se por tratar de eventos diferentes por que a área alvo do trabalho não teria dados suficientes para confirmar esta relação.

Esta estruturação sugere uma situação típica de zonas de cisalhamento dúctil, onde os veios pegmatíticos se apresentam na posição de fraturas do tipo "T" e os boudins apresentam-se estirados na direção N50E paralelos à foliação S_{n+1} e à lineação de estiramento mineral que apresentam suaves mergulhos para SW. Esta geometria sugere uma extensão na direção da foliação principal (S_{n+1}).

Varias fases de migmatização estão impressas nestas rochas, uma vez que temos a presença de mais de um tipo de leucossoma, mas no entanto, os leucossomas róseos e mobilizados graníticos/pegmatíticos em *necks* de *boudins* e veios cinematicamente coerentes com a deformação D_{n+1} . A migmatização destas fase é essencialmente por anatexia.

Produto da fusão parcial na pedreira ocorrem nos necks do boudins e nos veios de extensão descritos acima, devido a migração do material fundido para estas zonas de baixa pressão.

O granito observado na área da pedreira parece ter se formado por fusão parcial, ou seja, ocorrendo dentro do próprio complexo de gnaisses, onde a parte fundida de composição granítica segrega formando lentes ou veios.

No entanto, nas zonas migmatíticas e os veios pegmatíticos apresentam-se minerais aparentemente distintos dos minerais encontrados no paleossoma da rocha (bandas dioríticas) sugerindo contribuições externas e/ou metassomatismo.

O terceiro evento (D_{n+2}) é atribuído às zonas de cisalhamento restritas observadas tanto na área de pedreira quanto no seu entorno que apresentam direções preferências NE-SW com suaves mergulhos para SE, seccionando as foliações S_n e S_{n+1} .

A grande maioria destas zonas de cisalhamento são de baixo ângulo e apresenta direções preferenciais NE-SW e NW-SE com mergulhos tanto para NW quanto para SE.

O reconhecimento geológico do entorno da pedreira permitiu identificar algumas feições importantes quanto à evolução geológica desta área. Pode-se destacar duas feições geológicas de extrema importância para a compreensão da evolução crustal desta área: as rochas da unidade supracrustal e os diques de rochas básicas (neoarqueanas e paleoproterozóicas respectivamente), ambas relatadas na literatura como sendo posteriores aos gnaisses do Complexo Campo Belo (paleoarqueanos).

CAPÍTULO 4

ESTUDOS DE OTIMIZAÇÃO DA LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS “KNAWA”

As rochas ornamentais apresentam critérios de avaliação de jazidas bem distintas dos outros bens minerais, sendo a integridade da rocha um dos fatores condicionantes.

Os critérios que controlam a qualidade dos depósitos de rochas ornamentais são divididos por Luodes (1992) em fatores geológicos e fatores não geológicos, como apresentado no capítulo II deste trabalho.

No entanto, a grande maioria dos depósitos brasileiros de rochas ornamentais não apresenta estes critérios bem definidos e muito menos possuem uma avaliação sistemática de suas reservas.

Sendo assim o presente capítulo propõe uma seqüência de trabalhos que visa otimizar a extração e melhor reconhecer as características da jazida de rochas ornamentais Knawa e testar a técnica GPR no reconhecimento dos defeitos ornamentais da rocha.

Visando sistematizar os trabalhos de avaliação e otimização de lavra buscou-se identificar: (1) os fatores geológicos que prejudicam o rendimento da jazida, como aparência da rocha, as estruturas que quebram sua homogeneidade (fraturas, veios, rochas de composições diferentes etc.), composição química dos minerais; (2) os fatores não geológicos que refletem essencialmente a beleza da rocha (Fashion), parâmetros pouco mensuráveis, e que podem ser reconhecidos nesta jazida através de mapas de recuperação comercial da rocha.

4.1 – MODELAMENTO GEOLÓGICO

O objetivo do modelamento geológico 3D da Pedreira Knawa é possibilitar uma melhor visualização de todos os dados geológicos, visando facilitar o reconhecimento do padrão estrutural do maciço e ajudar a prever o comportamento dos principais defeitos ornamentais da rocha, bem como ajudar a empresa no planejamento e otimização de sua lavra.

Este modelamento se deu de duas formas: através da construção de uma maquete física da pedreira e de um modelo digital da área.

A construção do modelo físico 3D da pedreira se deu inicialmente com o mapa topográfico da área que forneceu todas as informações necessárias para sua confecção, tais como: escala, curvas de nível, cortes de frentes de lavra.

A partir do mapa topográfico da pedreira de escala (1:200) foi estabelecida uma cota mínima para definir o limite inferior horizontal do maciço a ser criado. Foi então adotada a cota 968m, que coincide com o limite inferior do nível 5 da pedreira. A partir deste nível base, criam-se moldes de papel de um em um metro até o topo do maciço rochoso. Sobre estes moldes cortam-se placas de EVA que foram posteriormente empilhadas e coladas uma sobre a outra, definindo o modelo 3D físico da pedreira.

Com o modelo pronto imprimi-se o mapa geológico da pedreira e suas frentes de lavra (Auto Cad) em escala similar à da maquete, onde, ao colar ambos na maquete compõe-se o modelo geológico 3D físico da pedreira (**figura 4.1**).

A construção do modelo digital é mais complexa e necessita de um *software* de modelagem de jazida, como: Datamine, Gencom e Vulcan. A etapa inicial da construção deste modelo geológico digital se dá com a digitalização do mapa topográfico em AutoCad com coordenadas e cotas reais do maciço. A partir deste mapa gera-se contorno e/ou *Strings* das frentes de lavra, curvas de nível que são exportados para software

Datamine, gerando posteriormente a superfície digital da pedreira (figura 4.2).



Figura 4.1

Maquete da pedreira em escala 1:200 com seu mapa geológico compondo o modelo geológico 3D da pedreira Knawa.

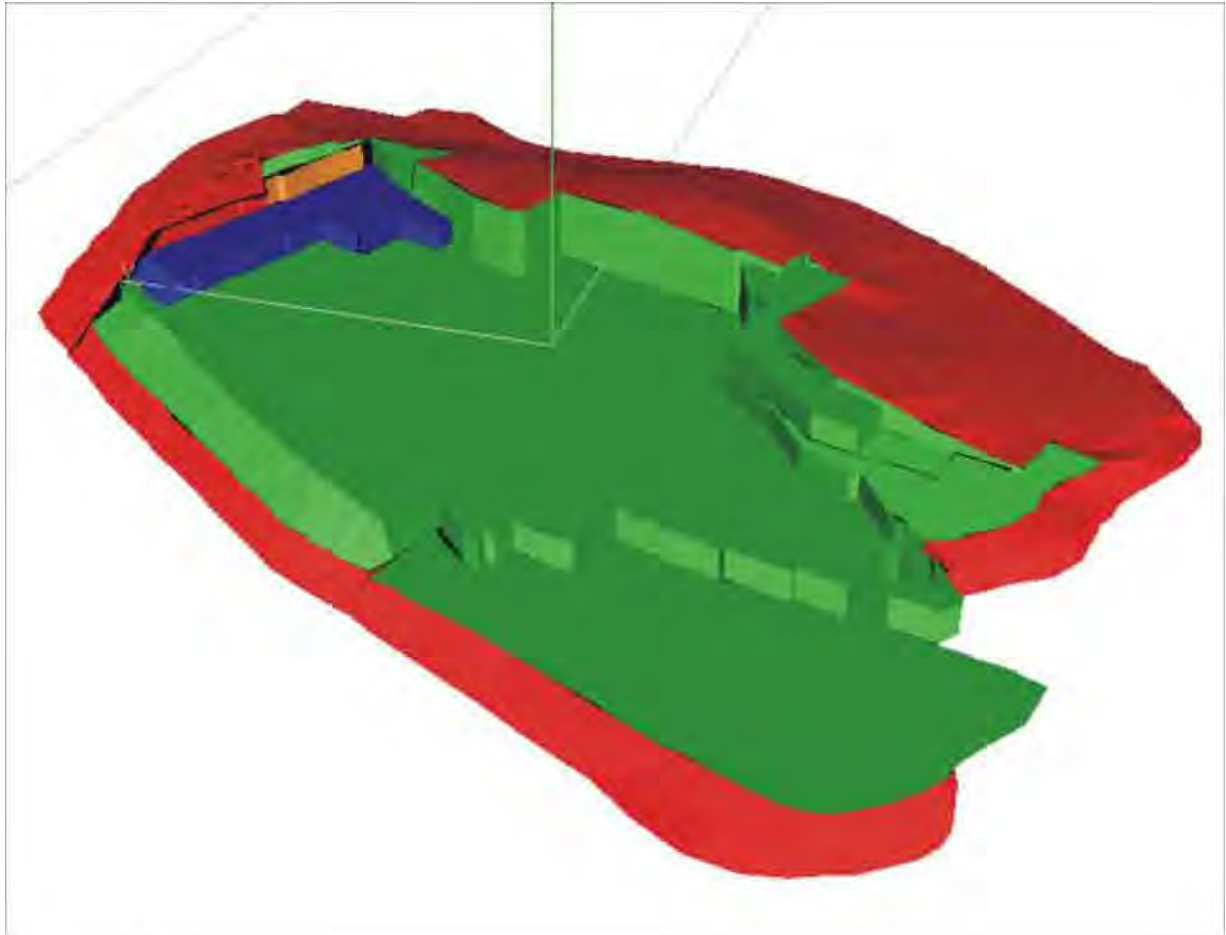


Figura 4.2

Modelo topográfico digital da pedreira Knawa.

O modelo geológico digital foi construído a partir dos contornos simplificados do mapa geológico, onde se optou por apresentar somente as variações petrográficas maiores, veios e fraturas, uma vez que estes representam os principais defeitos ornamentais da pedreira knawa. Estes contornos foram exportados como string do AutoCad para dentro do

Datamine. A modelagem destas variações petrográficas maiores, bem como dos veios e das fraturas, se deu a partir da projeção espacial destas estruturas em profundidade seguindo o controle estrutural apresentado no mapa geológico estrutural (anexo 1), propiciando assim a formação de sólidos, gerando o modelo geológico estrutural simplificado da Pedreira Knawa (**figura 4.3**).

A crescente necessidade de compreensão dos comportamentos espaciais dos corpos e parâmetros geológicos tem levado os profissionais a buscar explicações em modelos tridimensionais, onde se tem a integração entre dados de superfície e de subsuperfície.

A grande vantagem de se trabalhar com modelos tridimensionais está na facilidade de poder observar as estruturas e seus comportamentos, e com isto utilizá-los no planejamento da lavra.

Os modelos digitais associados a softwares aplicados para a mineração apresentam grandes vantagens sobre os modelos físicos, pois permitem ações como checagem de dados que ajudam o geólogo e o engenheiro de minas a alcançar um melhor entendimento do depósito, além de subsidiar as atividades de lavra, como por exemplo cubagem dos defeitos ornamentais da rocha e até mesmo de seu aproveitamento. Estes dados são de grande importância para a empresa pois permitem estimar aproximadamente a relação de estéril/minério que será extraída de cada nível.

No caso da Pedreira Knawa o modelo físico, no momento terá mais utilidade para a empresa, uma vez que a mesma não trabalha com estes softwares de modelamento digital.

