

FABIANA GALLINA

FATORES CONTROLADORES DA VARIAÇÃO DE MgO  
NOS MÁRMORES DA MINA RIO BONITO, PR.

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-graduação em Geologia, área de concentração Geologia Exploratória, Departamento de Geologia, Setor de Ciências Terra, Universidade Federal do Paraná

Orientador:  
Prof. Dr. José Manoel dos Reis Neto  
Co-orientador:  
Prof. Dr. Eduardo Salamuni

Curitiba  
2005



*Ao geólogo Cícero Carvalho  
meu grande companheiro de toda a vida,  
A nossa “bebezinha” Luana, que está a caminho.  
E aos meus pais.*

## Agradecimentos

A Universidade Federal do Paraná, especialmente ao Departamento de Geologia, o qual me tornou uma geóloga.

A Companhia de Cimentos Itambé pela parceria criada com a Universidade Federal do Paraná, subsidiando a pesquisa.

Aos meus orientadores pelo apoio e informações discutidas.

A todos do LAMIR-Laboratório de Análise de Minerais e Rochas pelas análises realizadas, especialmente a química Luciane Lemos do Prado e a técnica Elisiane Roper Pescini.

Aos meus “parceiros” de campo, aqueles que me acompanharam nestas etapas, especialmente ao geólogo Rodrigo Secchi que nunca me deixou na mão. E com muito carinho a todos os outros geólogos e acima de tudo AMIGOS que além de me acompanharem no campo, ajudaram com questões ou questionamentos: Cícero Carvalho, Ana Paula Soares, Daniel Bettú, Larissa Costa da Silva Juschaks, Silvana Bressan Riffel, Maria José Mesquita, Anelize Manuela Bahniuk, ainda não esquecendo da Ana Lúcia Moretto, Lincoln Lopes e Douglas Piovesan.

## Resumo

A mina Rio Bonito da Companhia de Cimentos Itambé é um depósito de mármore calcítico; utilizado na fabricação de cimento. Para geração do cimento, o alto teor de MgO provoca aumento de volume dos poros, isto resulta na perda da força mecânica e valores mais elevados da expansão, causando o enfraquecimento do cimento. Na mina existem frentes de mármore dolomítico em meio ao calcítico, que gera grande quantidade de material estéril. O objetivo deste estudo é saber qual o fator controlador destas variações dos teores de CaO e MgO no depósito de mármore. Os métodos utilizados foram análises: geoquímicas de rocha total por meio de fluorescência de raios X, mineralógicas por meio de difração de raios X, petrografia e análise estrutural. O enfoque integrado dos diversos métodos mostrou resultados satisfatórios, permitindo individualizar as frentes de mármore dolomítico e identificar fatores controladores de sua ocorrência no mármore calcítico. Os mármore calcíticos são constituídos essencialmente por calcita e possuem granulação fina e homogênea. Os mármore dolomíticos apresentam estrutura brechada. São constituídos essencialmente por dolomita com granulação de média a grossa, heterogênea composta de clastos angulosos com tamanhos que variam de milimétrico a centimétrico, e matriz de granulação fina. Os mármore apresentam diferença de cor devido a variações de porosidade. Os mármore dolomíticos têm porosidade maior, consequência do processo de dolomitização secundária. A dolomitização ocorreu por percolação de fluidos em zonas de fraqueza estrutural, resultando nos mármore dolomíticos brechados. Apesar das frentes dolomíticas terem sido geradas por processo de dolomitização, o fator condicionante é estrutural. A deformação dúctil possui foliação principal chamada de Sn, tem caráter penetrativo, anastomosada e possui pelo menos três fases de deformação, porém não apresenta características do condicionamento das frentes enriquecidas em MgO. O contato das frentes calcíticas com as dolomíticas é abrupto, balizado por fraturas. As fraturas são subverticalizadas e estão oblíquas à foliação principal dos mármore. Aplicando o modelo de Riedel para a área estudada, verifica-se que as direções dos planos de contato das frentes calcíticas e dolomíticas são coincidentes com as fraturas de abertura, ou de extensão. Estas zonas de abertura, por onde houve a percolação dos fluidos, estão geneticamente relacionadas à estrutura regional mais significativa, a falha transcorrente do Cerne.

## Abstract

The Rio Bonito mine of the Portland Itambé Company is a calcitic marble deposit used for the cement industry. The high MgO content of the marble causes volume increase and produces soluble salts, which weaken the cement. There is a dolomitic front in the calcitic marble body, which generate huge amount of barren material. The main goal of the present research is to determine the key factors, responsible for the content variation of CaO and MgO in the marble deposit. The methods applied are: whole rock geochemical analysis by x-ray fluorescence, mineralogical analysis by x-ray diffraction, petrography and structural analysis. The integrated methodological approach of the study shows reasonable results, allowing to delimit the dolomitic front, as well as to identify the key factors, which control the dolomitic front in the calcitic marble. The calcitic marble is composed essentially of calcite, with fine and homogeneous grain size. The dolomitic marble is essentially composed of dolomite, medium to coarse, heterogeneous grain size. Breccias, with angular clasts in a fine matrix, are common in the dolomitic marble. Both marbles present distinctive colors, according to their porosity. The dolomitic marble has higher porosity because of the secondary dolomitisation. This process occurs by fluid percolation in structural weakness zones, leading to the breccia formation in the dolomitic marble. In spite of the dolomitic front has been generated by dolomitisation process, the structural is the main control. The contact between calcitic and dolomitic front is abrupt, marked by fractures. The fractures are sub-vertical, oblique to the main foliation. Applying Riedel model to the studied area, it is possible to observe that the strike of the contact plane of dolomitic and calcitic front matches up with the open fractures, or extensional faults. The open zones, responsible for the fluid percolation, are genetic related to the most important regional structure, the Cerne strike-slip fault.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 01- Mapa de localização com detalhe na área de estudo.	3
Figura 02: Modelos esquemáticos de dolomitização. (Modificado de Tucker, 1990).	7
Figura 03: Mapa hipsiométrico da região da mina Rio Bonito.	23
Figura 04: Diagrama de roseta das atitudes totais das falhas (total 36 atitudes).	32
Figura 05: Diagrama de rosetas para comprimento e freqüência acumulados dos alinhamentos de relevo.	32
Figura 06: Diagrama de rosetas para comprimento e freqüência acumulados das lineações de relevo.	33
Figura 07: MDE (Modelo Digital de Elevação) com a divisão dos compartimentos.	34
Figura 08: Representação do diagrama de contorno máximo dos pólos com atitudes totais da foliação Sn (total de 1017 atitudes).	35
Figura 09: Diagrama de contorno máximo dos pólos e roseta atitudes totais da foliação Sn+1.	36
Figura 10: Diagrama de rosetas para as atitudes totais de juntas.	36
Figura 11: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas do compartimento 1. Total de atitudes 68.	37
Figura 12: Diagrama de rosetas para as medidas totais de juntas do compartimento 1. (48 atitudes).	38
Figura 13: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas do compartimento 2. (164 atitudes).	39
Figura 14: Diagrama de rosetas para as medidas totais de juntas do compartimento 2. (10 atitudes).	39
Figura 15: Diagrama de rosetas para as atitudes das falhas do compartimento 2 (total de 3 medidas).	40
Figura 16: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas do compartimento 3 (145 atitudes).	41
Figura 17: Diagrama de rosetas para as medidas totais de juntas do compartimento 3 (74 medidas).	42
Figura 18: Diagrama de rosetas para as atitudes das falhas do compartimento 3	42
Figura 19: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas do compartimento 4. Total 8 atitudes.	43
Figura 20: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas. Total 630 atitudes da foliação Sn.	58
Figura 21: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas. Total 113 atitudes da foliação Sn das bancadas da frente Norte.	59
Figura 22: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas. Total 115 atitudes da foliação Sn das bancadas da frente Sul.	59
Figura 23: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas. Total 169 atitudes da foliação Sn das bancadas da frente E.	60
Figura 24: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas. Total 28 atitudes da foliação Sn das bancadas da frente W.	61
Figura 25: Diagrama de rosetas das falhas. Total 18 medidas.	63
Figura 26: Diagrama de rosetas das juntas. Total 50 atitudes.	63
Figura 27: Mapa com planos aproximados de contato das frentes calcíticas e dolomíticas.	64
Figura 28: Diagrama de rosetas dos planos de contatos entre CaO e MgO nas bancadas da frente Norte. Total 19 atitudes.	66
Figura 29: Diagrama de rosetas dos planos de contatos entre CaO e MgO nas bancadas da frente Sul. Total 5 atitudes.	66
Figura 30: Diagrama de rosetas dos contatos do mármore calcítico com o dolomítico. Total 24 atitudes.	66
Figura 31: A: Diagrama de rosetas dos planos de contato.	85
B: Direções dos contatos aplicados a Riedel.	85
C: Direções dos contatos aplicados a Riedel e orientados segundo suas direções reais.	85
Figura 32: Esboço da mina com a direção preferencial da frente dolomítica.	89

## LISTA DE FOTOS

Fotos 01 e 02: Pilha de rejeito de calcário com alto teor de MgO (foto 01) e vista parcial da mina Rio Bonito (foto 02).	2
Foto 03: Vista parcial da área, onde se observam em primeiro plano morros de filito, com a drenagem entalhada e em segundo plano, morro no topo constituído de quartzito.	22
Foto 04: Vista parcial da área, onde se observam em primeiro plano morros de filito, com a drenagem fortemente entalhada.	22
Foto 05: Vista parcial da área mostrando ao fundo o Morro do Descalvado (quartzito).	24
Foto 06: Ponto 52, nível conglomerático no quartzito.	25
Foto 07: Ponto 36, estrutura rúptil do tipo “box work” no quartzito.	25
Foto 08: Ponto 69 Intercalação de níveis de areia e argila.	25
Foto 09: Bandamento do mármore com níveis de alteração diferenciados, em meio à foliação.	25
Fotos 09a: Ponto 86, mármore com bandamento composicional e plano de falha	26
Fotos 10: Metarritmitos com intercalações de níveis arenosos e argilosos.	27
Foto 11: Filito com dobras fechada	27
Foto: 12- Conglomerado da Formação Camarinha.	28
Foto: 13- Afloramento (conglomerado) da Formação Camarinha.	28
Foto 14: Vista de cima do Morro Alto para a Formação Camarinha.	28
Foto 15 e 16: Sericita filito com grãos de quartzo orientados no plano da foliação. Na foto da esquerda é identificada uma segunda geração de muscovita perpendicular à foliação principal (nicóis cruzados).	44
Foto 17: Sericita filito com grãos de quartzo boudinados, fraturados com sombra de pressão (nicóis cruzados).	45
Foto 18 e 19: Estruturas com porfiroclastos rotacionados e com sombra de pressão (nicóis cruzados).	45
Foto 20 e 21: Estruturas com dobras em kink (em A) e dobras-falha (em B) (nicóis cruzados).	46
Foto 22: Vista parcial da mina mostrando as bancadas.	53
Foto 23: Mármore calcítico típico da mina	54
Foto 24: Material brechado.	54
Foto 25: Detalhe do contato abrupto entre as frentes calcíticas e dolomíticas.	55
Foto 26: Contato abrupto de frente calcítica com dolomítica.	55
Foto 27: Nível conglomerático .	55
Foto 28 Intercalação de níveis carbonáticos e pelíticos em escala métrica	55
Foto 29: Intercalação de níveis carbonáticos e pelíticos, com dobras cerradas, assimétricas.	55
Foto 30: Intercalação de níveis pelíticos (filito) com o material arenoso (quartzito).	55
Foto 31: Vista parcial da mina mostrando as bancadas e contatos aproximados das frentes calcíticas e dolomíticas.	56
Foto 32: Foliação Sn com dobras abertas a suaves e eixos subhorizontalizados.	57
Foto 33: Foliação Sn mostrando eixos subhorizontalizados e subverticalizados.	57
Foto 34: Padrão de redobrimento da foliação Sn.	57
Foto 35: Foliação Sn+1 (clivagem de fratura) subverticalizada.	61
Foto 36: Zona de cisalhamento verticalizada.	62
Foto 37: Detalhe da zona de cisalhamento, com anastomosamento e boudinagem da rocha.	62
Foto 38: Falha com presença de estrias subhorizontais e sentido de movimento horário.	63