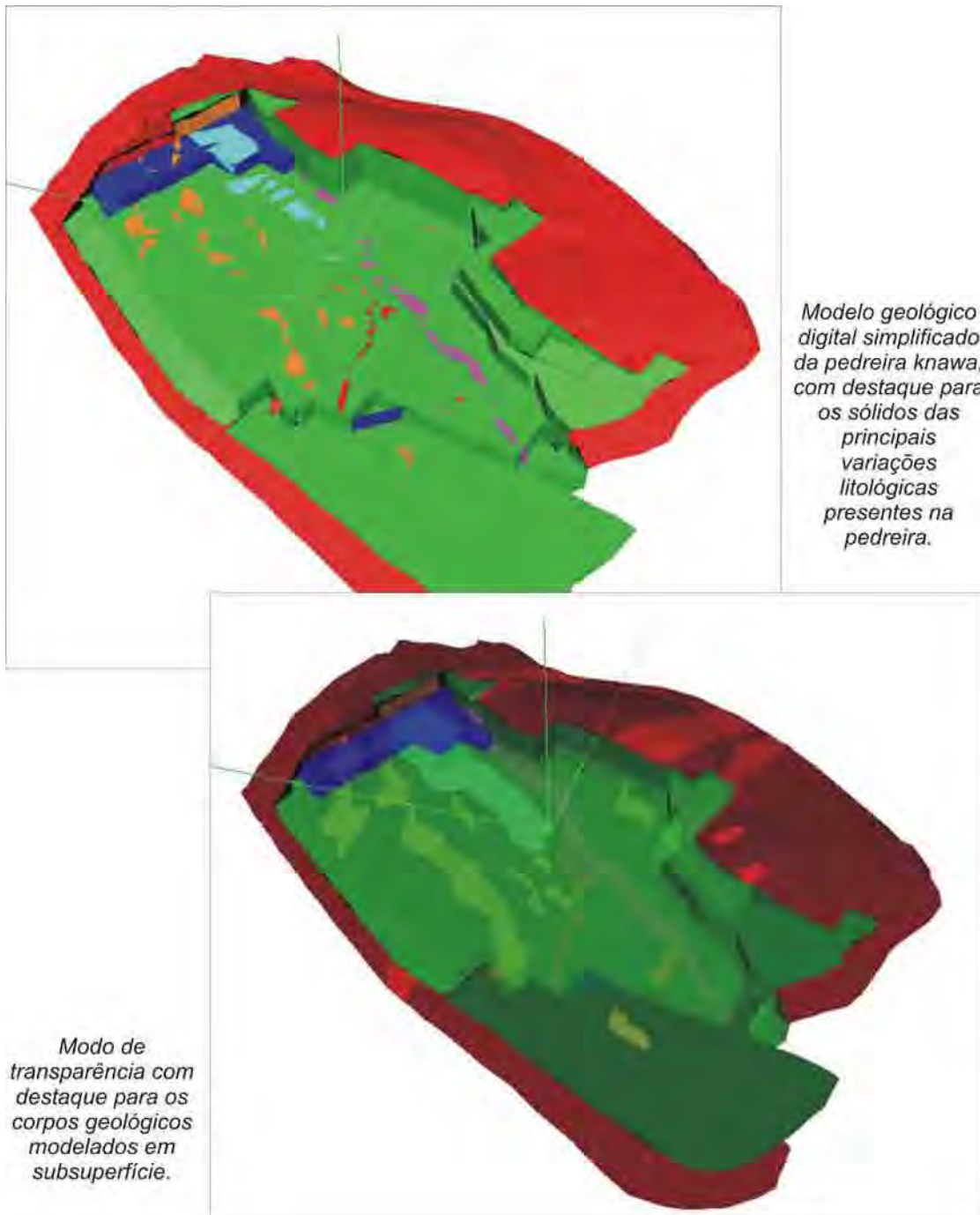


Figura 4.3

Modelo geológico digital da pedreira knawa, revelando o comportamento dos corpos geológicos em subsuperfície. **A.** Modelo geológico digital da pedreira knawa representando as variações geológicas maiores: laranja-Bandas dioríticas, azul-porção rica em enclaves anfibolíticos, rosa-granito, vermelho-veios pegmatíticos. **B.** Visualização dos corpos geológicos em subsuperfície.

4.2 – ESTUDOS PARA UM MELHOR APROVEITAMENTO DA ROCHA ORNAMENTAL DA PEDREIRA KNAWA

Como apresentado anteriormente, os defeitos ornamentais da rocha podem ser qualquer estrutura que quebre sua homogeneidade. Desta forma, o mapeamento geológico de detalhe, além da identificação de variações petrográficas dentro do biotita gnaisse migmatítico, propiciou a caracterização de fraturas, veios, enclaves anfibolíticos e intrusões graníticas, que são considerados defeitos ornamentais da rocha (**figura 4.4**)

Na tentativa de entender melhor o comportamento da jazida, alguns dados de recuperação comercial da rocha foram levantados junto à empresa. Representam a recuperação comercial de cada bancada distribuída na pedreira.

MAPA DE RECUPERAÇÃO COMERCIAL DA ROCHA

Este mapa foi elaborado a partir dos dados de recuperação comercial das bancadas do nível quatro da pedreira, onde seus contornos representam aproximadamente áreas de mesma recuperação comercial.

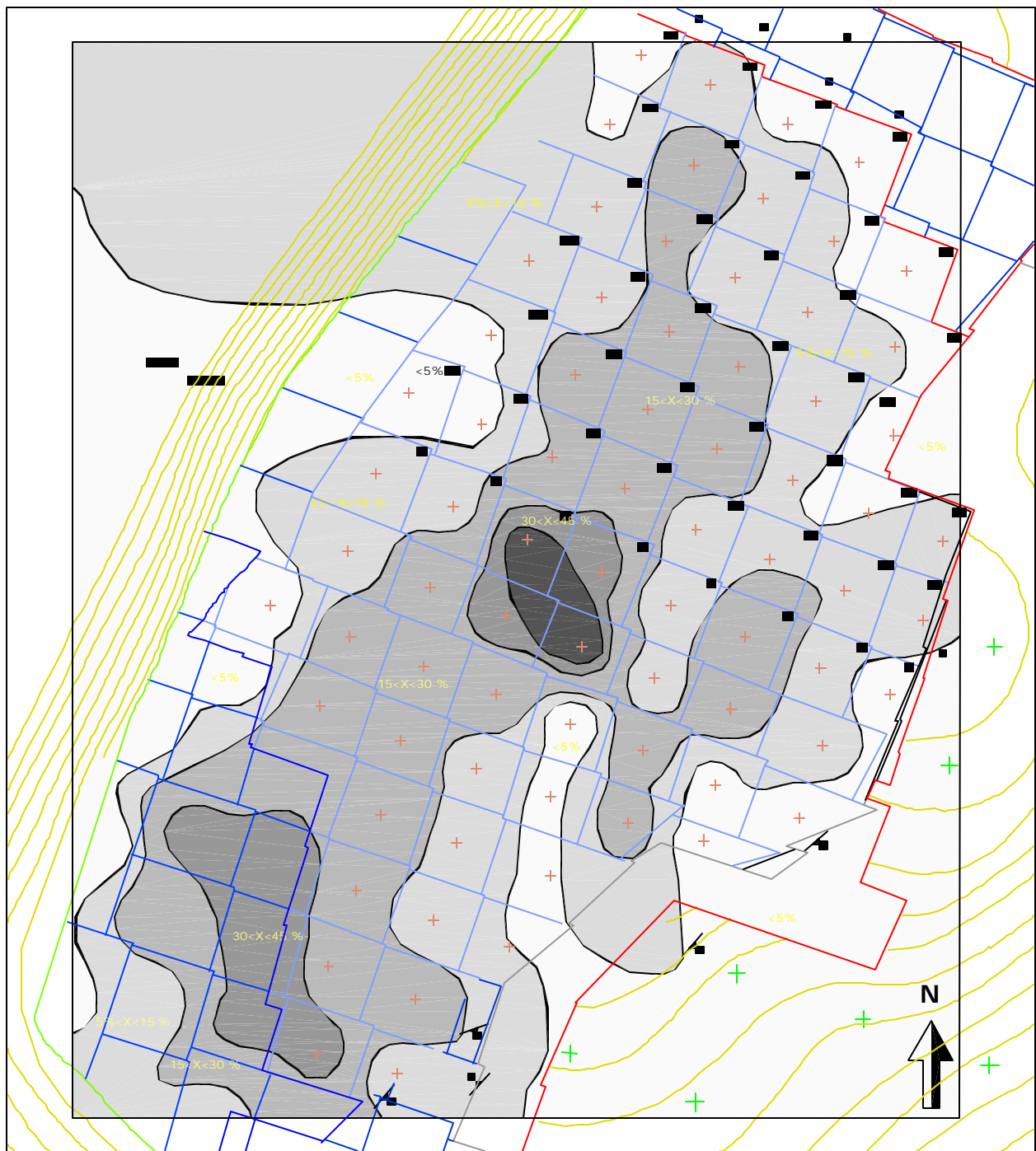
Para facilitar a visualização destes dados foram estabelecidos alguns intervalos de recuperação: menor que 5%, 5%-15%, 15%-30%, 30%-45% e intervalo maior que 45%.

A distribuição destes contornos na pedreira revelou um alinhamento preferencial NE-SW na mesma direção das principais estruturas da rocha, apresentando recuperações maiores no seu centro e menores na borda como mostra a **figura 4.5**.



Figura 4.4

Principais defeitos ornamentais da rocha na pedreira knawa. **A.** Veios pegmatítico na porção central da pedreira. **B.** Zonas migmatíticas na frente de lavra do nível cinco. **C.** Granito na parede da pedreira em sua porção central. **D.** Região de enclaves anfibolíticos na porção nordeste da pedreira. **E.** Bandas dioríticas na região noroeste da pedreira.



9m
ESCALA

LEGENDA GERAL

	Curvas de Nivel		Contorno de recuperação 15-30 %
	Frente de Lavra do nível 5		Contorno de recuperação 30-45 %
	Frente de Lavra do nível 4		Contorno de recuperação >45 %
	Bancadas		Contorno de recuperação 0-5%
	Contorno de recuperação 5-15 %		Coordenada UTM

Figura 4.5

Mapa de contorno de aproveitamento comercial da rocha na pedreira knawa.

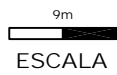
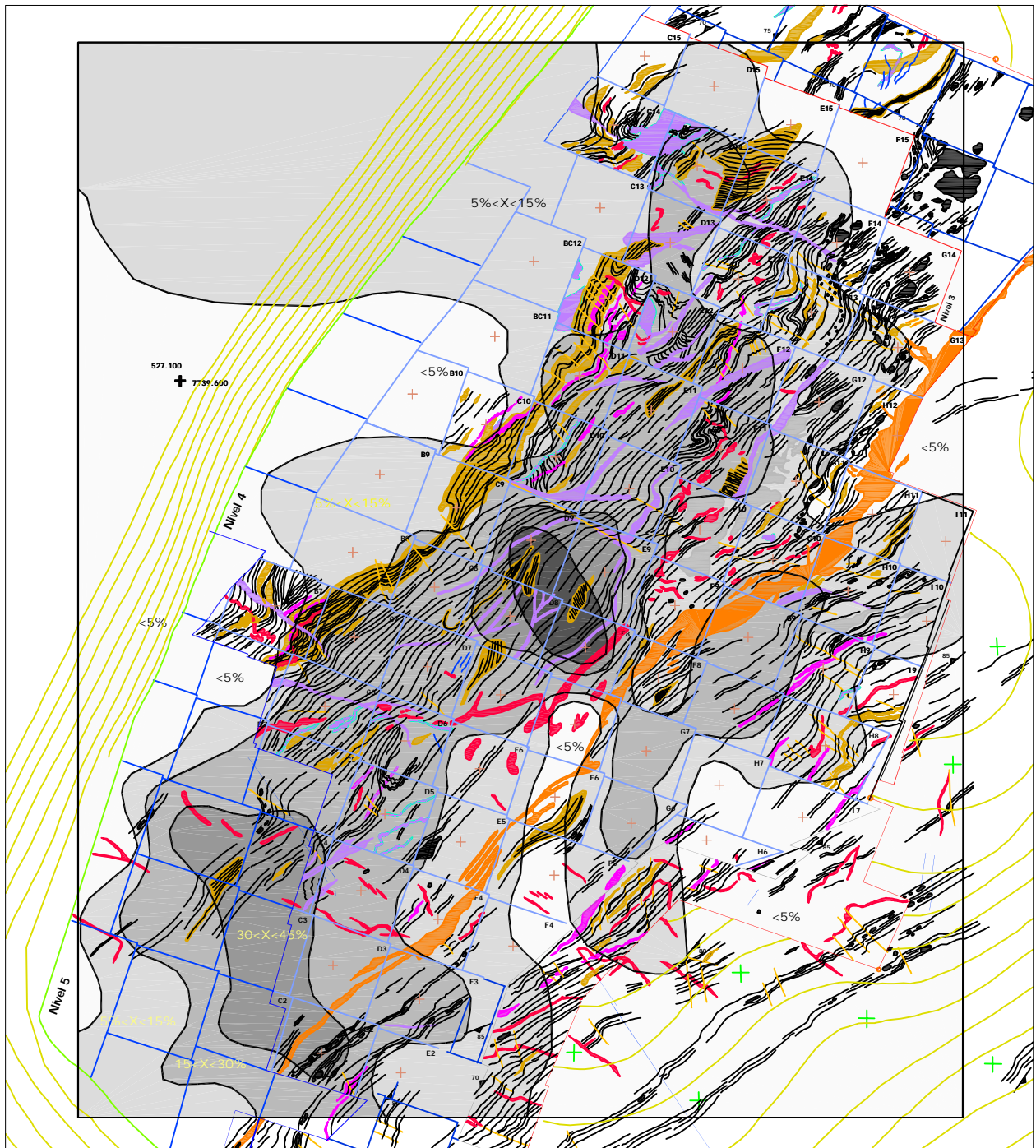
As porções da pedreira que apresentam baixas recuperações estão normalmente associadas à presença de grandes variações litológicas dentro do biotita gnaiss migmatítico, tais como: bandas dioríticas, porções ricas em enclaves de anfibolito e metaultramáficas intrusões graníticas (**figura 4.6**). Estas porções estão sendo consideradas como grandes regiões de defeitos ornamentais da rocha.