Foto 39: Plano de contato do mármore calcítico com o dolomítico. Vista de três bancadas.	
39 A: Plano de contato oblíquo à foliação principal.	65
Foto 40: Metacalcário com estrutura sedimentar preservada.	67
Foto 41: Fotomicrografia mostrando a foliação incipiente da rocha e sua mineralogia.	67
Foto 42: Mármore calcítico com granulação fina e presença de fraturas estilolíticas.	67
Foto 43: Presença de veios e venulações de calcita oblíquas ao plano de foliação.	67
Foto 44: Mármore calcítico mostrando as duas foliações existentes (Sn e Sn+1), perpendiculares entre si.	68
Foto 45: Fotomicrografia do mármore calcítico com granulação fina com fraturas e venulações preenchidas por calcita.	68
Foto 46: Fotomicrografia do mármore calcítico dobrado em contato com a filito.	68
Foto 47: Cristais de dolomita mostrando sua geminação (nicóis cruzado).	69
Foto 48: Clastos facetados de dolomita em meio a matriz também de dolomita.	69
Foto 49: Material brechado, constituído por cristais de dolomita na matriz e nos clastos.	69
Foto 50: Fotomicrografia de mármore calcítico com granulação fina (nicóis cruzado).	70
Foto 51: Fotomicrografia do mármore dolomítico. Observar a diferença de granulação entre as fotos 50 e 51 (nicóis cruzado).	70
Fotos 52 e 53: Fotografias de amostras de mão referentes as fotomicrografias acima visualizadas. Na foto 52 observa-se o mármore calcítico com granulação fina e na foto 53 mármore dolomítico com granulação média/grossa.	70
Foto 54: Contato entre o material brechado (dolomítico) e o não brechado (calcítico).	70
Foto 55: Material conglomerático.	71

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 01: Resultado dos teores químicos dos filitos do entorno. _____	47
Tabela 02: Resultado dos teores químicos dos mármorees do entorno. _____	47
Tabela 03: MgO X CaO dos mármorees da mina _____	73
Tabela 04: Resultados químicos das amostras dos mármorees calcíticos (26 amostras). _	78
Tabela 05: Resultados químicos das amostras dos mármorees dolomíticos _____	78
(22 amostras). _____	78
Tabela 06: Difratoqramas reunidos das amostras dos mármorees calcíticos. _____	79
Tabela 07: Difratoqramas reunidos das amostras dos mármorees dolomíticos _____	80
Tabela 08: Resultados químicos das amostras dos metaconglomerados. _____	80
Tabela 09: Difratoqramas comparativo dos mármorees calcítico e dolomítico. _____	82

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 01: Histograma e gráfico de correlação dos valores da variável CaO nos mármores calcíticos. _____	74
Gráfico 02: Histograma e gráfico de correlação dos valores da variável MgO nos mármores calcíticos. _____	74
Gráfico 03: Histograma e gráfico de correlação dos valores da variável SiO <sub>2</sub> nos mármores calcíticos. _____	75
Gráfico 04: Histograma e gráfico de correlação dos valores da variável CaO nos mármores dolomíticos. _____	76
Gráfico 05: Histograma e gráfico de correlação dos valores da variável MgO nos mármores dolomíticos. _____	76
Gráfico 06: Histograma e gráfico de correlação dos valores da variável SiO <sub>2</sub> nos mármores dolomíticos. _____	77

## SUMÁRIO

Agradecimentos	I
Resumo	II
Abstract	III
Listas	IV
<b>1- INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO REALIZADO/CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA</b>	<b>1</b>
<b>1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS</b>	<b>3</b>
<b>1.3 REVISÃO DA LITERATURA SOBRE DOLOMITIZAÇÃO</b>	<b>4</b>
<b>1.4 OBJETIVOS</b>	<b>8</b>
<b>1.5 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>8</b>
1.5.1 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DAS ANÁLISES REALIZADAS	10
1.5.2 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS	11
<b>2- GEOLOGIA REGIONAL</b>	<b>12</b>
<b>2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL</b>	<b>12</b>
2.1.1 FORMAÇÃO ÁGUA CLARA	12
2.1.2 FORMAÇÃO VOTUVERAVA	13
2.1.3 FORMAÇÃO CAMARINHA	14
2.1.4 GRANITO PASSA TRÊS	15
<b>2.2 CONTEXTO ESTRUTURAL</b>	<b>16</b>
<b>2.3 SEDIMENTAÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>3 - GEOLOGIA DO ENTORNO / ASPECTOS FISIAGRÁFICOS</b>	<b>21</b>
<b>3.1 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS</b>	<b>21</b>
<b>3.2 UNIDADES GEOLÓGICAS</b>	<b>24</b>
3.2.1 FORMAÇÃO ÁGUA CLARA	24
3.2.2 FORMAÇÃO VOTUVERAVA	26
3.2.3 GRANITO PASSA TRÊS	27
3.2.4 FORMAÇÃO CAMARINHA	27
3.2.5 DIQUES	29
3.2.6 ALUVIÕES	29
<b>3.3 GEOLOGIA ESTRUTURAL</b>	<b>30</b>
3.3.1 DIVISÃO DOS COMPARTIMENTOS	33
3.3.1.1 Compartimento 1	37

3.3.1.1.1 Regime Dúctil	37
3.3.1.1.2 Regime Rúptil	37
3.3.1.2 Compartimento 2	38
3.3.1.2.1 Regime Dúctil	38
3.3.1.2.2 Regime Rúptil	39
3.3.1.3 Compartimento 3	40
3.3.1.3.1 Regime Dúctil	41
3.3.1.3.2 Regime Rúptil	41
3.3.1.4 Compartimento 4	43
3.3.1.4.1 Regime Dúctil	43
<b>3.4 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA</b>	<b>44</b>
<b>3.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA</b>	<b>46</b>
<b>4- GEOLOGIA DA MINA RIO BONITO</b>	<b>53</b>
<b>4.1 UNIDADES LITOLÓGICAS</b>	<b>53</b>
<b>4.2 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL</b>	<b>56</b>
4.2.1 REGIME DÚCTIL	56
4.2.2 REGIME RÚPTIL	62
4.2.3 RELAÇÃO DOS CONTATOS CAO X MGO	64
<b>4.3 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA</b>	<b>67</b>
<b>4.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA</b>	<b>71</b>
<b>5- RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>81</b>
<b>6- CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>86</b>
<b>7- REFERÊNCIAS</b>	<b>91</b>

# 1- Introdução

## 1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO ESTUDO REALIZADO/CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

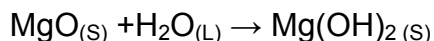
O projeto desenvolvido está inserido no programa DIMICAL (Distrito Mineiros de Calcário do Paraná), que tem como escopo aprimorar o conhecimento dos aspectos geológicos, a natureza e as implicações econômicas das rochas metacalcárias no Paraná.

Este projeto é fruto de uma parceria criada entre a Companhia de Cimentos Itambé e a UFPR/ LAMIR-DIMICAL (Departamento de Geologia). Ao longo do tempo a empresa tem apresentado uma necessidade do conhecimento no que diz respeito à variação dos teores de MgO nos mármores da mina Rio Bonito, bem como a concepção da evolução da geologia estrutural, o que implica diretamente na abertura de novas bancadas e avanço das frentes de lavra, fatos estes que possibilitaram a criação desta parceria.

A empresa foi fundada em março de 1968 como empresa Itambé de Mineração Ltda e em 1970 teve homologada a aprovação para extração de calcário, tornando-se Cia. de Cimentos Itambé. Em dezembro de 1976 é realizada a expedição do primeiro saco de cimento. Atualmente a produção média da empresa é de 80 mil ton/mês de cimento, a extração da matéria prima é de 100 mil ton/mês, e a extração do material estéril, incluindo decapeamento e mármore com alto teor de MgO é 100 mil ton/mês. Este material vai diretamente para a pilha de rejeito (foto 01). Na foto 02 é observada uma vista parcial (atual) da mina Rio Bonito.

A localização aproximada destas frentes dolomíticas já existia, porém não era conhecida sua direção nem seu fator condicionante. Esta frente dolomítica de grande espessura gera quantidade significativa de rejeito e custos excessivos para seu desmonte e remoção até o local onde é armazenado o material estéril.

O uso de calcário com alto teor de MgO causa desvantagens na hidratação do cimento:



O que provoca o aumento do volume (expansabilidade) e produz sais solúveis que enfraquecem o concreto quando exposto à lixiviação (diminui a resistência).



Fotos 01 e 02: Pilha de rejeito de calcário com alto teor de MgO (foto 01) e vista parcial da mina Rio Bonito (foto 02).

A caracterização mineralógica, química e petrográfica é de suma importância para a fabricação do cimento, pois ocorre a blendagem de materiais, entre eles: sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{FeO}_3$ ), magnésio ( $\text{MgO}$ ), álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}_3$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) e sulfatos ( $\text{SO}_4$ ).

A dissertação se desenvolve, a partir do mapeamento de semidetalhe (escala 1:10.000) da área da mina Rio Bonito e seu entorno, análise das estruturas deformadoras predominantes e análises químicas, petrográficas e mineralógicas. Com este mapeamento e a concepção da deformação superimposta foi possível fornecer subsídios para a compreensão dos fatores condicionantes para o enriquecimento dos teores de  $\text{MgO}$ .

A hipótese levantada para este trabalho é que o mármore com alto teor de  $\text{MgO}$  tenha sofrido processo de dolomitização e seu fator controlador é estrutural. Porém é necessário identificar se a dolomitização tem origem primária ou secundária e o fator controlador não tenha origem sedimentar, a partir da sedimentação ou diagênese.

A área mapeada agrupa rochas Proterozóicas do Grupo Açungui e Setuva, formações Água Clara e Votuverava, bem como o maciço granítico Passa Três, além de rochas da Formação Camarinha, intrusões de rochas básicas (diques) e depósitos inconsolidados do Quaternário que ocorrem esparsamente no entorno da mina.

## 1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

A área estudada possui aproximadamente 30Km<sup>2</sup>, situa-se na porção leste do Estado do Paraná, entre as coordenadas UTM 632.070/7195.000 e 638.000/7200.000, no município de Campo Largo, aproximadamente 55 km de Curitiba (figura 01).

A principal via de acesso à área é a rodovia BR 277 “Rodovia do Café”, sentido Curitiba-Ponta Grossa. A partir de Curitiba, após a entrada da cidade de Campo Largo, aproximadamente a 32Km a oeste desta, na altura do início da serra de São Luis do Purunã, está situada a fábrica da Cia. de Cimentos Itambé. A partir da fábrica, toma-se uma estrada secundária com revestimento de concreto e percorre-se cerca de 20Km até chegar à Mina Rio Bonito.