MAPA DE APROVEITAMENTO DA ROCHA

Como apresentado anteriormente, nota-se uma estreita relação da baixa recuperação da rocha com as regiões de maiores defeitos ornamentais. Sendo assim, o presente trabalho propõe um mapa de aproveitamento da rocha para o nível cinco utilizando tanto o mapeamento geológico quanto o mapa de recuperação comercial da rocha para gerar contornos de aproveitamento da rocha.

Os contornos de aproveitamento da pedreira foram traçados levando em consideração os contornos de recuperação comercial menores que 15% e os defeitos ornamentais da rocha evidenciados no mapa geológico. Este contorno representa a melhor relação entre a baixa recuperação a as principais regiões de defeitos ornamentais da rocha, desta forma o mapa de aproveitamento da rocha apresenta dois níveis principais de recuperação, um com baixa recuperação (<15%), e outro com recuperações médias maiores que 15%, como pode-se observar na **figura 4.7**.

Esta classificação do maciço rochoso permite a empresa visualizar bem as regiões de maiores e menores recuperações da rocha, possibilitando assim uma melhor programação de sua lavra.



LEGENDA PETROGRÁFICA

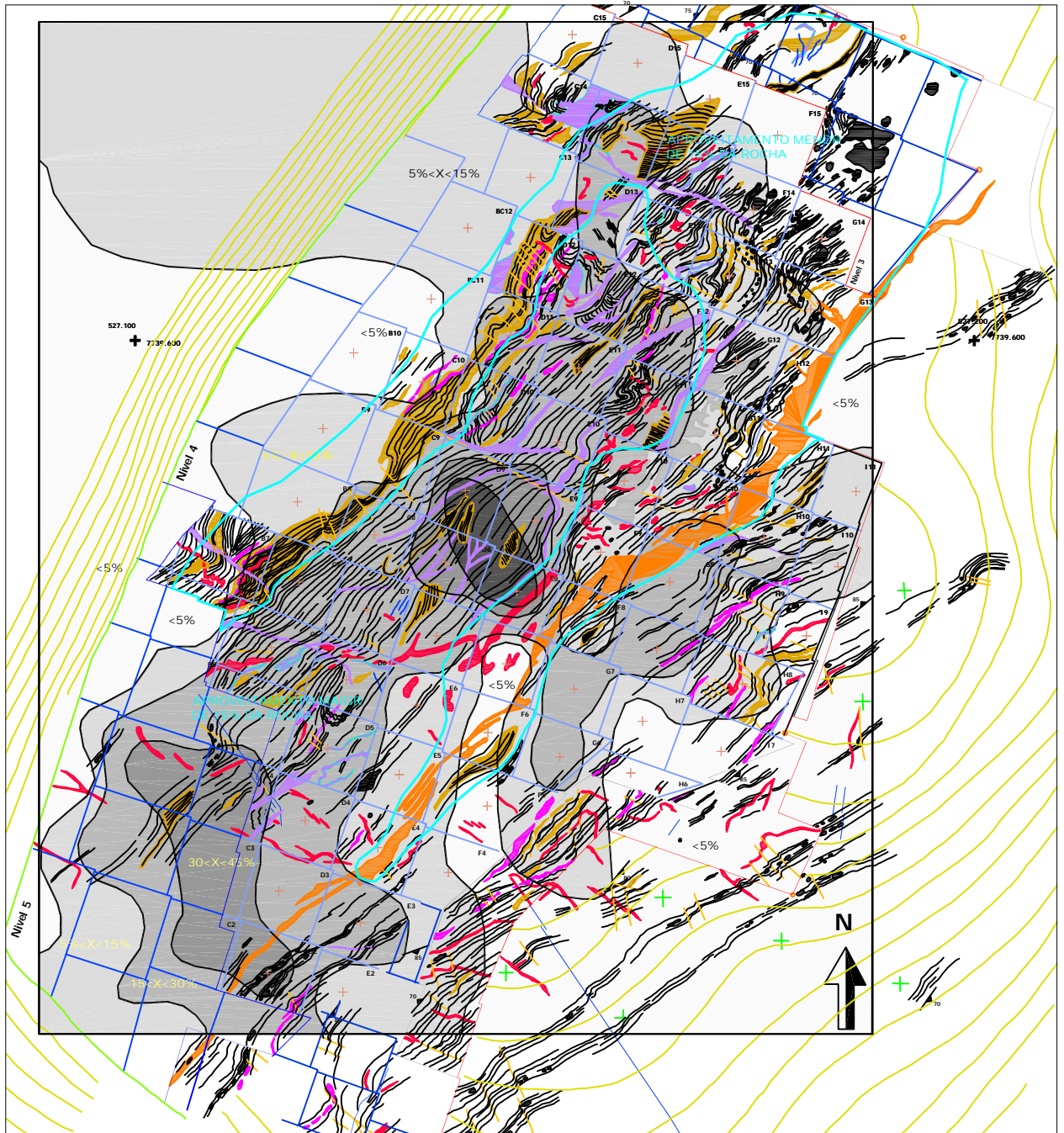
	Biotita Gnaissé bandado migmatítico		Veios Pegmatíticos
	Bandas dioríticas		Veios quartzo-feldspático migmatíticos
	Anfibolito 1		Leitos graníticos
	Anfibolito 3		Anfibolito 2

LEGENDA GERAL

	Curvas de Nível		Contorno de recuperação 15-30%
	Frente de Lavra do nível 5		Contorno de recuperação 30-45%
	Frente de Lavra do nível 4		Contorno de recuperação >45%
	Bancadas		Contorno de recuperação 0-5%
	Contorno de recuperação 5-15%		Coordenada UTM

Figura 4.6

Mapa de contorno de aproveitamento comercial da rocha sobre o mapa geológico da pedreira knawa.



9m
ESCALA

LEGENDA PETROGRÁFICA

	Biotita Gnaiss bandado migmatítico		Veios Pegmatíticos
	Bandas dioríticas		Veios quartzo-feldspático migmatíticos
	Anfibolito 1		Leitos graníticos
	Anfibolito 3		Anfibolito 3

LEGENDA GERAL

	Curvas de Nivel		Contorno de recuperação 15-30%
	Frente de Lavra do nível 5		Contorno de recuperação 30-45%
	Frente de Lavra do nível 4		Contorno de recuperação >45%
	Bancadas		Contorno de aproveitamento da rocha para índices menores que 15%.
	Contorno de recuperação 0-5%		Coordenada UTM
	Contorno de recuperação 5-15%		

Figura 4.7

Mapa de contorno de aproveitamento da rocha para o nível cinco da pedra knawa. Com destaque para as variações petrográficas e sua distribuição conforme a baixa recuperação comercial da rocha.

MODELAMENTO 3D DO APROVEITAMENTO DA ROCHA

Visando apresentar um resultado mais concreto do volume de rocha com aproveitamento inferior e superior a quinze por cento, utilizou-se de técnicas e software de cubagem de jazidas na modelagem destes contornos de aproveitamento.

A projeção estrutural dos defeitos da rocha (**figura 4.6**) possibilitou a modelagem do contorno de aproveitamento da rocha para recuperações inferiores a quinze por cento para o nível cinco da pedreira (**figura 4.8**).

A modelagem digital da pedreira permitiu calcular os volumes: dos defeitos ornamentais da rocha, dos modelos de aproveitamento da rocha para níveis inferiores e superiores a quinze por cento de recuperação da rocha e sua relação com o volume total de rocha contida no nível cinco da pedreira (**Tabela 4.1**).

Estes dados revelaram que sessenta por cento das reservas deste nível apresentam aproveitamento acima de quinze por cento e o restante (40%) recuperações abaixo deste valor. Destes quarenta por cento vinte e cinco são defeitos ornamentais da rocha, conforme apresentado no modelo geológico e o restante trata-se de um efeito de borda destes defeitos com a área de melhor aproveitamento.

Os defeitos ornamentais de maior relevância para este nível da Pedreira Knawa são as bandas dioríticas (10.82%), a região rica em enclaves de anfibolito e metaultramáficas (7.35%), granito (6.46%) e os veios (1.08%).

Como citada acima a região de defeitos ornamentais da rocha do nível cinco representam vinte e cinco por cento do volume total de rocha deste nível.

MODELO GEOLÓGICO			
VOLUME DOS DEFEITOS DA ROCHA X VOLUME TOTAL DE ROCHA DO NÍVEL CINCO		VOLUMES m ³	PERCENTUAL
DEFEITOS ORNAMENTAIS DA ROCHA	GRANITO	2181.02	6.46%
	BANDAS DIORÍTICAS	3650.04	10.82%
	REGIÃO DE ENCLAVES DE ROCHAS BÁSICAS	2480.77	7.35%
	VEIOS	365.14	1.08%
	VOLUME TOTAL DOS DEFEITOS	8976.9	25.72%
NÍVEL CINCO DA PEDREIRA	VOLUME DE ROCHA NO NÍVEL CINCO	33731.28	100%

MODELO DE APROVEITAMENTO DA ROCHA			
MODELO DE APROVEITAMENTO DA ROCHA E A RELAÇÃO COM O VOLUME TOTAL DE ROCHA DO NÍVEL CINCO		VOLUMES m ³	PERCENTUAL
VOLUME DE APROVEITAMENTO DA ROCHA PARA O NÍVEL CINCO	MODELO DE APROVEITAMENTO DA ROCHA PARA ÍNDICE MENORES QUE 15% DE RECUPERAÇÃO DA ROCHA	14230.31	42.18%
	MODELO DE APROVEITAMENTO DA ROCHA PARA ÍNDICE MAIORES QUE 15% DE RECUPERAÇÃO DA ROCHA	19500.97	57.82%
NÍVEL CINCO DA PEDREIRA	VOLUME DE ROCHA NO NÍVEL CINCO	33731.28	100%

Tabela 4.1

Dados de modelagem da Pedreira Knawa. **A.** Volume dos defeitos ornamentais da rocha e sua relação com o volume total do nível cinco. **B.** Volume de aproveitamento da rocha para índices inferiores e superiores a quinze por cento da rocha e sua relação com o volume total do nível cinco.