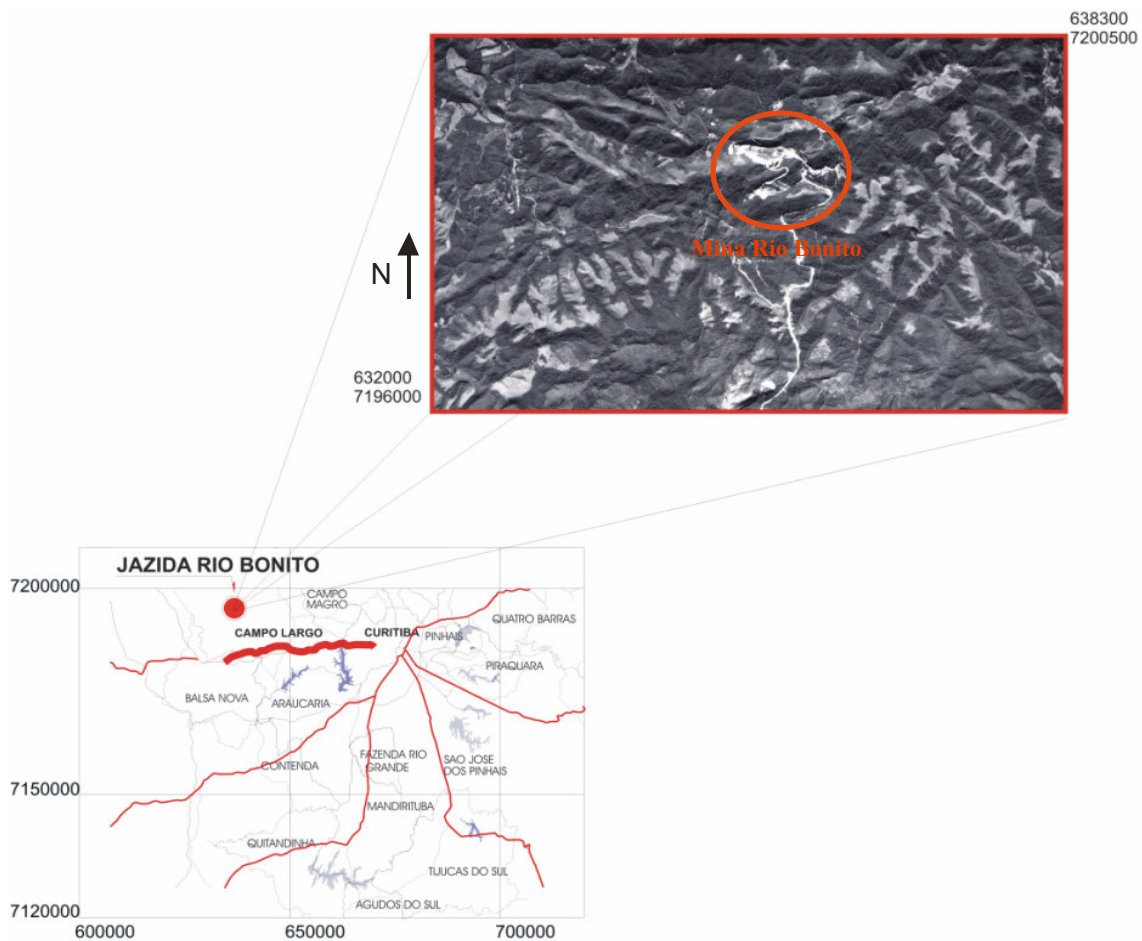


Figura 01: Mapa de localização com detalhe na área de estudo.

### 1.3 REVISÃO DA LITERATURA SOBRE DOLOMITIZAÇÃO

Existem diversas discussões na literatura a respeito de dolomitização. A maior delas é determinar se a dolomita é de origem "primária" (precipitada diretamente da água do mar), ou origem "secundária" (pós-deposicional). Nenhuma solução universal para este problema ainda existe. Pesquisas a respeito requerem uma combinação de estudos biológicos e termodinâmicos. Os argumentos são complexos e confusos. A maioria dos cientistas acreditam que as dolomitas sejam de origem secundária.

A dolomita é um carbonato de cálcio e magnésio, sendo representada pela seguinte fórmula química:  $2 \text{CaCO}_3 + \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + \text{Ca}^{2+}$ , onde tem-se 30.4% CaO, 21.7% MgO e 47.7% CO<sub>2</sub>.

As rochas carbonáticas são originadas de precipitações químicas e/ou bioquímica, formando concentrações de carbonatos de cálcio nas formas de aragonita ou calcita que dão origem aos calcários. Por ação metassomática ou pela ação de soluções ricas em magnésio, os calcários são parcialmente ou totalmente convertidos em dolomitos com o passar do tempo, embora não possa ser descartada a existência de dolomitos sin-genéticos (primários) (Suguió, 2003).

Segundo Shinn (1998), a dolomita primária apresenta valores de O<sup>18</sup>, que seriam 6 a 10% superiores aos da calcita e aragonita, formadas de modo semelhante. Entretanto, a comparação dos valores de O<sup>18</sup> da dolomita e da calcita de diferentes proveniências tem mostrado cifras muito semelhantes entre si. O que poderia sugerir que a maior parte das dolomitas resultaria da substituição da calcita em estado sólido, herdando a composição de O<sup>18</sup> daquele mineral sem qualquer modificação. Este fato também poderia ser corroborado pela maior frequência de dolomitos que calcários em carbonatos de idades mais antigas.

A cristalografia da dolomita é trigonal, pertencendo à classe romboédrica, e apresentando hábito de mesmo nome. A clivagem é perfeita, com ângulo de 73° 45', a dureza varia de 3,0 a 4,0 na escala de Mohs e a densidade relativa é de 2,85g cm<sup>3</sup>. Comumente tem cor rósea, porém pode ocorrer na cor branca, cinzenta, verde e castanha. A dolomita e a calcita reagem com o ácido clorídrico (HCl), sendo a reação da calcita rápida, e da dolomita lenta.

Dolomitas primárias são oriundas de cristais que ocorrem por precipitação em água por nucleação espontânea. Para que isto ocorra há algumas condições especiais, sendo elas altas temperaturas, pH baixo e salinidade 6 a 8 vezes superior à salinidade normal.

Processo de dolomitização é um processo natural pelo qual o calcário calcítico transforma-se em dolomito, ocorre pela substituição parcial do carbonato de cálcio original por carbonato de magnésio ( $MgCO_3$ ). O fenômeno diagenético de dolomitização parece progredir com o tempo. Os carbonatos dolomitizados são mais freqüentes entre as rochas carbonáticas mais antigas.

Amaral (1975) estudou o processo de dolomitização em brechas intraformacionais na Formação Irati, onde os locais pesquisados apresentavam suposto ambiente de deposição da formação. Apresentavam salinidade elevada, pH alcalino, número restrito de espécies viventes e relevo suave. O autor acredita que as altas salinidades associadas a condições topográficas especiais seriam responsáveis pela evaporação intensa e conseqüente concentrações dos solutos. Precipitando-se o cálcio sob forma de sulfatos, os íons de magnésio perduraram em solução, e com isso, aumenta a relação Mg/Ca.

Porém, a salinidade elevada é imprescindível tanto quanto a existência de poros que permitem a percolação das soluções concentradas mais densas que fazem deslocar a água conata menos densa, cujo papel é o de remover o cálcio formado na reação dolomitizante. Quanto maior a salinidade do ambiente, maior a concentração dos íons de MgO e menor o índice de vida. (Amaral 1971).

Badiozamani (1972) citado por Amaral (1975), defende que a mistura da água do mar com água doce ativa a substituição de cálcio pelo magnésio.

Segundo Hatch e Rastall (1952), citado em Amaral (1975) o dolomito secundário exibe romboedros formados pela recristalização da calcita atacada por soluções magnesianas, sendo diminuído o volume, dando origem a uma porosidade secundária, que pode chegar a 15%.

Com a recristalização, as estruturas primárias são obliteradas e o processo costuma ser irregular e relacionado a fraturas e/ou falhas, ou ainda à

estratificação, pelo fato constituírem-se em zonas propícias à percolação dos fluidos.

Amaral (1971) no estudo da geologia e petrologia da Formação Irati no estado de São Paulo, afirma que na parte basal desta formação há indícios claros de dolomitização primária, devido ao fato de apresentar fragmentos esparsos de dolomita em uma matriz mais calcítica do que dolomítica. O autor cita que uma dolomitização secundária certamente teria afetado tanto a matriz como clastos/fragmentos.

Segundo Tucker (1990), cinco categorias dos modelos de dolomitização são correntemente avaliadas para a interpretação de dolomitas antigas, sendo o modelo evaporítico (*sabkha*), refluxo de escoamento (*seepage-reflux*), zona de mistura meteórica-marinha (*mixing zone*), soterramento (*burial*) e modelos de água do mar (*seawater models*). Cada um envolve um diferente tipo de fluido de dolomitização e ambiente geológico, mas há uma sobreposição entre os modelos (figura 02).

Diversos modelos poderiam aplicar-se em um ambiente ou para uma formação, e o produto de um modelo em particular pode não ser muito distintivo petrograficamente ou geoquimicamente. Antes de um dos modelos poder ser aplicado de forma confiável, é necessário ter um conhecimento da paleogeografia e fácies, contexto e distribuição, petrografia e geoquímica das dolomitas.

A maioria das dolomitas formadas atualmente é de ambientes evaporíticos, sendo os depósitos do tipo *sabkha*. Crostas dolomíticas ocorrem atualmente em planícies de maré como a de *Andros Island* e Bahamas, por exemplo. São vários os exemplos de dolomitas em ambientes evaporíticos antigos em planícies de maré, como os depósitos da Formação Lower Carboniferous Aghargrania, Irlanda.

O modelo de refluxo de escoamento (*seepage-reflux*) envolve a geração de fluidos de dolomitização através da evaporação de lagoas e a descida desses fluidos em sedimentos subjacentes dos carbonatos.

A lógica no modelo da zona de mistura meteórica marinha (*mixing-zone*) é que é mais fácil precipitar dolomita de uma solução diluída, de modo que se a água do mar com sua relação Mg/Ca de 5:2 for misturada com água meteórica

(freshwater), a relação alto Mg/Ca é mantida, mas alguns dos obstáculos cinéticos devido à força iônica elevada da água do mar são removidos.

Evidências de precipitação de dolomita durante o modelo de soterramento (burial) podem ser encontradas em muitas rochas dolomíticas, mas se as formações inteiras de carbonatos podem ser dolomitizadas na profundidade é ainda uma matéria de debate. O principal mecanismo defendido neste modelo é a compactação das rochas carbonáticas e a expulsão de fluidos ricos em  $Mg^{+2}$  na borda e na plataforma carbonática.

No modelo de dolomitização em água do mar para uma plataforma carbonática, as correntes marinhas são bombeadas juntamente com um refluxo de águas hipersalinas provindas de lagoas e com as correntes de maré da linha de costa. É nesta zona que se precipitariam as dolomitas.

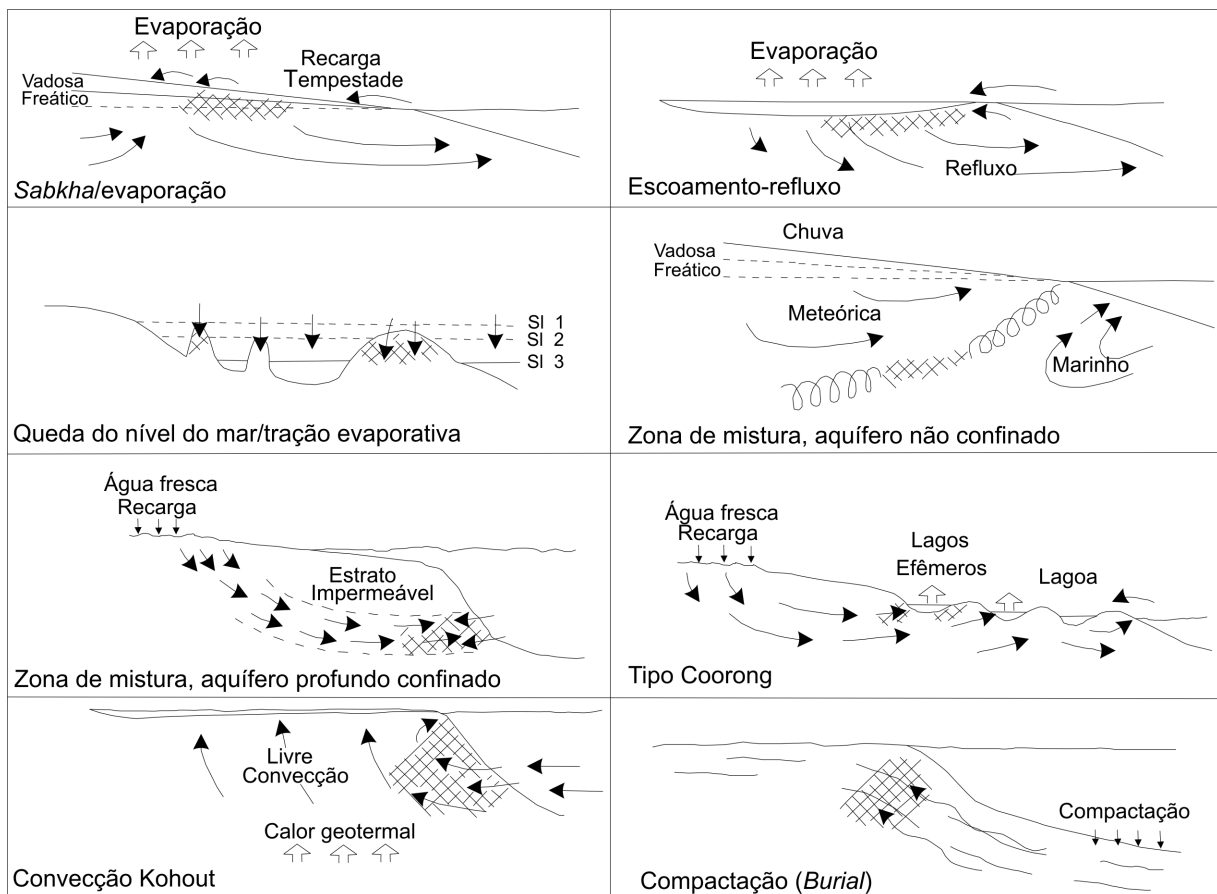


Figura 02: Modelos esquemáticos de dolomitização. (Modificado de Tucker, 1990).

Na maioria dos modelos discutidos por Tucker (1990), a fonte de  $Mg^{+2}$  é a água do mar e os problemas cinéticos na precipitação de dolomita de água do mar normal são superados diluindo ou evaporando esta dolomita. Os modelos de dolomitização em água do mar, o *seawater models*, fornecem um mecanismo para dirigir o fluido dolomitizante através dos sedimentos carbonáticos.

## 1.4 OBJETIVOS

O principal objetivo proposto é fornecer informações no que diz respeito aos mármores da mina Rio Bonito, determinar os fatores controladores da variação de MgO, visando subsidiar futuro planejamento de lavra e abertura de bancadas, ou seja, a tomada de decisão com base em informações geológicas.

Com base no objetivo principal, pretende-se:

- ✓ Compreender a geologia estrutural, petrográfica e mineralógica para poder identificar as principais direções e deformações das estruturas, bem como a direção dos vetores de enriquecimento dos teores de MgO com o intuito de determinar o possível fator que os controla;
- ✓ Subsidiar conhecimento para possível orientação da exploração da matéria prima para fabricação do cimento;
- ✓ Contribuir com informações a respeito dos litotipos referentes ao Grupo Açungui e demais unidades aflorantes.

## 1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os meios empregados na obtenção das informações foram divididos em duas etapas. A primeira refere-se à aquisição de dados através de levantamento bibliográfico e trabalhos de campo para levantamento dos dados pontuais.

Na etapa inicial foram fornecidos pela empresa mapa geológico estrutural regional na escala 1:100.000, mapas dos furos de sondagem, que foram digitalizados na escala 1:1000. Porém estes mapas de furos de sondagem continham informações não especificadas, fato que limitou sua interpretação.

Inicialmente foi realizado um levantamento bibliográfico a fim de se conhecer os trabalhos anteriores desenvolvidos na área, ou que abordam o método proposto neste trabalho.

Para a confecção da base topográfica foram utilizadas folhas da COMEC cujas articulações são SG-22-X-C-III-4-NO-D e SG-22-X-C-III-4-NO-F, na escala 1:10.000.

A partir das fotografias aéreas na escala 1:25.000 (ITC-PR) com os números 50029,50030,50031,50032 cujo vôo foi realizado no ano de 1980, foi traçada rede de drenagem com o objetivo de facilitar a separação da área em zonas homólogas, por intermédio da individualização das diferentes litologias existentes, grau de declividade do relevo e também características estruturais. O traçado da rede de drenagem foi realizado considerando os cursos d'água desde os afluentes menores até o curso principal (rio Açungui). O resultado final destas informações gerou o mapa fotogeológico e mapa dos compartimentos estruturais que serviu de base para nortear as atividades de mapeamento de campo.

Após a compilação dos mapas confeccionaram-se mapas temáticos, como MDE (Modelo Digital de Elevação) e hipsiométrico, gerados a partir da vetorização das curvas de nível das folhas topográficas no programa AutoCad. Para a interpolação e construção dos mapas gerados foi utilizado o programa ArcGis 8.2 (Esri).

As atividades de campo consistiram na descrição dos afloramentos, aquisição de medidas estruturais, coleta de amostras para confecção de lâminas delgadas para análise petrográfica e amostras para realização das análises laboratoriais (análises químicas e mineralógicas realizadas por métodos de fluorescência de raios X e difração de raios X).

Para as difrações de raios X foram realizadas 10 amostragens das rochas do entorno e 52 de dentro da mina e para as análises dos óxidos maiores, pelo método da fluorescência de raios X, foram coletadas 15 amostras do entorno e 52 de dentro da mina. As medidas estruturais no entorno totalizaram 385 medidas de foliação e 135 de fraturas, e para dentro da mina foram coletadas 630 medidas de

foliação e 68 medidas de fraturas. As lâminas delgadas confeccionadas para as descrições petrográficas foram num total de 12.

Após o término das atividades de campo e com a base de dados foram confeccionados o mapa geológico, mapa de pontos descritos e amostras coletadas. Feita a análise estrutural através dos diagramas estruturais, descrição das lâminas petrográficas e interpretação das análises de difração de raios X e fluorescência de raios X.

### **1.5.1 Método de avaliação das análises realizadas**

As amostras de filitos, no entorno da mina e mármore, na mina, escolhidas para a realização das análises laboratoriais foram coletadas todas “*in situ*” com a menor quantidade possível de alterações, a fim de se evitar interferência nos resultados avaliados.

Os teores foram obtidos a partir de amostras previamente britadas, quarteadas e pulverizadas. Posteriormente confeccionadas as pérolas, e a perda ao fogo.

A análise de fluorescência de raios X tem como objetivo determinar a composição química da rocha através dos 10 elementos maiores. O aparelho é um fluorescência da marca Philips, modelo PW 2400 com tubo de Rh. Esta análise é realizada por comprimento de onda sendo uma técnica analítica destrutiva utilizada para identificar e quantificar as concentrações dos elementos presentes em amostras sólidas, em pó ou líquidas. O espectrômetro de fluorescência de raios X mede a intensidade de transições eletrônicas das camadas K, L e M dos elementos químicos presentes nas amostras quando irradiada com raios-X.

A difração de raios X é uma técnica versátil, não-destrutiva que revela detalhes de informações sobre a composição química e a estrutura cristalográfica dos compostos naturais e de materiais. O aparelho utilizado foi um difratômetro da marca Philips, modelo PW 1830, ânodo de Cu( Cu  $K\alpha_1$ ), gerador de tensão e corrente ajustados para 40Kw e 30mA. Seu banco de dados é o JCPDS e o software é High Score- Panalytical.

A estrutura cristalina de um cristal é uma distribuição tridimensional regular (cúbica, ortorrômbica e outra qualquer) dos átomos no espaço. Estes são arranjados de modo que dêem forma a uma série de planos paralelos separados de um outro por uma distância  $d$ , que varie de acordo com a natureza do material. Para todo o cristal, os planos existem em um número de orientações diferentes - cada uma com seu próprio  $d$ -afastamento específico.

Quando um feixe de raios-X monocromático com comprimento de onda  $\lambda$  é projetado em um material cristalino em um ângulo  $\theta$ , a difração ocorre somente quando a distância viajou pelos raios refletidos dos planos sucessivos difere por um número completo  $n$  dos comprimento de onda.

Variando o  $\theta$  do ângulo, as condições da lei de *Bragg* são satisfeitas por  $d$ -afastamentos diferentes em materiais policristalinos. Baseado no princípio da difração de raios X, uma riqueza da informação estrutural, física e química sobre o material investigado pode ser obtida.

### **1.5.2 Método de avaliação dos dados estruturais**

A análise estrutural é realizada para a compreensão da deformação das rochas e seu arcabouço/arranjo. É necessária para a identificação das principais estruturas deformadoras das rochas visto que as aberturas das bancadas dependem da orientação das camadas. É também através de direções preferenciais de algumas “frentes” que se dá a orientação dos vetores de enriquecimento dos teores de MgO nos mármorees.

As atitudes estruturais foram coletadas por meio de bússola com notação *Clar*. Foram obtidas medidas da foliação principal  $S_n$  (clivagem ardosiana),  $S_{n+1}$  (clivagem de crenulação) quando presentes, fraturas (falhas e/ou juntas) e eixos de dobras. No interior da mina também foram tomadas atitudes das zonas brechadas e acamamento sedimentar. Posteriormente foram tratadas e interpretadas no programa Stereonet (v. 2.46) para obtenção dos diagramas de roseta, contorno de máximos pólos e Shimidt Lambert (hemisfério inferior).

## 2- Geologia Regional

### 2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A área corresponde à faixa de Dobramentos Apiaí, originalmente definida por Hasui *et al.* (1975). Esta faixa de dobramentos, juntamente com o Maciço Joinville, constitui a porção central da província da Mantiqueira de Almeida *et al.* (1977).

O quadro geológico da evolução estratigráfica, tectônica e colunas propostas para o Pré-Cambriano do Estado do Paraná, encontram-se ainda muito confusos. Para uma melhor compreensão serão abordadas e citadas apenas as formações aflorantes na área.

#### 2.1.1 Formação Água Clara

A Formação Água Clara consiste em metacalcários, mármore e metamargas com intercalações de filitos, xistos e quartzitos, além de metapelitos, metapsamitos, metacherts e metavulcânicas.

Devido à falta de dados geocronológicos esta formação possui posicionamento estratigráfico variável.