4.3 - PROPOSTA DE REDUÇÃO DE CUSTOS DA PEDREIRA "KNAWA"

Segundo dados da empresa Fontex o custo de extração de uma bancada pode ser discriminado da seguinte forma: 40% fio diamantado, 40% furação contínua e 20% outros (máquinas, movimento de carga e encargos), onde seu custo total atual de extração de uma bancada está em torno de quinze mil reais.

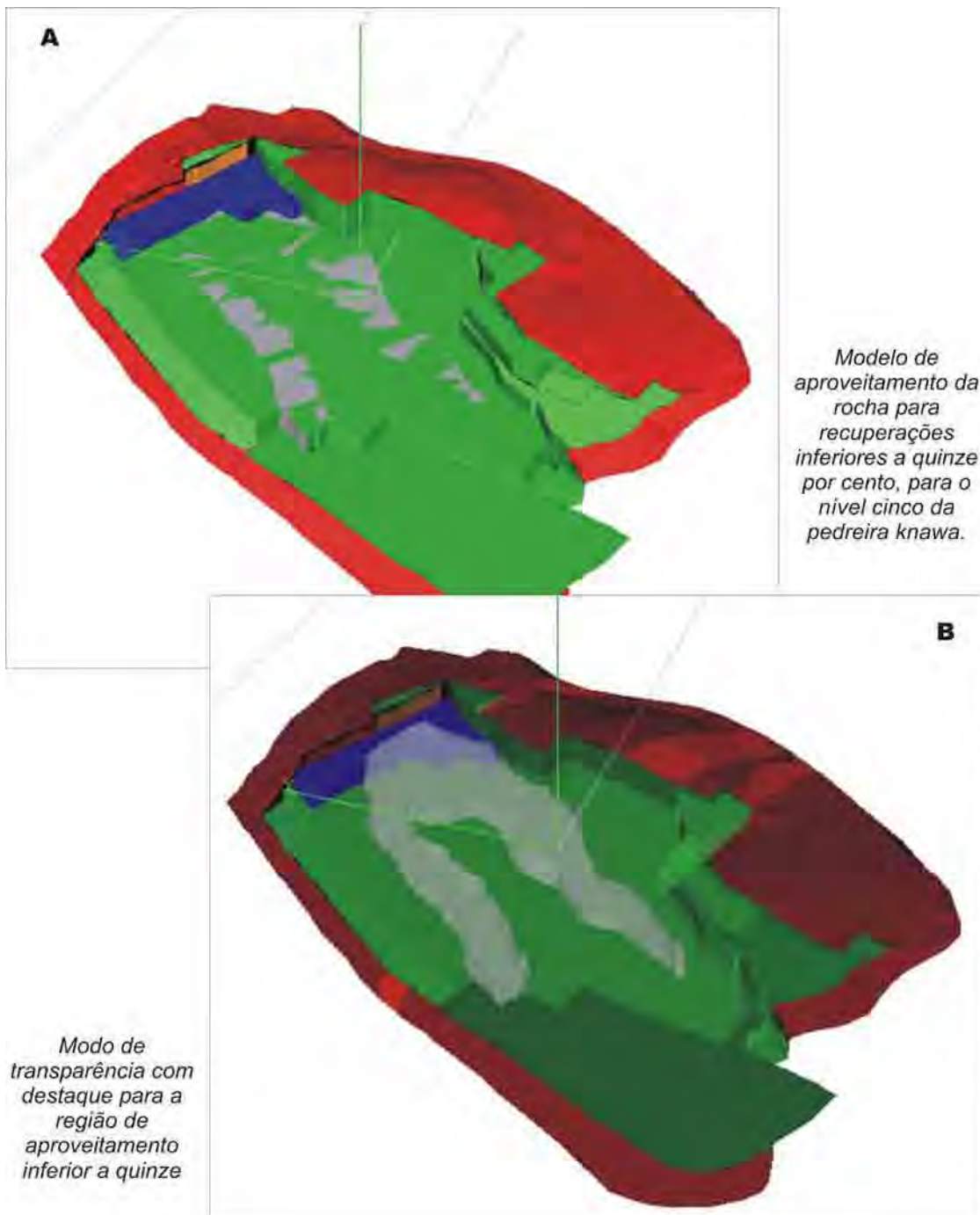


Figura 4.8

Modelo de aproveitamento da rocha, onde a porção cinza representa a região da pedreira com recuperações inferiores a quinze por cento. **A.** Modelo de aproveitamento da rocha do nível cinco da pedreira knawa, com destaque em cinza para a porção com recuperações inferiores a quinze por cento. **B.** Continuidade em subsuperfície da porção com recuperações inferiores a quinze por cento da rocha.

Nota-se na pedreira que as rochas são extraídas todas da mesma forma, com separação de bancadas por fio diamantado, e posteriormente desmembramento dos filões e dos blocos por furação contínua e com pequenas quantidades de explosivos, sem apresentar nenhuma seletividade por frentes de lavra.

Atualmente os desmembramentos das bancadas ocorrem por furação contínua de dez em dez centímetros para todas as regiões da pedreira.

Sendo assim, o presente trabalho propõe nas regiões de defeitos ornamentais uma redução do número de furações contínuas o que não prejudicaria na conformação da lavra, uma vez que as bancadas ainda seriam separadas por fio diamantado.

Estas regiões apresentam um aproveitamento médio inferior a cinco por cento da rocha e não seria necessário que os filões e os blocos fossem desmembrados utilizando o adensamento de dez em dez centímetros conforme citado anteriormente, uma vez que estes blocos serão descartados. Desta forma propõem-se uma redução do número destas furações com conseqüentes aberturas desta malha para trinta centímetros, ou seja, a cada um metro teria uma redução de sessenta por cento do número de furos, que corresponderia uma redução das furações contínuas nestes domínios de baixo aproveitamento de quarenta por cento para dezesseis por cento (**figura 4.9**).

Esta redução de vinte e quatro por cento no custo total da furação de cada bancada na região de defeito ornamental implicará numa redução de três mil e seiscentos reais para cada bancada neste domínio.

Considerando que o volume de uma bancada de dimensões (9x9x5) é aproximadamente 405m³ sendo que o volume total de defeitos ornamentais modelados neste trabalho para o nível cinco é 8976.9m³, resultando assim aproximadamente vinte e duas bancadas de defeitos ornamentais para este nível cinco.

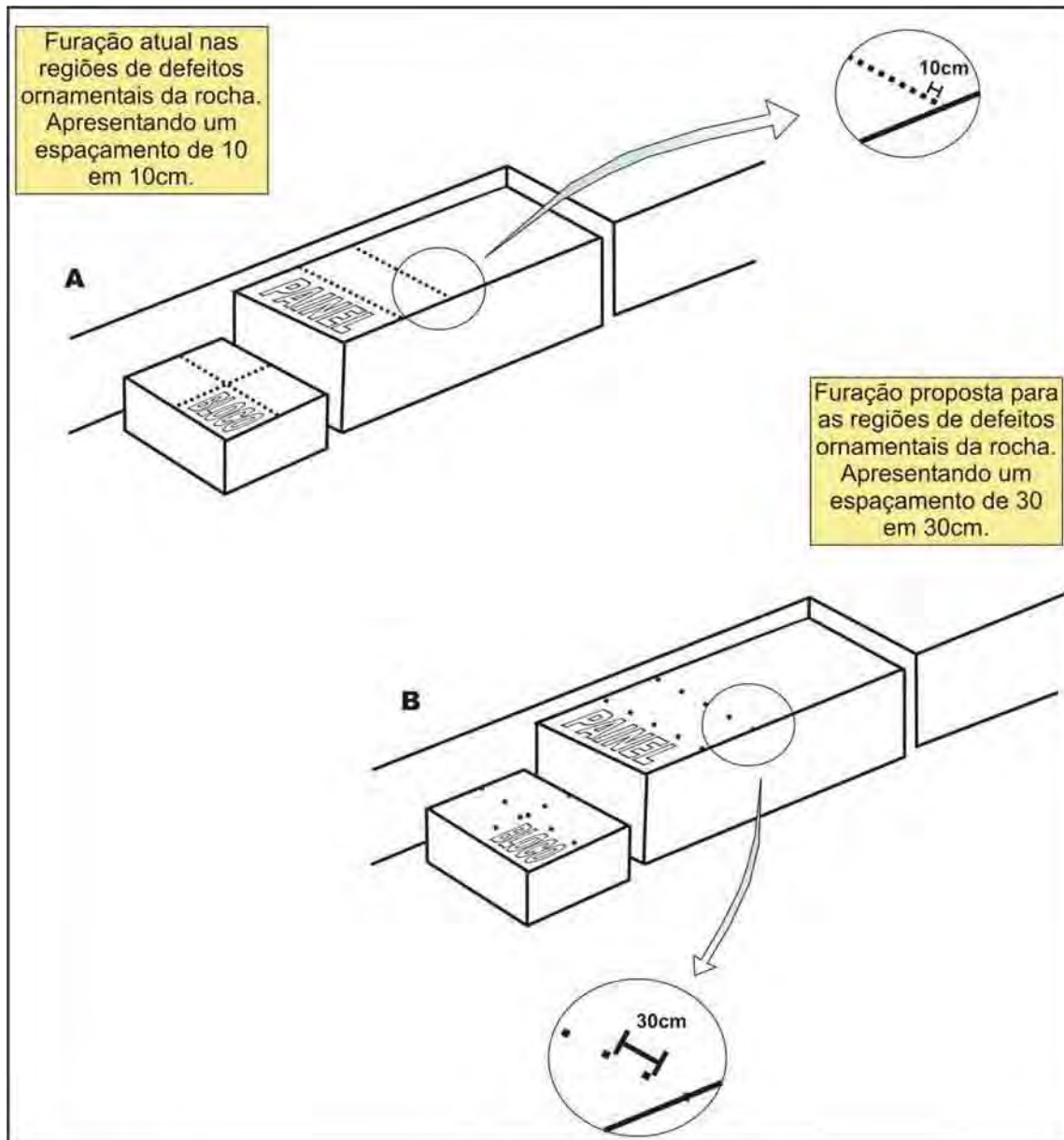


Figura 4.9

Representação esquemática da furação contínua de painéis e bloco de rocha pelo método de bancadas, com destaque para o espaçamento dos furos. **A.** Esquema da furação contínua atual da pedreira nas regiões de defeitos ornamentais da rocha. **B.** Proposta de espaçamento da malha de furos para 30cm nas regiões de defeitos ornamentais.

Considerando a mesma redução de custo por bancada acima mencionado teríamos uma redução no custo total de extração do nível cinco de R\$ 79.200 (Tabela 4.2).

SITUAÇÃO ATUAL		PROPOSTA DE REDUÇÃO DE CUSTOS	
CUSTO POR BANCADAS	15.000 Reais	CUSTO POR BANCADAS	11.400 Reais
DISCRIMINAÇÃO DO CUSTO POR BANCADA	40% FIO DIAMANTADO, 40% FURAÇÃO, 20% OUTROS	DISCRIMINAÇÃO DO CUSTO POR BANCADA	52.63% FIO DIAMANTADO, 26.31% OUTROS, 21.05% FURAÇÃO
NÚMERO DE FUROS POR METRO NA REGIÃO DE DEFEITOS ORNAMENTAIS	10 FUROS	NÚMERO DE FUROS POR METRO NA REGIÃO DE DEFEITOS ORNAMENTAIS	4 FUROS
VOLUME MÉDIO DE UMA BANCADA	405 m ³	VOLUME MÉDIO DE UMA BANCADA	405 m ³
VOLUME DOS DEFEITOS ORNAMENTAIS CUBADOS NO TRABALHO	8976.9 m ³ /22 BANCADAS	VOLUME DOS DEFEITOS ORNAMENTAIS CUBADOS NO TRABALHO	8976.9 m ³ /22 BANCADAS
CUSTO DE EXTRAÇÃO DAS 22 BANCADAS COM DEFEITOS ORNAMENTAIS	330.000 Reais	CUSTO DE EXTRAÇÃO DAS 22 BANCADAS COM DEFEITOS ORNAMENTAIS	250.800 Reais
REDUÇÃO DE CUSTO PROPOSTA COM O ESPAÇAMENTO DA MALHA DE FUROS NA REGIÕES DE DEFEITOS ORNAMENTAIS DA ROCHA			79.200 Reais

Tabela 4.2

Proposta de redução de custos da Pedreira Knawa, levando em consideração as regiões de defeitos ornamentais da rocha.

4.4 - TESTE DO MÉTODO GPR NA INVESTIGAÇÃO EM SUBSUPERFÍCIE DOS DEFEITOS ORNAMENTAIS DA ROCHA NA PEDREIRA KNAWA

O levantamento geofísico utilizando o método GPR neste trabalho tem por objetivo testar sua eficiência no reconhecimento de defeitos ornamentais da rocha, tais como: fraturas, veios e enclaves anfíbolíticos.

Sendo assim, apresenta-se a seguir noções básicas sobre o método, não se aprofundando em sua teoria e tão pouco em técnicas de processamento, atendo-se em apresentar os dados e compará-los com os perfis geológicos.

4.4.1 - O MÉTODO GPR

A fundamentação teórica do método GPR pode ser observada afundo nos trabalhos de Stratton (1941), Reitz & Milford (1967), e mais resumidamente por Porsani (1999) e Gandolfo (1999), e esta diretamente relacionada com a teoria dos campos eletromagnéticos (EM) e nas equações de Maxwell, que descrevem o comportamento do campo eletromagnético em qualquer meio.

A propagação das ondas eletromagnéticas vai depender das seguintes propriedades do meio: permissividade dielétrica, permeabilidade magnética e da condutividade elétrica.

Na maioria das condições geológicas, as variações magnéticas são muito pequenas. A permeabilidade magnética dos materiais quase não varia com relação à permeabilidade, espaço livre, isto é, $\mu = \mu_0$. Portanto as propriedades que são consideradas no GPR são as propriedades elétricas.

PERMISSIVIDADE DIELÉTRICA

A permissividade dielétrica pode ser definida como a medida da capacidade que um material isolante possui de armazenar cargas elétricas (ou de se polarizar).

Pode-se afirmar que, para a maioria das aplicações práticas, as reflexões das ondas de radar ocorrem nas interfaces de materiais com distintos valores de permissividade dielétrica (ϵ). É comum expressar esta grandeza através de um número adimensional denominada constante dielétrica ou permissividade relativa (K), que é dada pela equação:

$$K = \epsilon / \epsilon_0$$

Onde: ϵ = permissividade dielétrica do meio

ϵ_0 = permissividade no vácuo

A velocidade v com a qual a onda eletromagnética irá se propagar em um determinado material vai depender da constante dielétrica da seguinte maneira:

$$V = c / \sqrt{K}$$

Onde: c = é a velocidade da onda eletromagnética no vácuo.

A razão R (coeficiente de reflexão) entre a amplitude do sinal refletido e a amplitude do sinal incidente de uma onda eletromagnética se propagando em um meio 1 ao atingir a interface com o meio 2 é dada pela equação:

$$R = \frac{\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2}}{\sqrt{K_1} + \sqrt{K_2}}$$

Onde: K_1 = constante dielétrica do meio 1

K_2 = constante dielétrica do meio 2

A constante dielétrica de solos e rochas em geral é fortemente influenciada pela presença de água. A água apresenta elevado valor da constante dielétrica ($K=80$) se comparado com aquela dos grãos minerais ($K \approx 3-5$) que constituem a matriz de uma litologia, assim como do ar ($K=1$) que pode preencher os vazios desta.

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (σ)

A condutividade elétrica σ é uma propriedade física relacionada com a habilidade que um determinado meio possui de conduzir corrente elétrica, constituindo-se fisicamente no inverso da resistividade elétrica. Esta propriedade física dos materiais em subsuperfície vai agir na técnica GPR na atenuação das ondas eletromagnéticas, que pode ser quantificada, na prática, através da constante de atenuação α , segundo a equação:

$$\alpha = 1,636 \sigma / \sqrt{K}$$

Onde: α = é a constante de atenuação em dB/m (decibéis por metro)

σ = condutividade

K = constante dielétrica

Por esta relação verifica-se que quanto maior a condutividade do meio, maior será a atenuação da onda eletromagnética e portanto menor será a penetração da mesma em subsuperfície.

A Tabela 4.3 exhibe alguns parâmetros relacionados às propriedades eletromagnéticas de diversos tipos de materiais inclusive geológicos.

Materiais Secos	k	mS/m	Materiais Saturados	k	mS/m
Ar	1	0	Água Destilada	81	0.01
Areia Seca e Cascalho	2-6	0.01	Água Fresca	81	0.5
Argila Seca	5	2	Água do Mar	81	3000
Folhelho e Silite Seco	5	1	Areia Saturada	20-30	0,1-1
Calcário Seco	4	0.5	Silte Saturado	10	1-10
Solo Arenoso Seco	2.6	0.14	Argila Saturada	40	1000
Solo Argiloso Seco	2.4	0.27	Solo Arenoso Saturado	25	6.9
Sal Seco	5-6	0,01-1	Arenito Saturado	15	50
Granito Seco	5	0.01	Silito Saturado	6	40
Basalto Seco	6	1	Folhelho Saturado	30	100
Diabásio Seco	7	10	Calcário Saturado	7	100
Ferro	1	10..9	Granito Saturado	8	2
Aço	1	:	Arenito Saturado	7	1
PVC	8	0	Basalto Saturado	8	10
Asfalto	3-5	0	Diabásio Saturado	8	100
Concreto Seco	5,5	0	Concreto Saturado	12.5	0

Tabela 4.3

Dados de constante dielétrica (K) e condutividade elétrica dos materiais mais comuns para serem analisados pelo método GPR (Porsani, 1999)

O GPR trata-se de um importante método geofísico de alta resolução de investigação de feições geológicas rasas, que pode ser aplicado em vários ramos da geologia tais como: exploração mineral, geologia básica, geologia de engenharia, hidrogeologia, geologia ambiental, pesquisas arqueológicas e mais recentemente no estudo das discontinuidades em maciços rochosos explorados para rochas ornamentais.

A aplicação de GPR nos estudos de maciços rochosos para auxiliar os processos de lavra de rocha ornamentais, segundo Botelho (2001), iniciaram com os trabalhos de Dubois (1995), onde a técnica foi aplicada para estudar fraturamentos em depósitos de rochas calcárias. E posteriormente Grasmueck (1996), desenvolve importante teste de investigação 3D de fraturas utilizando GPR em uma pedreira de gnaiss ornamental ao norte da Suíça.

No Brasil, encontram-se poucos trabalhos que aplicam o método GPR na resolução de problemas relacionados à lavra de rochas

ornamentais, destacando-se os trabalhos de Botelho *et al.* (1998), Botelho (2001), Strider & Buffon (2001) onde ambos apresentam estudos de caracterização espacial de fraturas.

4.4.2 - LEVANTAMENTO DE CAMPO

No levantamento de campo utilizou-se o sistema RAMAC-GPR, construído pela empresa Sueca MALA geoscience.

Os procedimentos de campo utilizados neste trabalho foram perfis de reflexão e as sondagens de velocidade (WARR – Wide Angle Reflection and Refraction).

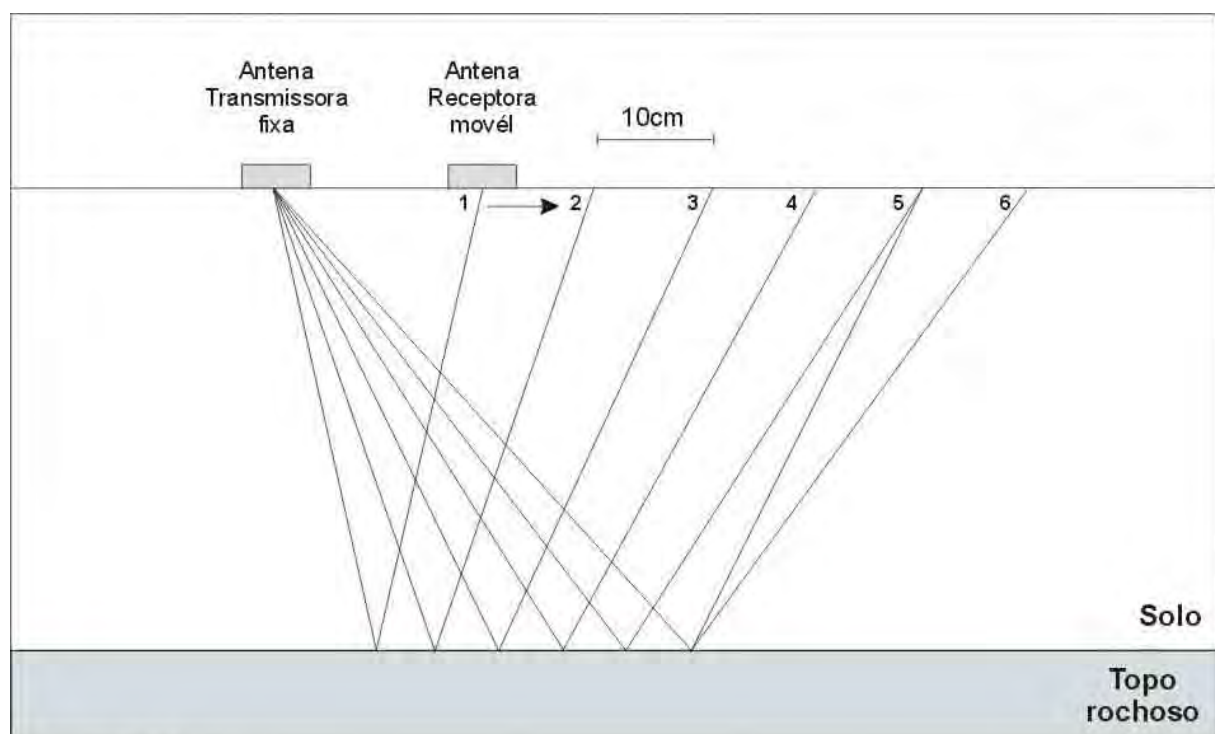


Figura 4.10

Esquema da sondagem WARR, com espaçamento entre as amostragens de 10 em 10 cm.

As sondagens de velocidade foram realizadas com antenas de (50 Mhz e 200 Mhz) e tem por objetivo o reconhecimento da velocidade de propagação da onda eletromagnética nas rochas da pedreira knawa. Esta

técnica de aquisição de velocidade consiste em manter uma antena fixa, enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira em intervalos constantes de 10 em 10cm (**figura 4.10**).

Para testar a eficácia do método de GPR na identificação de defeitos ornamentais da rocha. Foram escolhidas duas seções e/ou frentes de lavra que apresentam uma boa exposição vertical destes defeitos para a realização dos perfis de reflexão (**Figura 4.11**).