Pontes (1982) descreve a Formação Água Clara principalmente bordejando ou formando estreitas faixas sobre o maciço granítico Três Córregos. Divide a formação em fácies vulcano-sedimentar e carbonática. Caracteriza a sedimentação, e considera em estágio plataformal raso, com deposição sob influência clasto-química, inclusive com exposição subaérea (fácies Serrinha), até um estágio marinho profundo, com espessos depósitos clásticos, acompanhados de extrusão magmática básica (fácies São Silvestre).

Segundo Reis Neto e Soares (1987), a Formação Água Clara possuiria um ciclo anterior à deposição do Grupo Açungui (Sn-1). Posteriormente, a foliação (Sn) teria sido gerada em evento de retrometamorfismo paralela a Sn-1.

Kops (1994) questiona a existência de um ciclo de deposição distinto da Formação Água Clara com as do Grupo Açungui, podendo ser uma sub bacia com características próprias, porém, coexistindo temporalmente com as demais formações. Afirma que é constituída de duas seqüências informais: São Silvestre

(xistos, quartzitos, metamafitos, metacherts e formações ferríferas) e -Serrinha (cálcio-xistos, muscovita-xistos, mármore puros e impuros e quartzitos). A primeira seqüência reflete a deposição em lâmina de água relativamente profunda, com contribuição vulcânica, enquanto que a segunda seqüência depositou-se em lâmina de água mais rasa, como indicam seus depósitos carbonáticos relativamente puros.

Fassbinder (1996) afirma que a Formação Água Clara é composta por uma unidade clástica basal seguida por uma unidade carbonática (metamargas) muitas vezes mineralizada em Cu, Pb, Zn e Au, e uma nova unidade clástica composta por metargilitos e matesiltitos intercalados por anfibolitos. Coloca-se na base do Grupo Açungui e por análise de isótopos  $O^{18}$  indica uma idade máxima inferior a 1.3 G.a.. Comparando às outras formações do grupo Açungui, propõe uma sedimentação para esta unidade em uma sub-bacia distinta.

### **2.1.2 Formação Votuverava**

A unidade Votuverava foi dividida em conjuntos litológicos propostos por Fiori (1990 e 1993), sendo conhecidos por: Bromado – filitos, quartzitos e metaconglomerados; Coloninha – meta-arenitos, metasiltitos, metaconglomerados; e Saivá – filitos, mármore e metamargas. Os contatos são definidos por falhas de cavalgamento.

A sedimentação da Formação Votuverava inicia com a deposição do conjunto Bromado, que caracteriza um diamictito depositado em corpo aquoso, próximo as geleiras (metaconglomerados polimícticos mal selecionados), e pode estar relacionado a extensas glaciações ocorridas no Proterozóico Superior. Segue-se a deposição do Conjunto Coloninha em um sistema de turbiditos de águas profundas, contendo unidades da seqüência de *Bouma*, com abundantes truncamentos de camadas. No interior da bacia em águas profundas e calmas e ambiente restrito, com passagem gradual em condições de maior estabilidade foi depositado o Conjunto Saivá. Considerou a Formação Água Clara como uma unidade distinta abaixo do Grupo Setuva, apenas representaria uma tectonofácies do Complexo “Pré-Setuva”, devido à origem da Falha da Antiforma do Setuva.

Fiori (1992) caracteriza a Formação Votuverava e os metassedimentos que ocorrem entre as falhas do Morro Agudo e da Lancinha.

Kops (1994) apresenta duas seqüências informais: - Bromado (metasiltitos, metargilitos, metaconglomerados) e – Coloninha (metargilitos e metarenitos). A deposição desta formação ocorreu provavelmente em *canyons* plataformais, como indicam seus depósitos turbidíticos. As águas seriam pouco agitadas, mas ainda em ambiente de plataforma rasa, evidenciada pela laminação rítmica e pela granulometria dos sedimentos. Ainda questionou a existência de um ciclo de deposição distinto da Formação Água Clara com as do Grupo Açungui, podendo ser uma sub-bacia com características próprias, porém coexistindo temporalmente com as demais formações.

A Formação Votuverava para Petri e Suguio (1969) foi depositada em ambiente marinho, típico de plataforma.

Daixt *et al.* (1983) afirmaram que a deposição da Formação Votuverava ocorreu em um ambiente com variações do nível de energia, marcado por transgressões e regressões.

Silva e Venuzzo (2001), citados em Venuzzo (2001), caracterizaram os depósitos sulfetados de Cu, contendo Ag e Zn, encontrados em rochas metacarbonáticas da Formação Votuverava como do tipo *Missisipi Valey*.

### **2.1.3 Formação Camarinha**

A Formação Camarinha foi proposta por Muratori e Fuck (1966), designando um pacote de sedimentos pré-devonianos encontrados a oeste de Curitiba, nos limites do primeiro Planalto Paranaense com a Escarpa de São Luis do Purunã, durante o mapeamento geológico das folhas Colônia Quero-Quero e Campo Largo.

Popp (1972) divide a Formação Camarinha em uma fácies conglomerática superior constituída por conglomerados e arcóseos conglomeráticos médios e uma fácies síltica constituída por siltitos com intercalações de arcóseos médios.

Fiori (1994) afirma que esta formação não exhibe metamorfismo e recristalização e, mostra-se dobrada em estruturas do tipo anticlinal e sinclinal.

Estes dobramentos devem estar relacionados com falhas e à estabilização das rochas do Grupo Açungui no cambro-ordoviciano.

Soares (1987) descreve a Formação Camarinha como constituída na parte basal por conglomerados e corpo de arenitos conglomeráticos imaturos, gradacionais para siltitos, e lamitos avermelhados a cinza claro de leques aluviais e deltáicas. A parte intermediária é constituída por lamitos e arenitos, com gradação e seleção regular na parte basal, culminando com lamitos e siltitos de pró-leque. No topo ocorrem conglomerados lamíticos e polimíticos.

Segundo Moro (2000) a Formação Camarinha consiste em conglomerados, brechas, arenitos, siltitos, lamitos e ritmitos imaturos, médio a mal selecionados, distribuídos em quatro unidades intercaladas e com contatos transicionais entre si, das quais duas apresentam natureza mais conglomerática, e duas natureza mais siltico-arenosa.

Estas unidades foram depositadas por processos como fluxos gravitacionais subaéreos a subaquosos, correntes de turbidez, *sheet-floods* e processos atuantes em frentes deltáicas, comuns em leques progradantes e retrogradantes de ambientes costeiros (fandeltas).

As áreas-fonte dos sedimentos são provenientes pelas formações Água Clara, Votuverava e Capiru, e pelos complexos Atuba e Três Córregos.

Esta bacia foi deformada pela zona de cisalhamento Transcorrente da Lancinha.

#### **2.1.4 Granito Passa Três**

Soares e Góis (1987), por meio de análise e interpretação de lâminas delgadas, relatam alguns aspectos e feições hidrotermais sofridas pelas rochas que constituem o granito. Sugerem uma provável composição quartzo-sienítica, de origem hídrica crosta-manto. Segundo os autores, as alterações hidrotermais apresentadas pelo granito parecem ter obedecido a uma seqüência progradacional, formando fases minerais de mais alta temperatura, seguida de uma fase retrogradacional, com paragêneses de mais baixas temperaturas. O hidrotermalismo progradacional teria sido devido essencialmente a fluidos magmáticos responsáveis, neste caso, pela potassificação, silicificação e

greisenização presentes na área. Na fase retrogradacional, as transformações são reconhecidas principalmente pela propilitização, seguida de argilização. Neste caso é admitido que as alterações hidrotermais foram promovidas por fluidos de natureza predominantemente meteórica.

## 2.2 CONTEXTO ESTRUTURAL

A área situa-se dentro de uma faixa orogênica polifásica que abrange rochas desde o Mesoproterozóico (Grupo Setuva), Neoproterozóico (Grupo Açungui, Formação Camarinha e complexos graníticos-granodioríticos porfiríodes sin-orogênicos) ao Eopaleozóico (granitos tardi e pós-orogênicos, Grupo Castro) (Soares e Góis 1987).

Está inserida no contexto do cinturão de cisalhamento Ribeira, formado por vários conjuntos de terrenos complexamente deformados. Tais terrenos metassedimentares são alóctones ou parautóctones e estão inseridos em modelo de colisão do tipo cordilheirano, em um provável sítio tectônico de bacia retro-arco. Neste contexto os conjuntos geológicos presentes na faixa de cisalhamento pertencem a duas bacias sedimentares superpostas geradas em momentos distintos da história proterozóica local. O primeiro estiramento e afinamento crustal gerou a Bacia Setuva e após seu fechamento, no Mesoproterozóico, quando foram geradas as estruturas e as rochas ligadas a um primeiro evento de deformação, houve um segundo estiramento no Neoproterozóico, quando foi gerada a Bacia Açungui. O fechamento desta segunda bacia foi o responsável pelos eventos deformacionais posteriores. Ali são observadas rochas metamórficas que foram submetidas pelo menos três fases de deformação (Fiori *et al.*, 1987; Fiori 1990), intrudidas por corpos graníticos de dimensões variadas.

A articulação e o contato de cada faixa de terreno entre si se faz normalmente por grandes discontinuidades crustais, ligadas à falhas de cavalgamento e transcorrente, em regime transpressional-transtensional. Estas últimas normalmente controlam o contato tectônico das grandes discontinuidades geológicas da faixa, bem como boa parte dos contatos graníticos locais.

Segundo Fiori (1993) a evolução estrutural do Grupo Açungui é bastante complexa, resultado da superposição dos três eventos principais de deformação, principalmente o Sistema de Cavalgamento Açungui que causou generalizada aloctonia do Grupo e gerou uma série de estruturas geneticamente associadas, tais como falhas de cavalgamento, dobras-falha, xistosidade paralela a So, foliação oblíqua a So e lineações do tipo (a) e (b) no conjunto (SCA) (Fiori *et al.* 1987 e 1992).

Segundo Fiori *et al.* (1987) o evento deformacional intermediário que atingiu o Grupo Açungui refere-se a um dobramento generalizado das estruturas anteriormente formadas, podendo ser verificado em afloramento ou na escala de mapas regionais. Todas as dobras têm o seu eixo com direção média nordeste-sudoeste e os planos axiais têm posição vertical e subvertical, permitindo a dedução de que foram geradas por um esforço compressivo de direção NW-SE. Entretanto, pode-se ainda especular com duas hipóteses distintas para a origem desse esforço. A primeira leva a considerar o esforço como de segunda ordem, relacionado ao evento tectônico causador das falhas transcorrentes. A segunda hipótese leva a considerar a origem das dobras por atuação de um esforço compressivo de primeira ordem, de direção NW-SE, sem vinculação com o evento de transcorrência.

O Sistema Transcorrente é o terceiro evento gerando falhas com deslocamento principal horário na Falha da Lancinha (N55E), falhas sintéticas a N70E, falhas reversas e dobras subverticais com trend N30-50E oblíquas e escalonadas em relação ao falhamento da Lancinha, evidenciando o terceiro evento deformacional (Soares e Góis, *op. cit.*).

Um quarto evento rúptil tem sido reconhecido na região correspondendo a pequenos deslocamentos anti-horários na Falha da Lancinha (Scholl, 1981; *apud* Fiori 1985; Soares e Góis 1987). O registro deste evento está presente em fraturas distensionais em torno de N10-20E corresponde ao rebaixamento pós-colisional da região.