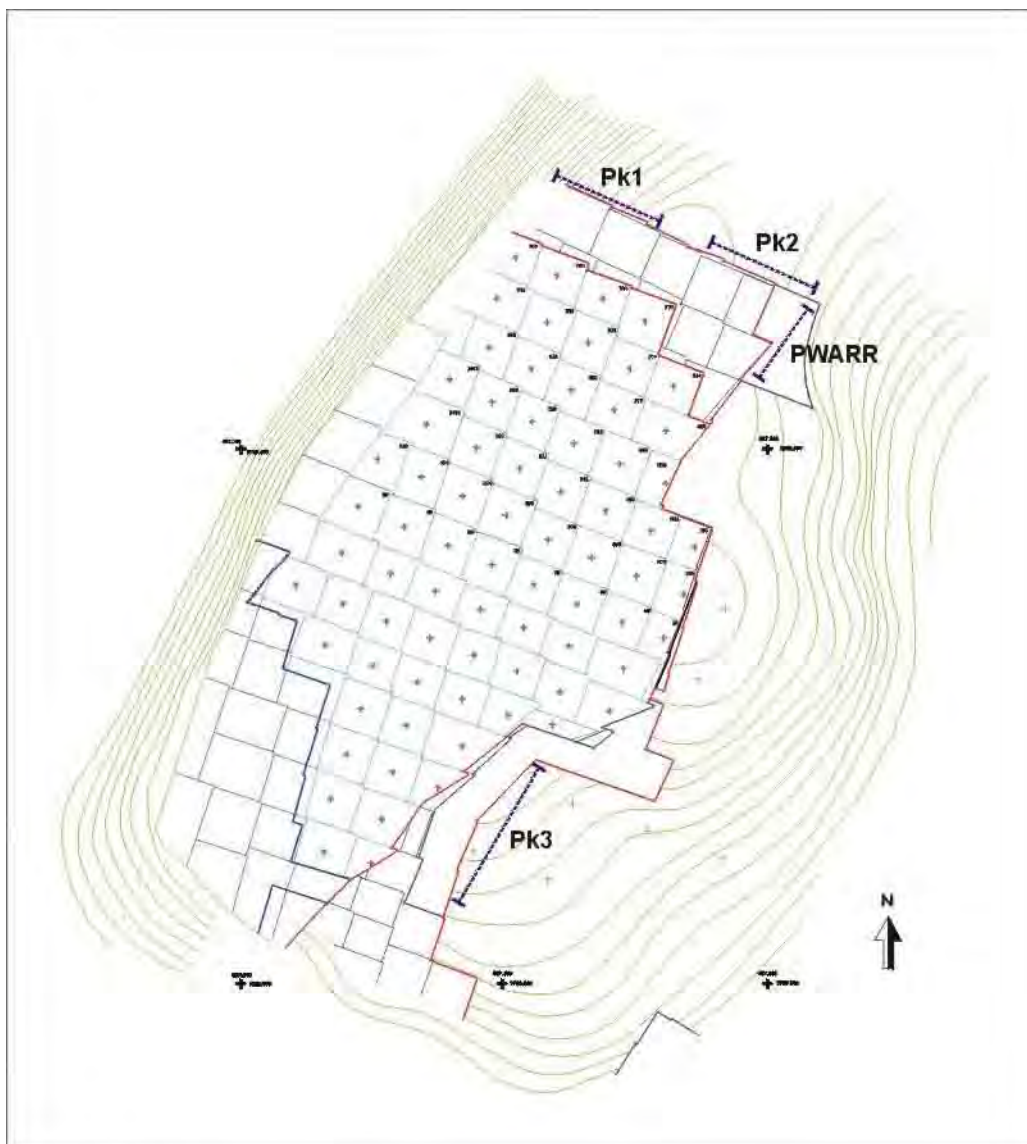


Figura 4.11

Localização dos perfis de reflexão (Pk1, Pk2 e Pk3) e da sondagem WARR (PWARR) na pedreira Knawa.

Estes perfis foram levantados com antenas de 100Mhz e 200Mhz, apresentando um arranjo conforme mostra a **figura 4.12**, e um espaçamento entre os pontos de medida de 20 em 20cm.

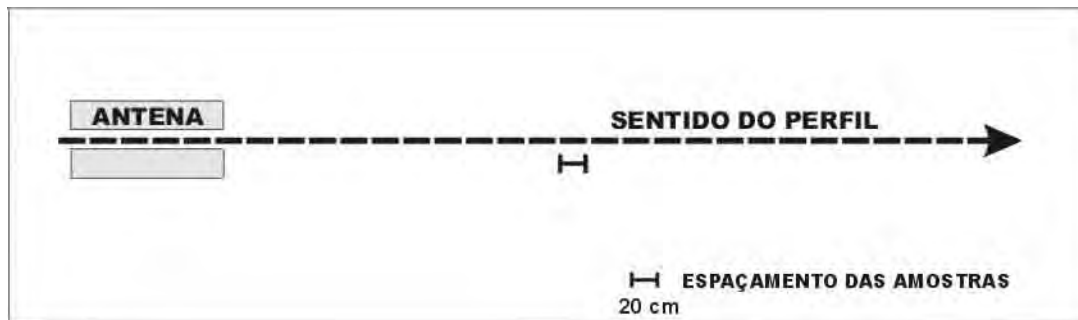


Figura 4.12

Arranjo das antenas utilizado no levantamento do perfis, com o espaçamento de cada estação amostrada de 20 em 20cm.

4.4.3 - PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados foi executado de acordo com as seguintes etapas: edição dos dados, aplicação de ganhos, correção do tempo zero, a análise da velocidade da onda eletromagnética, e a conversão dos tempos dos perfis de reflexão em profundidade.

A edição dos dados permitiu corrigir os erros de aquisição e dos arquivos, melhorar a apresentação e incluir as informações da topografia e editar os traços.

As aplicações dos ganhos nos tempos foram feitos para ajustar a parte atenuada do sinal, aumentando assim a amplitude da onda em função do tempo. Este processo permite melhorar a visualização de alguns refletores.

A correção do tempo zero foi feita via *software* e consiste em ajustar no radargrama o tempo em que a primeira onda aérea leva para chegar na antena receptora.

A velocidade de propagação da onda no meio foi determinada a partir do ensaio WARR (**figura 4.13**), fornecendo um valor de 130 m/ μ s (0,13 m/ η s).

Após a obtenção da velocidade da onda no meio, os perfis de reflexão foram convertidos de (x, t) para (x, z), permitindo assim identificar as verdadeiras posições espaciais dos refletos observados nos perfis e compara-los com as informações geológicas levantadas das seções analisadas.

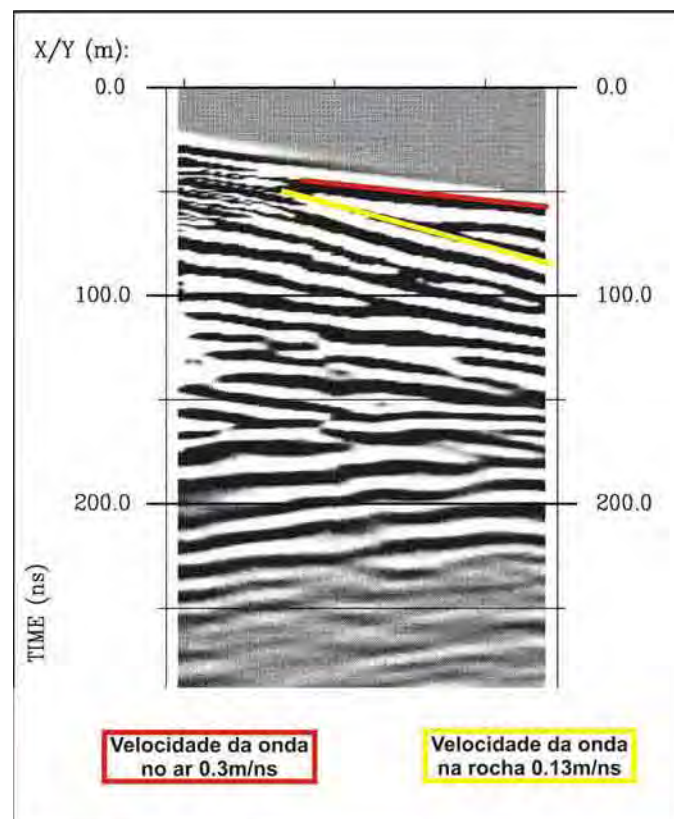


Figura 4.13

Radargrama da sondagem WARR apresentando tanto a velocidade da onda no ar quanto na rocha.

4.4.4 - RESULTADO E INTERPRETAÇÕES DOS RADARGRAMAS

Os locais das seções (**figura 4.11**) foram selecionados levando em consideração a grande exposição vertical da rocha, permitindo assim, checar com levantamentos geológicos de detalhe as anomalias observadas nos radargramas.

PK1

O perfil tem 22,50m de comprimento e foi obtido pela técnica de perfis de reflexão por afastamento constante de 0,2m. Utilizaram-se antenas de 100MHz, com separação entre as antenas transmissora e receptora de 1,00m. A penetração da onda eletromagnética no meio alcançou cerca de 15m de profundidade, com uma velocidade de 0,13m/ns.

O radargrama PK1 apresenta tanto refletores contínuos quanto hiperbólicos (**figura 4.14**). Os refletores contínuos horizontais apresentam-se no início do perfil com uma profundidade de aproximadamente 6m, e os refletores contínuos inclinados ocorrem em todo o perfil principalmente de cinco a doze metros.

As feições hiperbólicas podem ser observadas na porção central do perfil a aproximadamente quinze metros do seu início a uma profundidade de 2,25m e 3,75m. Este tipo de feição é formada por refletores pontuais, que causam a difração da onda eletromagnética.

INTERPRETAÇÃO

Pela sobreposição do perfil PK1 na seção geológica de detalhe nota-se que as feições hiperbólicas concordam com as bandas dioríticas mapeadas nesta seção geológica (**figura 4.15**), no entanto os refletores

horizontais não se pode observar seu significado geológico por estarem abaixo do nível estudado.

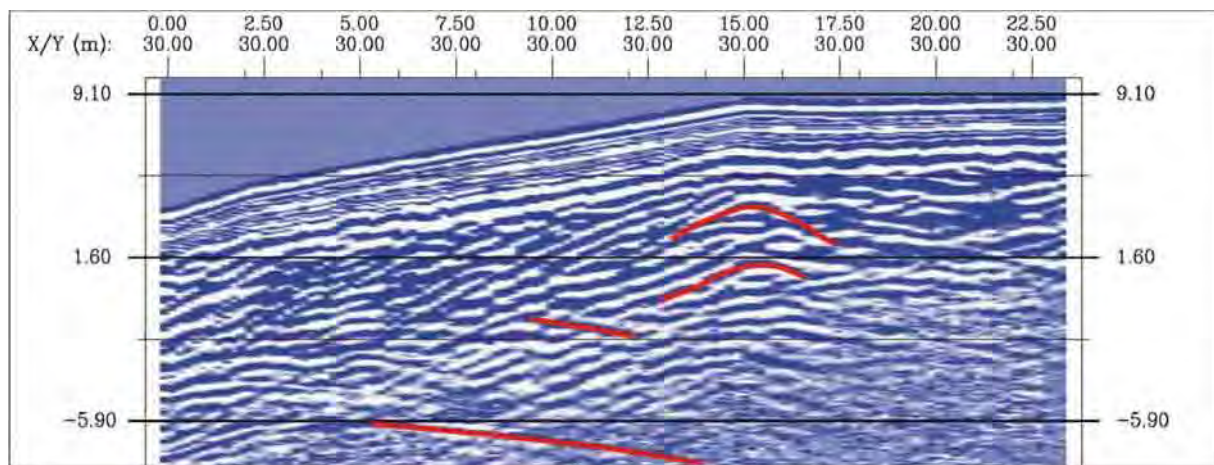


Figura 4.14

Radargrama Pk1 com destaque para seus principais refletores.

PK2

Este perfil tem 18,70m de comprimento e foi obtido pela a técnica de perfis de reflexão por afastamento constante de 0,2m. E a penetração da onda eletromagnética utilizando a antena de 100Mhz foi de aproximadamente 13m.

A grande maioria dos refletores observados neste radargrama são feições hiperbólicas principalmente no intervalo de zero a dez metros e profundidades variadas como pode-se observar na **figura 4.16**.

INTERPRETAÇÃO

A sobreposição do radargrama sobre a seção geológica permite concluir que a reflexões das ondas eletromagnéticas na forma de hipérboles estão diretamente relacionadas com a presença de enclaves de natureza máfica e ultramáfica dentro do biotita gnaiss migmatítico.

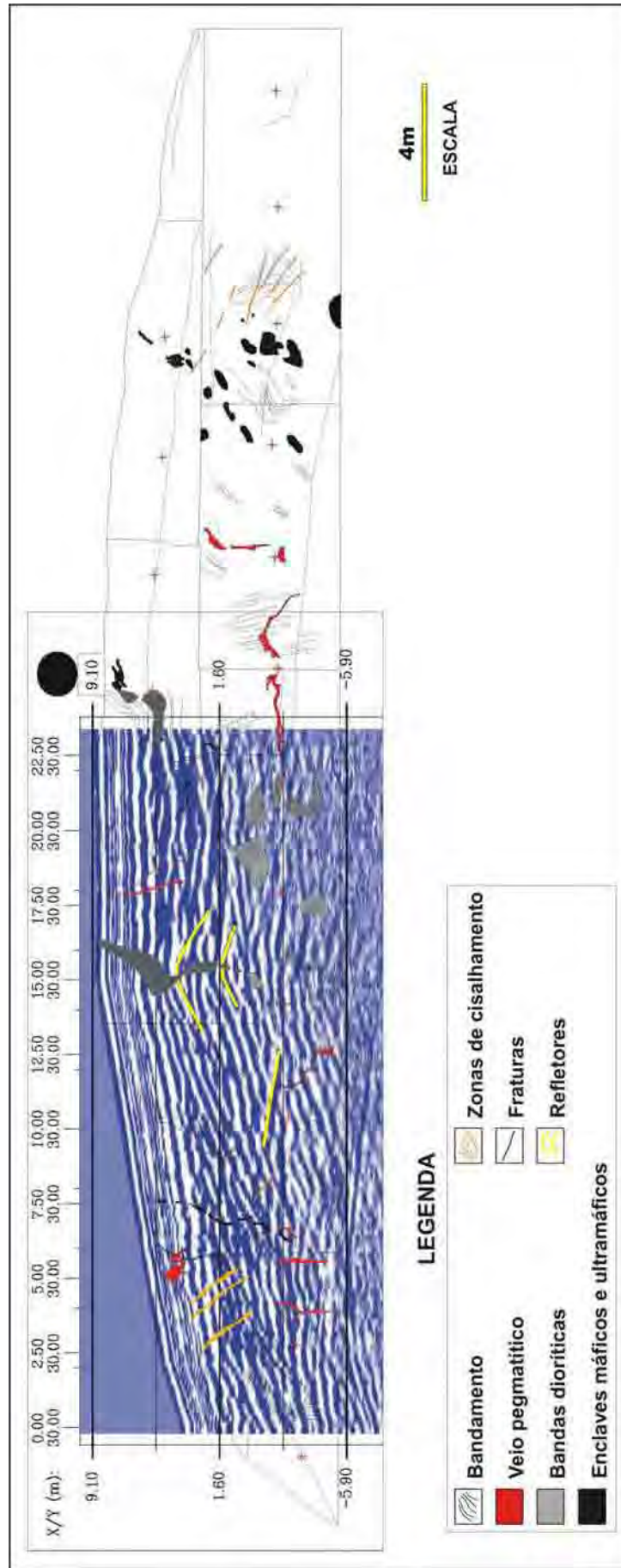


Figura 4.15

Radargrama Pk1 sobreposto na seção geológica apresentando as bandas dioríticas como sendo o principal refletor das ondas eletromagnéticas neste perfil.

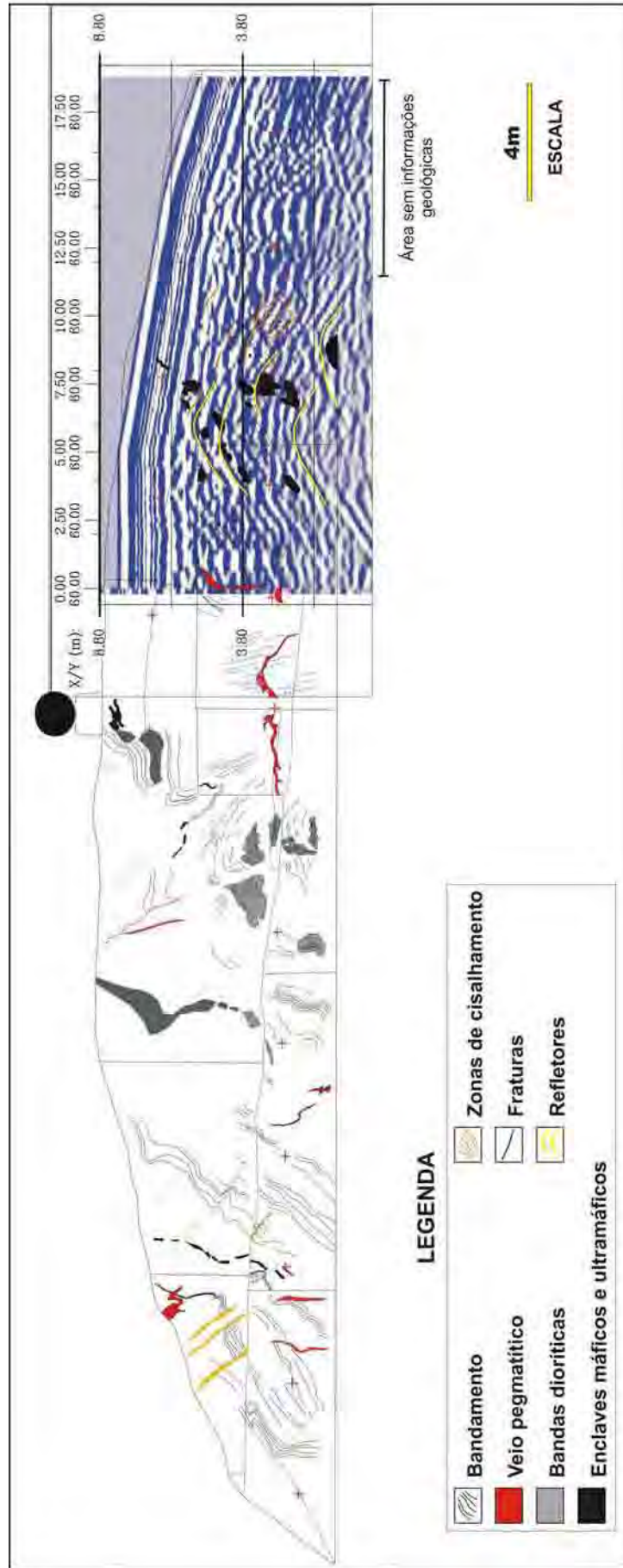


Figura 4.16

Sobreposição do radargrama Pk2 na seção geológica revelando forte concordância dos refletores hiperbólicos do radargrama com os enclaves de rochas máficas e ultramáficas.

Sendo assim, pode-se concluir que as propriedades elétricas das rochas são bem distintas.

PK3

A **figura 4.17** mostra o perfil PK3 com 20m de comprimento. Utilizaram-se antenas de 100Mhz com separação entre as antenas de 1m, e espaçamento entre as estações de 0,2m. A penetração do radar alcançou 10m de profundidade.

Nota-se que os refletores observados neste radargrama são hiperbólicos e estão até 5m de profundidade. Sendo que o maior deles esta aproximadamente no centro do perfil a uma profundidade de 2.50m, e os outros apresentam-se mais rasos a aproximadamente 2m de profundidade.

INTERPRETAÇÕES

A sobreposição do perfil geológico sobre o radargrama permite estabelecer uma concordância entre os refletores hiperbólicos e as estruturas observadas no campo. A hipérbole maior sugere uma reflexão de uma veio pegmatítico, já as hipérboles menores e mais rasas indicam reflexão de pequenos enclaves anfíbolíticos como pode-se observar na figura 4.17.

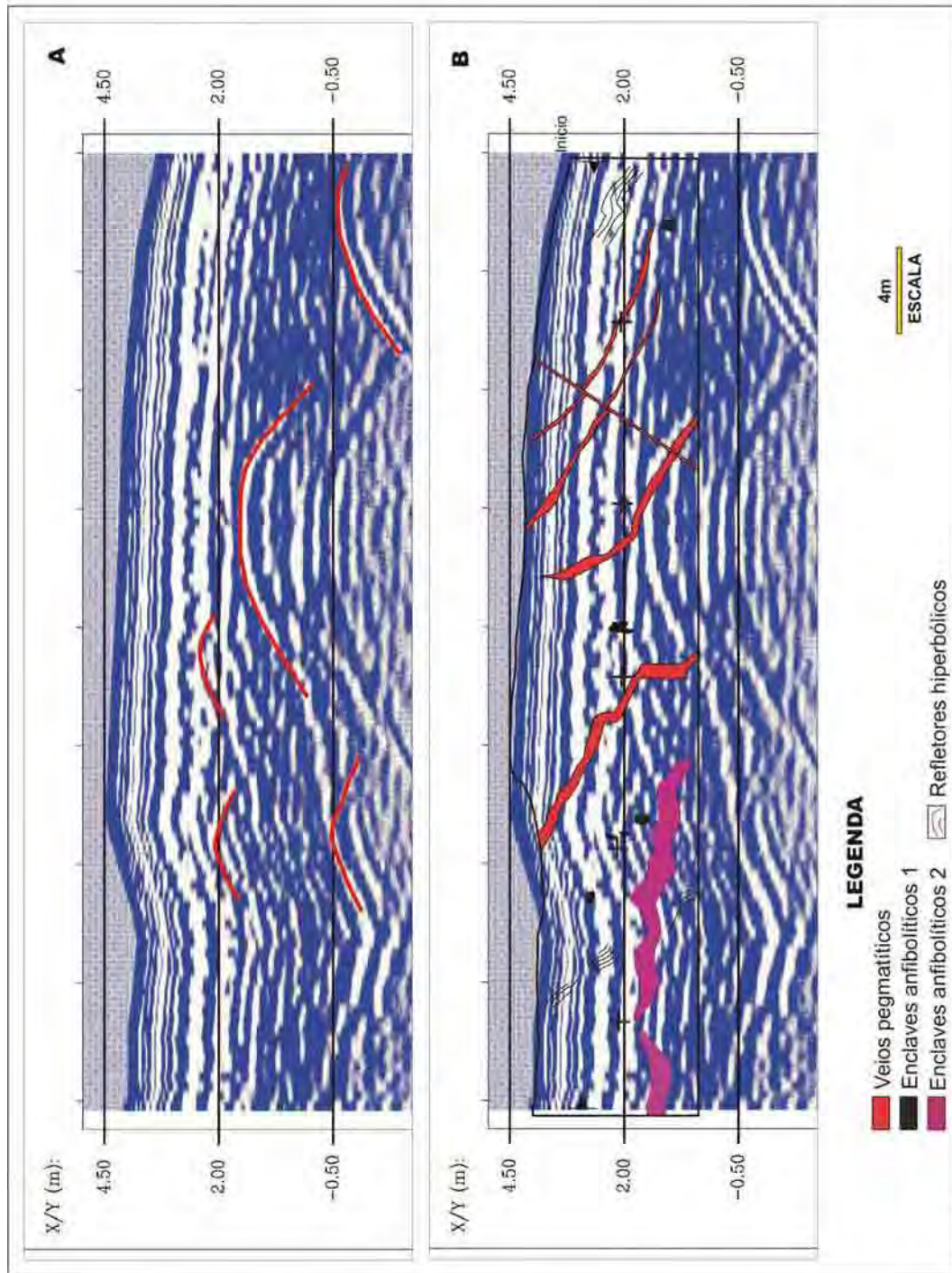


Figura 4.17

Perfil GPR Pk3, localizado na porção centro sul da pedreira Knawa, realizado com antena de 100Mhz. **A.** Radargrama do local com refletores hiperbólicos. **B.** Perfil geológico do local sobre o radargrama, apresentando uma concordância entre os refletores e a geologia.

4.4.5 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O USO DO GPR NA PEDREIRA KNAWA

Os dados revelam que a grande maioria dos refletores observados tem uma relação direta com os enclaves anfíbolíticos, onde observam-se feições hiperbólicas. A casos de feições hiperbólicas suaves estarem relacionadas a veios pegmatíticos.

As grandes fraturas suhorizontais observadas na pedreira principalmente no seu paredão principal, onde foram levantados os perfis (PK1, PK2), não apresentaram respostas nos perfis de GPR.