Salamuni (1995) sugere a adoção do nome Zona de Cisalhamento Lancinha-Cubatão para o Lineamento da Lancinha, em função de seu caráter

regional, afetando tanto o embasamento como a cobertura com características dúcteis e rúpteis. Ocasionalmente a formação de dobras escalonadas com direção N05-35°E/S00°-30°W e posteriormente, eixos gerados pela reativação sinistrógira na direção E-W e uma terceira fase de dobramentos provavelmente de idade Paleozóica.

Diversos eventos magmáticos registrados na região afetaram, em parte, os complexos metamórficos e seqüências sedimentares presentes na área. No final do Proterozóico, entre 650 e 700 m.a. ocorreram as intrusões batolíticas Três Córregos e Cunhaporanga, de composição granodiorítica e granítica, sucedida pela suíte quartzo-monzonítica (600 m.a.) e posteriormente (550 m.a.) a suíte de sienogranitos alcalinos, em corpos alongados de direção NE, associados a antififormes. Finalmente, há 480-550 m.a, ocorreram as intrusões de granitos alcalinos e peralcalinos pós-orogênicos (Soares e Góis 1987).

## 2.3 SEDIMENTAÇÃO

Petri e Suguio (1969) estudando as seqüências metassedimentares do sul de São Paulo, consideram as formações Votuverava e Capiru penecontemporâneas e definem os ambientes de sedimentação como localizados próximos à linha de costa em águas rasas de uma bacia marinha, exceto para Formação Itaiacoca que teria sido depositada em ambiente continental.

Pires (1990) estudando as seqüências Betari e Furnas-Lageado do Grupo Açungui na região entre Apiaí e Iporanga que correspondem à parte da Formação Votuverava clássica no Estado do Paraná, caracteriza os ambientes deposicionais formadores e a paleogeografia das mesmas. A seqüência Betari é marcada por um episódio transgressivo onde ocorre uma deposição gradacional inversa, típica de uma seqüência retrogradacional em leques submarinos profundos. Os depósitos rudáceos psamíticos da base correspondem à deposição em canais e lobos, e o topo da seqüência é caracterizado por metarritmitos depositados por fluxo turbidíticos de baixa densidade. O ápice da elevação do mar coincide com o final da deposição desta seqüência, ocorrendo uma estabilização da bacia caracterizada por um intervalo de não deposição. Logo após, é depositada a

Formação Furnas-Lageado que inclui metacalcários calcícticos impuros bandados intercalados por calciofilitos, metarenitos, metassiltitos e filitos sericíticos que correspondem a uma sequência progradacional associada a um episódio regressivo.

Fiori (1993) afirma que a deposição dos metassedimentos da Bacia Açungui ocorreu em um mar epicontinental parcialmente penecontemporâneo. Considerando as estruturas sedimentares preservadas, e sua distribuição e variação lateral. Este autor propõe os seguintes ambientes deposicionais: na Formação Capiu o conjunto Juruqui marca o início da sedimentação, representando um sistema de leque deltaico com fácies de frente deltaica (quartzitos) e de prodelta (filitos e quartzitos). Segue-se o conjunto Rio Branco, depositado em ambiente marinho raso apresentando mármores com estruturas estromatolíticas, caracterizando uma costa carbonática com contribuição de biohermas e sofrendo ação de ondas e marés, onde as flutuações do nível do mar ocasionariam a intercalação de metapelitos e quartzitos. No interior da bacia foi depositado o conjunto Morro Grande em condições plataformais. No início, a sedimentação ocorreu em ambiente marinho raso com predomínio de carbonatos, passando gradativamente para águas mais profundas e calmas com depósito de metarritmitos e barras plataformais (quartzitos), periodicamente afetado por tempestades e representando o testemunho de uma transgressão marinha.

A sedimentação da Formação Votuverava inicia com a deposição do conjunto Bromado, que caracteriza um diamictito depositado em corpo aquoso, próximo as geleiras (metaconglomerados polimícticos mal selecionados), e pode estar relacionado a extensas glaciações ocorridas no Proterozóico Superior. Segue-se a deposição do Conjunto Coloninha em um sistema de turbiditos de águas profundas, contendo unidades da seqüência de Bouma, com abundantes truncamentos de camadas. No interior da bacia em águas profundas e calmas e ambiente restrito, com passagem gradual em condições de maior estabilidade foi depositado o Conjunto Saivá.

A Formação Antinha inicia com a deposição de turbiditos, representado pelo Conjunto Tacaniça. Para o interior da bacia ocorre o Conjunto Capivara,

depositado em ambiente de águas profundas pouco movimentadas e redutoras. Posteriormente, ocorre a deposição do Conjunto Vuturuvu, próximo ao arco magmático, em condições de maior instabilidade da bacia, com aporte periódico de grande quantidade de detritos por correntes de turbidez em águas profundas e redutoras, relacionadas ao início de atividades tectônicas que culminaram com o fechamento da bacia (Fiori 1993).

### **3 - Geologia do Entorno / Aspectos Fisiográficos**

O conjunto de rochas da área em estudo possui registro de processos geológicos que atuaram desde o Mesoproterozóico até o Quaternário. As rochas aflorantes na área são de baixo grau metamórfico, representadas predominantemente por metacalcários/ mármores calcíticos, filitos, quartzitos, granito e conglomerado. Secundariamente, ocorrem diques de rochas básicas e depósitos sedimentares inconsolidados (Anexo 03- mapa geológico e de pontos). A estratigrafia adotada neste trabalho é baseada em Soares (1987).

A região está inserida no Primeiro Planalto Paranaense e corresponde à região montanhosa do Açungui proposta por Maack (1968), caracterizada por um relevo profundamente recortado, de alta energia, com presença de cristas e vales profundos, resultantes da influência do entalhamento do rio Ribeira e seus afluentes.

O Primeiro Planalto Paranaense é uma extensa zona de eversão, limitada à oeste pela escarpa do arenito Furnas (Serra de São Luis do Purunã) e a leste pela Serra do Mar, sendo caracterizado por uma ampla superfície de erosão (Maack, *op cit*).

#### **3.1 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS**

A região é constituída por cristas e vales encaixados, como pode ser observado na foto 03. O relevo é condicionado por controle litoestrutural, com direções preferenciais NE-SW e NW-SE. O forte talhamento das drenagens, juntamente com o controle litoestrutural, definem as morfoestruturas e resultam em paisagens típicas dos morros e vales atuais.

As regiões que possuem cristas alongadas e mais elevadas são constituídas por quartzitos, os morros um pouco menos elevados e mais arredondados, com drenagens fortemente entalhadas são constituídos por filitos (foto 04). As regiões mais baixas são preferencialmente constituídas por mármores e algumas vezes conglomerados. Os conglomerados da Formação Camarinha estão controlados pelas falhas transcorrentes. Os diques de rocha básica constituem preferencialmente fundos de vales, exceto quando estes se encontram

sustentados por rochas de maior competência, neste caso então, encontram-se como cristas ou próximos a elas. A mais proeminente estrutura da região é o Morro do Descalvado, que possui as maiores altitudes e encontra-se a sul da área (figura 03 e foto 05), delimitado a norte pela falha transcorrente do Cerne e a oeste pelo corpo granítico Passa Três. Ocorrem ainda pequenas planícies aluvionares nas regiões mais planas.



Foto 03: Vista parcial da área, onde se observam em primeiro plano morros de filito, com a drenagem entalhada e em segundo plano, morro no topo constituído de quartzito.



Foto 04: Vista parcial da área, onde se observam em primeiro plano morros de filito, com a drenagem fortemente entalhada.

# Mapa hipsométrico da mina da Região de Rio Bonito

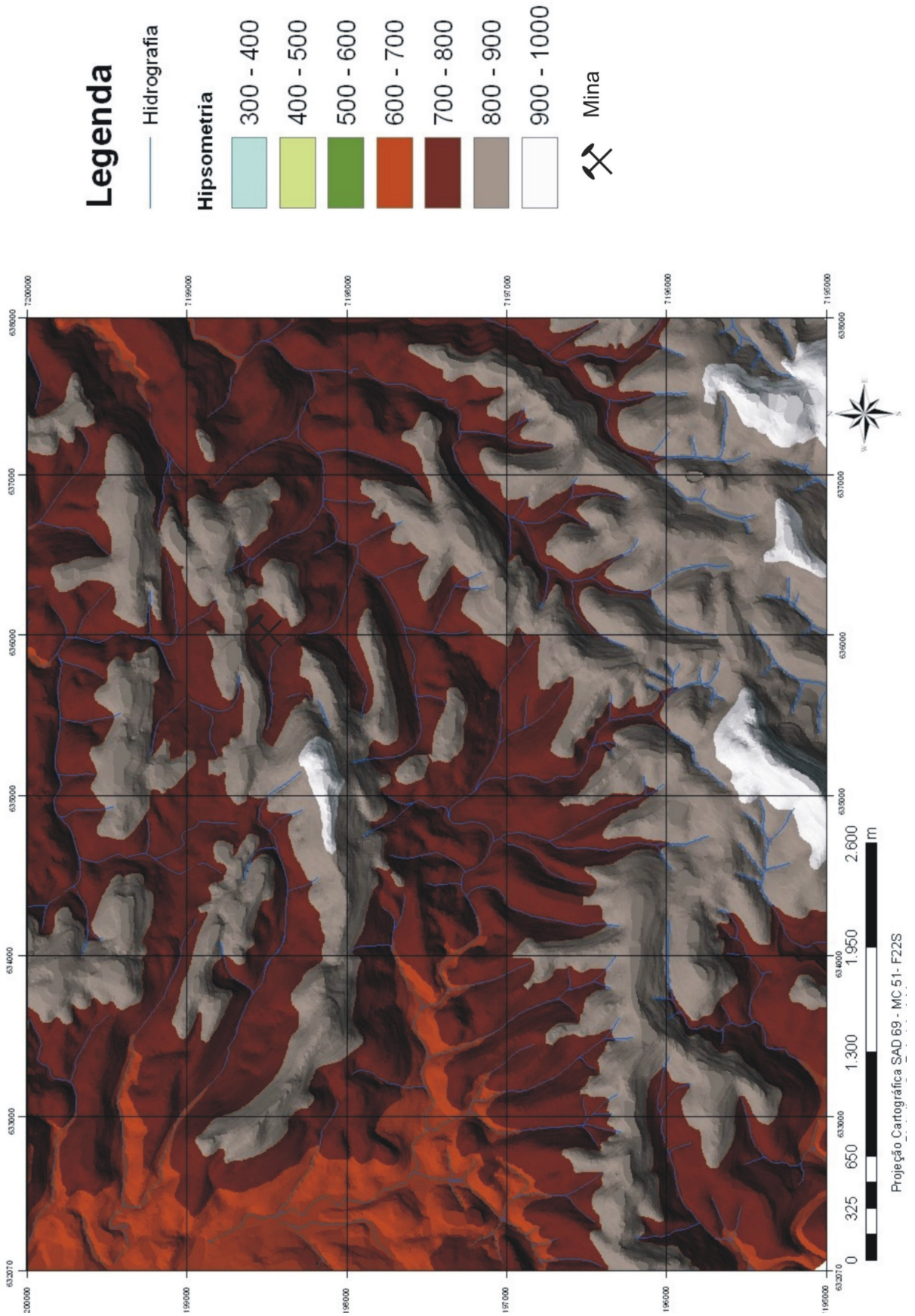


Figura 03: Mapa hipsométrico da região da mina Rio Bonito.



Foto 05: Vista parcial da área mostrando ao fundo o Morro do Descalvado (quartzito).

## 3.2 UNIDADES GEOLÓGICAS

Nos mapas de pontos e geológico podem ser observadas as unidades descritas neste capítulo (anexo 02).