Os levantamento de GPR na pedreira knawa permitem concluir que as melhores respostas foram obtidas nas zonas ricas em enclaves anfíbolíticos pois as propriedades elétricas e magnéticas destas rochas são bem diferentes de sua encaixante. Sendo assim, o emprego de GPR na identificação destas zonas é satisfatório podendo auxiliar a extração da rocha nestas zonas.

CONCLUSÕES

As conclusões obtidas neste trabalho podem ser listadas abaixo da seguinte forma:

- 1- O mapeamento de detalhe na Pedreira Knawa e a análise do seu entorno permitiram definir a geometria dos corpos rochosos e a estrutural da pedreira, bem como obteve parâmetros para contribuir com o entendimento da evolução geológica e tectônica da área.
- 2- A comparação da Geologia X Recuperação comercial da rocha conduziu à identificação dos condicionantes geológicos para o melhor aproveitamento do minério.
- 3- Os mapas previsionais permitem maximizar a extração e otimizar a lavra, aumentando a rentabilidade da jazida.
- 4- O teste do método de GPR na Pedreira Knawa permite concluir que as melhores respostas foram obtidas nas zonas ricas em enclaves anfibolíticos, onde suas propriedades elétricas são distintas de sua encaixante.
- 5- A utilização da Pedreira Knawa como área "Piloto" para a aplicação da técnica de levantamento geológico detalhado, revela que tal procedimento deve ser adotado como rotina, em uma mineração de rochas ornamentais. Cabe salientar ainda que se deve adotar metodologias diferentes em cada etapa de exploração das rochas ornamentais, pois na etapa de reconhecimento do maciço rochoso

sugere que os mapeamentos devem ser menos detalhados em escala 1:1000 e/ou 1:500 visando reconhecer as principais regiões de defeitos ornamentais visando atuar no planejamento de lavra. Após definida a região a ser lavrada, estes mapeamentos devem ser mais detalhados (1:200) e se possível estabelecer uma cubagem da jazida, levando em consideração a relação a qualidade da rocha e seus defeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, C. R. A; CARANASSIOS, A; CARVALHO, D. Tecnologia de lavra e beneficiamento de rochas ornamentais. Fortaleza, Instituto Euvaldi Lodi, 1996, 225p.

ALKIMIN, F.F.; BRITO NEVES, B. B. & ALVES, J. A. C. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco – Uma revisão. In: Dominguez, J. M. L. & Misi, A (ed.). O Cráton do São Francisco. Salvador, SBG-Nba/SE, SGM, CNPq, 45-62.1993.

ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, 7: 349-364, 1977.

ARTUR, A.C.; WERNICK, E.; RODRIGUES, E. de P. Séries granitóides e suas implicações como rochas ornamentais. Anais do 40o Congr.Bras.Geol. (SBG), p. 325. Belo Horizonte – MG, 1998.

BOTELHO, M. A. B. Análise de maciço cristalino empregando o geo-radar (GPR). In: I Simpósio de rochas ornamentais, Salvador, Anais, 2001.

BOTELHO, M. A. B & MUFTI, I. R. Exploitation of limestone quarries in Brazil with depth migrated ground-penetrating radar data, 68th S.E.G. Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 2: 898-903, 1998.

BRANDÃO, W; SARDOU FILHO, R; QUEIROZ, E. T. Mármore, Granitos e outras rochas ornamentais no Brasil. In: Principais depósitos minerais do Brasil – Gemas e Rochas ornamentais. DNPM, Brasília, DF. 371-379, 1995.

CARNEIRO, M.A.; CARVALHO Jr., I. M. & TEIXEIRA, W. Petrologia, Geoquímica e Geocronologia dos Diques Máficos do Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional (Quadrilátero Ferrífero) e suas Implicações na Evolução Crustal do Cráton do São Francisco Meridional. Revista Brasileira de Geociências., 28(1):29-44. 1998c.

CARNEIRO, M.A.; CARVALHO Jr. I. M. de; FERNANDES, R.A. & TEIXEIRA, W. Geologia da parte de segmento Crustal situado entre as Cidades de Oliveira, Campo Belo e Santana do Jacaré, MG. In: SBG/Núcleo MG, Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 9, Boletim, 14: 36-37, 1997c.

CARNEIRO, M.A.; TEIXEIRA, W.; CARVALHO Jr. I. M. de; OLIVEIRA, A. H. De & FERNANDES, R.A. Archean Sm/Nd isochron age from the Ribeirão dos Motas layered rocks sequence, Southern São Francisco Craton, Brazil. In: SBG, South-American Symposium on Isotope Geology, Campos do Jordão, Anais, 1997b.

CARNEIRO, M.A.; TEIXEIRA, W.; NALINI Jr. H. A; CARVALHO Jr. I. M. de; OLIVEIRA, A. H. De & FERNANDES, R.A. & MOUTTE, J. A seqüência acamadada de Ribeirão dos Motas. In: Simpósio Sul-Americano de Geologia Isotópica, Campos do Jordão, Guia de Excursões, 1997a.

CEDRAZ NERY, M. A; SILVA, E. A. Da. Balança mineral de rochas ornamentais 1988-2000. In: I Simpósio de rochas ornamentais, Salvador, Anais, 2001.

CHIODI FILHO, C. 2003. Desempenho e competitividade do setor de rochas no Brasil. In: Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 4, Recife. Anais do ..., CETEM/SBG, p. 245-252, 2003.

CHIODI FILHO, C. 2002. Situação brasileira no mercado internacional de rochas ornamentais: retrospectiva e perspectivas. In: Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 3, Recife. Anais do..., CETEM/UFPE, p. 138-145, 2002.

CHIODI FILHO 2001. Apresentação do termo de referência setorial da indústria de rochas ornamentais no Brasil. Encontro Rio Grande do Sul – Itália do Setor de Rochas Ornamentais SIMAG-FIERGS-CCI/RS. 2001.

CHIODI FILHO 2001. Situação e perspectivas Brasileira no setor de rochas ornamentais e de revestimento. In: I Simpósio de rochas ornamentais, Salvador, Anais, 2001.

DUBOIS, J. C. Borehole radar experiment in limestone: Analysis and data processing, First Break. 13:57-67, 1995.

EBERT, H. Relatório. Relatório Anual da Divisão de Geologia e Mineralogia. 62-81, 1956.

FERRARI, C. Uso das rochas ornamentais em projetos urbanos e arquitetônicos. In: I Simpósio de rochas ornamentais, Salvador, Anais, 2001.

FRAZÃO, E.B. Catalogo de rochas ornamentais do estado do Espírito Santo. São Paulo, IPT, 1993.

GRASMUECK, M. 3-D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss, *geophysics*, 61, no. 04, 1050-1064, 1996.

GANDOLFO, O.C.B. Aplicação da Sísmica de Reflexão de Alta Resolução e do Radar de Penetração no Solo (GPR): Um estudo comparativo.- Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Unesp – Campus Rio Claro- SP, 1999, 140 p.

GANDOLFO, O.C.B; MIRANDA FILHO, O. F; SILVA, M. B. Da. Levantamento geofísico utilizando o método GPR na Mineração Millennium (PB). In: 7th International Congress of the Geophysical society. Anais. 2001.

LUODES, H.; SELONEN, O; PÄÄKKÖNEN. Evaluation of dimension stone in gneissic rocks – a case history from southern Finland. *Engng. Geol.*52: 209-223, 2000.

LUODES, H. Rakennuskiviessiintymisen arviointi (Evaluation of dimension stone deposits). In: Parkkinen, J. (ed.), *Malmiarvioseminaari 26.11.1992 esitelmäkooste Sarja B53*. Vorimiesyhdistys r.y. Geologijaosto, Otaniemi, 122-130, 1992.

MACHADO FILHO, L; RIBEIRO. M.W; GONZALEZ,S.R; Schenini,C.A; Santos Neto,A,S; Barros Palmeira, R.C; Pires, J.L; Teixeira, W. & Castro, H.E.F. Geologia. In: MME/SG, *Projeto Radambrasil, Folhas SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória*. 32:36-45, 1983.

MASTRELA, R; STELLIN, R; STELLIN Jr. A; TOMI, G. F. C. De. Avanços tecnológicos no planejamento de lavra para rochas ornamentais. In: I Simpósio de rochas ornamentais, Salvador, Anais, 2001.

MONTANI, C. 2003. Stone 2003 - Repertorio economico mondiale. Grupo Editoriale Faenza Editrice s.p.a. 237p.

MOURA, C.L. Estudos Geológico, Petrográfico e Tecnológico das rochas ornamentais da "Jazida Formoso", município de Formiga – MG. Dissertação de Mestrado, IGCE/DPM – UNESP, 1988.

OLIVEIRA, A. H. Evolução tectônica de segmento crustal arqueano do Cráton São Francisco Meridional. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas departamento de geologia, Universidade de Ouro Preto, Minas Gerais, 1999.

PASSCHIER, C.W.; MYERS, J. S., KRÖNER A. Field Geology of High-Grade Gneiss Terranes. Berlin, Springer-Verlag. 1990.

PORSANI, J. L. (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro, SP, 1999, 145p.

RAMSAY, J. G. Foling and fracturing of rocks. McGraw-Hill ed., New York. 1967, 568p.

RAMSAY, J.G. & HUBER, M.I. 1987. The Techniques of modern structural geology. 2: folds and fractures. London. Academic Press, 1983.

REITZ, J. R., MILFORD, F. J., Foundations of Electromagnetic Theory. 2. ed., s.1.: Addison-Wesley, 1967, 435p.

SELONEN, O.; LUODES, H.; EHLERS, C. Exploration for dimension stone – implicações and examples from the Precambrian of southern Finland. Engng. Geol., 56:275-291, 2000.

STRATTON, J. A. Electromagnetic Theory. McGraw Hill Book Company, New York, 1941, 615p.

STRECKEISEN A. To each plutonic rock its proper name. Earth Science Review.12:1-33, 1976a.

STRECKEISEN A. Classification of the common igneous rocks by means of their chemical composition. A provisional attempt. Neues Jahrbuch F. Mineralogie. P. 1-15, 1976b.

STRIEDER, A. J & BUFFON, S. A. Fracture system analysis aided by GPR: application on dimension stone quarries modeling. In: 7th International Congress of the Geophysical society. Anais. 2001.

SUMÁRIO MINERAL. Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM, Brasília, DF, 1999.

TABOADA, J.; VAAMONDE, A.; SAAVEDRA, A.; ALEJANO, L. Application of geostatistical techniques to exploitation planning in slate quarries. Engng. Geol., 47:269-277, 1997.

TABOADA, J.; VAAMONDE, A.; SAAVEDRA, A. Evaluation of the quality of a granite quarry. *Engng. Geol.*, 53: 1-11, 1999.

TEIXEIRA, W. 1985. A Evolução geotectônica da porção meridional do Cráton do São Francisco, com base em interpretações geocronológicas. Instituto de Geociências. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 207p.

TEIXEIRA, W.; CARNEIRO, M.A.; NOCE, C.M; MACHADO, N.; SATO, K. & TAYLOR, P.N. Pb, Sr and Nd isotope constraints on the Archean evolution of gneissic-granitoid complexes in the Southern São Francisco Cráton, Brazil. *Precambrian Research.*, 78:151-164, 1996 a.

TEIXEIRA, W.; CORDANI, U. G; NUTMAN, A. P. & SATO, K. Polyphase crustal in the late Archean: The case of the Campo Belo metamorphic Complex, In: SBG, Simpósio de Terrenos Arqueanos da Plataforma Sul-Americana, Brasília, Anais... ,63 e 64, 1996b.

TEIXEIRA, W.; ONSTOTT, T. C.; MAKENYA, M. & SZABÓ, G.A.J. Proterozoic thermochronology implications from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar dating of the Campo Belo Metamorphic Complex, Southern São Francisco Craton. *Brasil. Anais da Academia Brasileira de Ciências.* 69(1): 559-575, 1997.

TURNER, F. J. & WEISS, L. 3 – Structural geology of metamorphic tectonites. McGraw-Hill ed, 1963. 545p.

VEGA, H.A.M. Problemas relacionados a tensões naturais na lavra de rochas ornamentais. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.