### 3.2.1 Formação Água Clara

As rochas aflorantes desta unidade ocorrem na parte sul e centro-norte da área cerca de 55% da totalidade. São mármores calcíticos intercalados com lentes de metamargas e metamargas brechadas, além de quartzito (Morro do Descalvado). No quartzito ocorrem níveis conglomeráticos com gradação normal (foto 06), estruturas rúpteis do tipo *box work* (foto 07), intercalações de xisto, além de níveis com intercalação de areia e estruturas sedimentares preservadas (foto 08). É possível identificar o contato abrupto entre os litotipos (filito e quartzito).

Em alguns afloramentos de mármores (metacalcários) observa-se estrutura sedimentar preservada (fotos 09 e 09a).

Os filitos apresentam clivagem ardosiana marcante (foliação  $S_n$ ), penetrativa e anastomosada, com presença de dobras milimétricas a centimétricas com ângulos interflancos variando de fechados a cerrados, definindo clivagem de

crenulação ( $S_{n+1}$ ). Apresenta lineação de intersecção, e localmente ocorre uma lineação mineral, definida pela orientação das lamelas de sericita.

Localmente identifica-se padrão de redobramento da rocha (marga) do tipo “domo-bacia”, sigmóides de quartzo, espelhos de falha, com *steps* e estrias, veios de quartzo leitoso com fraturas perpendiculares à foliação  $S_n$  e fraturas preenchidas por material argiloso. Próximo às zonas de falhas ocorrem rochas brechadas.



Foto 06: Ponto 52, nível conglomerático no quartzito.

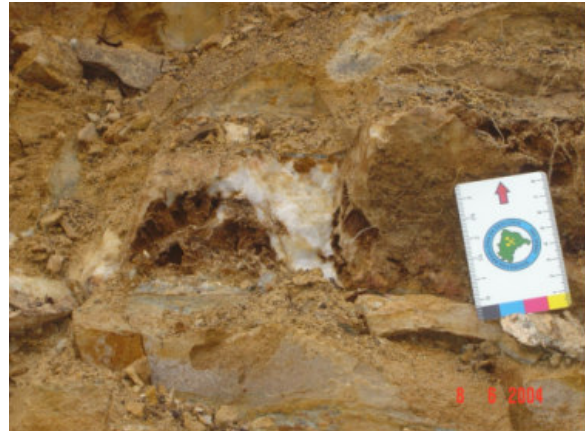


Foto 07: Ponto 36, estrutura rúptil do tipo “box work” no quartzito.



Foto 08: Ponto 69 Intercalação de níveis de areia e argila.



Foto 09: Bandamento do mármore com níveis de alteração diferenciados, em meio à foliação.



Fotos 09a: Ponto 86, mármore com bandamento composicional e plano de falha

### 3.2.2 Formação Votuverava

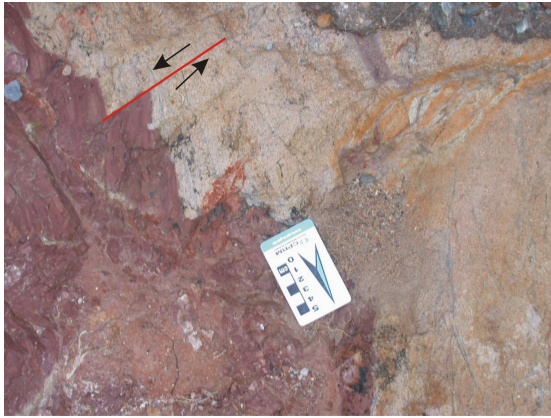
Os litotipos desta unidade afloram na parte central da área, cerca de 30% da totalidade. Ocorrem como variações de filito carbonático, cálcio-filito e principalmente sericita-quartzo filito, apresenta veios de quartzo de tamanho variado, fortemente fraturados e mais localmente veios de material argiloso. Localmente há gradação composicional da rocha (filito) para um quartzito.

Apresenta clastos de quartzo rotacionados (sigmóides) em meio à clivagem ardosiana (foliação  $S_n$ ). Esta foliação é penetrativa, fortemente crenulada e anastomosada, localmente presença dos pares  $S_c$  e  $S_s$ , contidos nesta foliação.

A foliação  $S_{n+1}$ , gerada a partir da crenulação da  $S_n$ , por vezes mascara a foliação  $S_n$ . Próximo às zonas de falhas, a foliação  $S_{n+1}$  é crenulada. As foliações  $S_n$  e  $S_{n+1}$  são perpendiculares entre si.

A norte da área de estudo, afloram metarritimitos (foto 10) com intercalações de níveis arenosos e argilosos com tamanho centimétrico.

Apresenta dobras fechadas (foto 11), e veios de material argiloso ondulados.



MRB 14\_1:Foto mostrando pequena falha com movimento anti-horário.

Fotos 10: Metarritmitos com intercalações de níveis arenosos e argilosos.



Foto 11: Filito com dobras fechada

### 3.2.3 Granito Passa Três

Aflora em pequena porção da área, no extremo SW , cerca de 5% do total. Esta unidade é balizada a norte pela falha do Cerne. Os afloramentos encontrados foram apenas os que estavam em contato com as rochas encaixantes.

Trata-se de granito aurífero com presença de estruturas do tipo *box work* e veios de quartzo rico em sulfetos.

Próximo ao contato com as rochas encaixantes, o granito é cataclástico, com xistosidade marcante e veios milimétricos de clorita, sem orientação preferencial.

### 3.2.4 Formação Camarinha

As litologias desta formação são condicionadas pelas falhas transcorrentes, com sentido aproximado ao longo do eixo E-W, ocupam cerca de 10% da área. Ocorrem sempre como uma mudança brusca na litologia (contato abrupto). Apesar da proximidade com as falhas transcorrentes, não é observado estiramento e/ou deformação nos seixos, apenas silicificação da rocha.

Os litotipos mais comuns são níveis conglomeráticos, sem orientação preferencial, onde os seixos são mal selecionados, polimíticos e tamanhos diversos, variando entre silte a seixos de feldspatos, quartzo, filito e quartzito (foto 12) em meio a matriz arcoseana (foto 13). Intercalados aos níveis conglomeráticos ocorrem siltitos arenosos de cor vermelho/amarronada – tijolo, ricos em muscovita. Afloram em regiões mais aplainadas e próximas as cotas mais baixas (foto 14).



Foto: 12: Conglomerado da Formação Camarinha.



Foto 13: Afloramento (conglomerado) da Formação Camarinha.



Ponto 92. Vista de cima do morro de quartzito, com vista para lado da Escarpa de São Luiz do Purunã. Observar no fundo do vale região mais aplainada (Fm.Camarinha).  
Foto 14: Vista de cima do Morro Alto para a Formação Camarinha.

### **3.2.5 Diques**

Afloram em toda a área mapeada e estão alinhados com direção preferencial NW, formando cristas ou fundo de vales. Geralmente são observados como blocos de tamanho métrico a decimétrico, de forma subarredondada, com decomposição esferoidal e capa de alteração. São de cor cinza escuro, granulação fina a média, localmente grossa, e são constituídos por plagioclásio, piroxênio e biotita. Constituem estrutura maciça e textura que varia de fanerítica equigranular a intergranular.

Os principais litotipos descritos correspondem a micro-gabros, gabros e microdioritos.

### **3.2.6 Aluviões**

Representados principalmente por sedimentos inconsolidados arenosos mal selecionados e argilosos, sem evidências de estratificação. Ocorrem nas cotas mais baixas e regiões planas.

### 3.3 GEOLOGIA ESTRUTURAL

Este capítulo é descrito com base nas interpretações dos dados estruturais e morfoestruturais obtidos a partir da fotointerpretação e morfoestruturas. São descritas as seguintes estruturas: fraturas (falhas ou juntas), dobras e foliações analisadas segundo o nível crustal em que se desenvolveram. Para a divisão da área, além da presença das descontinuidades, os compartimentos foram avaliados quanto à similaridade da estruturação tectônica e geomorfológica.

Segundo Fiori *et al.* (1987) a falha do Cerne é a mais significativa deformação rúptil da área, sendo uma componente sintética da falha transcorrente da Lancinha (Zona de cisalhamento Lancinha-Cubatão). Esta falha corta a área na direção aproximada E-W.

As grandes feições observadas são as falhas, caracterizadas por traços lineares, formas planares verticais e movimentos horizontais que cortam a área com *trend* preferencial de direção N35 a 45E e, subordinariamente, um *trend* para NW, com direções variadas (figura 04).

O padrão de deformação possui características heterogêneas já que há rochas deformadas próximas a rochas pouco deformadas, que em alguns casos apresentam estruturas sedimentares reliquiares.

As grandes zonas de deformação ocorrem próximas às zonas de falhas (faixas de cisalhamento) e estão relacionadas à competência/reologia das rochas e ao nível crustal.

Com a coleta dos dados estruturais de campo e fotointerpretação é possível interpretar as estruturas planares e lineares.

Ao sistema dúctil a dúctil-rúptil, estão associadas à foliação Sn (clivagem ardosiana), Sn+1 (clivagem de crenulação) pares de foliação Sc e Ss, dobras micro a macro escala.

A foliação Sn possui caráter penetrativo, bastante desenvolvida, paralela ou subparalela ao acamamento. Na maioria das vezes, esta foliação é uma clivagem ardosiana, caracterizada pela fina cristalização das lamelas de sericita. Nas rochas mais competentes esta foliação ocorre como uma xistosidade.

O anastomosamento desta foliação é marcante com o desenvolvimento de micrólitos. A forte componente de cisalhamento paralela ao plano de  $S_n$  desenvolve a foliação C, ao passo que a foliação S é confinada dentro dos micrólitos, onde esta não possui caráter de anastomosamento. Porém, ambas possuem contemporaneidade de desenvolvimento devido o mesmo grau de cristalização das sericitas.

A foliação  $S_{n+1}$  possui caráter local, sem anastomosamento nem penetratividade por toda a área. Em geral, a foliação  $S_{n+1}$  corta a foliação  $S_n$ , com ângulos variados, porém em alguns casos tende a encontrar-se paralela à  $S_n$ , impedindo a distinção entre ambas.

Para o sistema dúctil, as lineações encontradas são em sua maioria as do tipo “b”, relacionadas aos eixos das dobras. As dobras possuem ângulo interflancos de cerrados a suaves.

O sistema rúptil é associado às falhas e juntas.

As juntas não possuem padrão definido de direção do plano, apenas uma tendência na direção dos mergulhos para os quadrantes norte.

As falhas de uma forma geral têm sentido de movimento anti-horário e direções preferenciais concentradas entre N35 a 45E.

As medidas de juntas/fraturas são apresentadas sob forma de diagrama de rosetas, onde as medidas são representadas a direção da camada (*strike direction*).

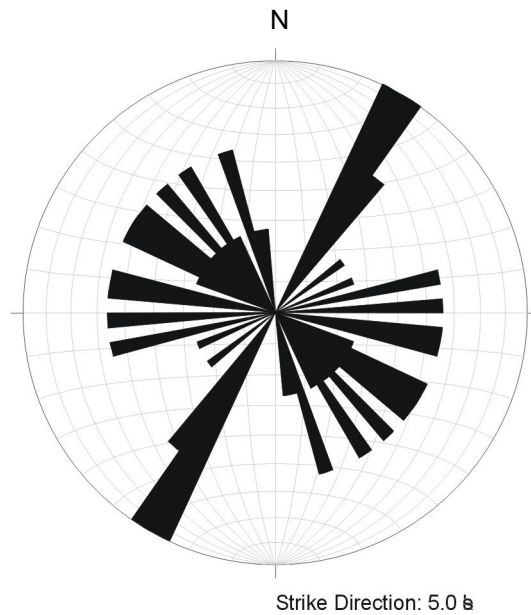


Figura 04: Diagrama de roseta das atitudes totais das falhas (total 36 atitudes).

Na figura 05 o diagrama de comprimento acumulado dos alinhamentos estruturais mostra que os maiores comprimentos estão próximos de E-W e secundariamente entre N30–50E e N50-70W. Para a frequência acumulada, verifica-se que apesar de uma maior heterogeneidade nas direções, há direções preferenciais EW e NS, e subordinariamente N45E e N40-60W.

Na figura 06 o diagrama de comprimento acumulado mostra os maiores comprimentos das lineações de relevo N80-90E. A frequência acumulada mostra a direção preferencial N45-90E, estando as maiores frequências direcionadas entre N80-90E e entre N60-70E.

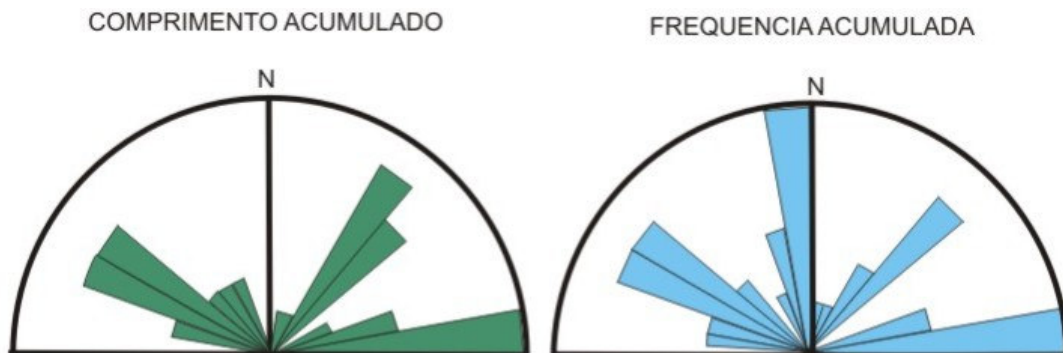


Figura 05: Diagrama de rosetas para comprimento e frequência acumulados dos alinhamentos de relevo.

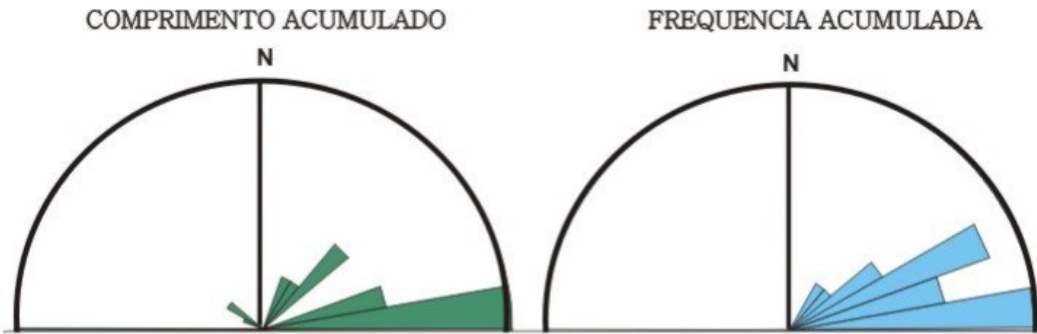


Figura 06: Diagrama de rosetas para comprimento e frequência acumulados das lineações de relevo.

### 3.3.1 Divisão dos Compartimentos

Para uma melhor compreensão e visualização da geologia estrutural a área foi dividida em quatro compartimentos/blocos, observados na figura 07. Os blocos são diferenciados entre si através da textura, padrão de relevo além de descontinuidades, similaridade tectônica e geomorfológica. Estão balizados por falhas, colocando-os em contato.

Nos estereogramas de Schimidt Lambert com todas as medidas de foliação  $S_n$  (sistema dúctil) é verificado que os pólos estão distribuídos em forma de guirlanda segundo o círculo maior com as concentrações marcantes com direção N30E/55 NW.

Observando o diagrama de rosetas para a direção da foliação  $S_n$  total, apesar da dispersão dos valores, fica evidente que a direção preferencial situa-se no quadrante NE, apresenta dispersão na moda predominante e varia apenas os ângulos do quadrante de mergulho (figura 08).

Figura 07: MDE (Modelo Digital de Elevação) com a divisão dos compartimentos.

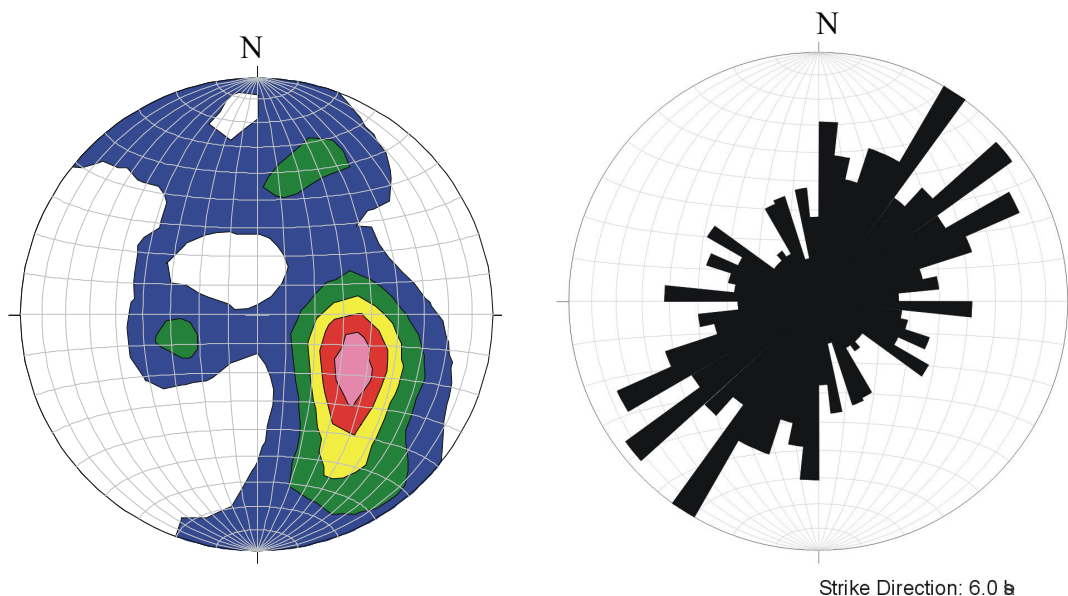


Figura 08: Representação do diagrama de contorno máximo dos pólos com atitudes totais da foliação  $S_n$  (total de 1017 atitudes).

O dobramento da foliação  $S_n$ , facilmente observado nos afloramentos, é representado por dobras milimétricas a decimétricas com ângulo interflancos fechados a cerrados e definem uma clivagem de crenulação  $S_{n+1}$ . A figura 09 com o diagrama de contorno máximo dos pólos mostra a maior concentração das medidas N60W/30-40 NE, e secundariamente N15-30W/25-35 SW. O diagrama de rosetas mostra a direção preferencial N-S, variando apenas o quadrante de mergulho.

Ainda existe uma deformação superimposta à foliação  $S_{n+1}$ , caracterizada pelo leve dobramento do eixo desta foliação, porém tal deformação possui caráter restrito.

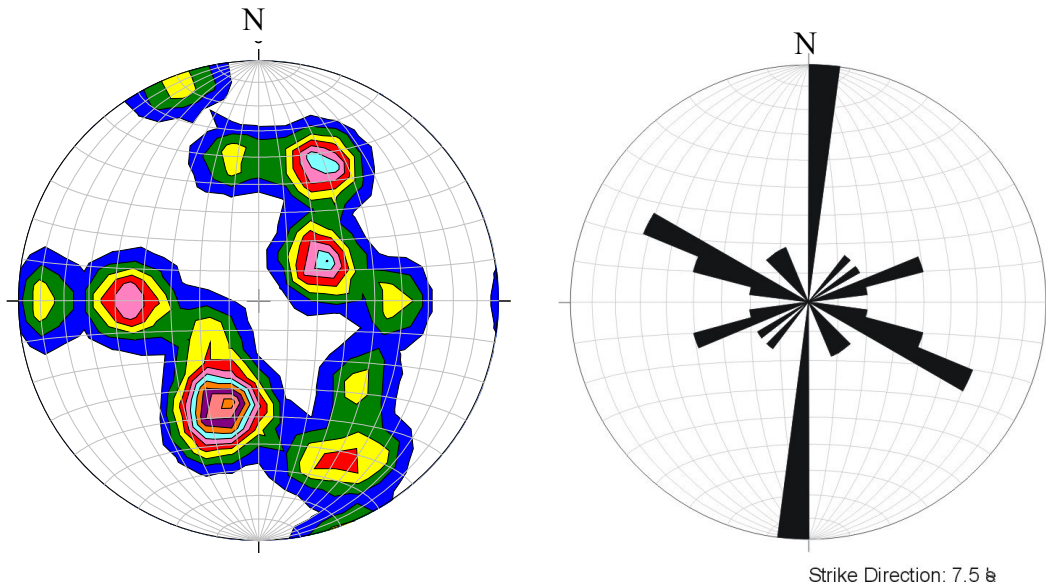


Figura 09: Diagrama de contorno máximo dos pólos e roseta das atitudes totais da foliação  $S_{n+1}$ .

No sistema rúptil estão relacionadas às falhas e os sistemas de juntas. O mapa hipsiométrico (figura) 03 mostra o comportamento das falhas de uma forma geral, e o sistema de juntas quando observado a partir de todas as atitudes estruturais não apresenta padrão definido, apenas grande dispersão nas modas predominantes (figura 10).

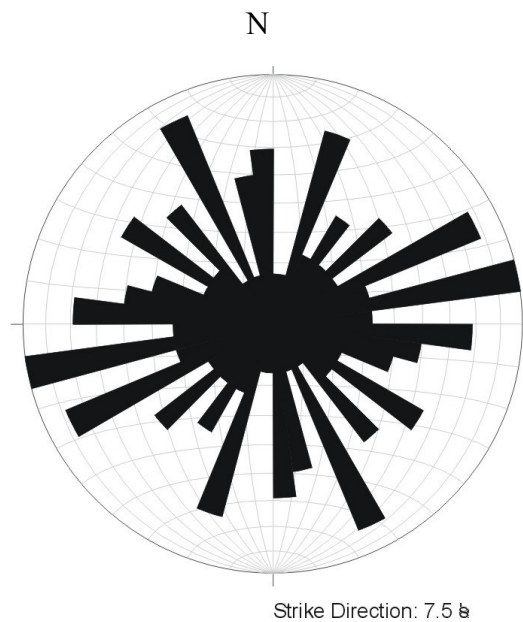


Figura 10: Diagrama de rosetas para as atitudes totais de juntas.

### 3.3.1.1 Compartimento 1

Localiza-se no extremo sul da área constituído pela Formação Água Clara e pelo Granito Passa Três. Delimitado pela falha transcorrente do Cerne.

#### 3.3.1.1.1 Regime Dúctil

Os diagramas estruturais (figura 11) mostram a direção preferencial das medidas de Sn N54E/45SE. As atitudes desta foliação tendem ao fechamento de uma dobra, com o ângulo interflancos aproximadamente de  $87^\circ$ , classificada como uma dobra aberta.

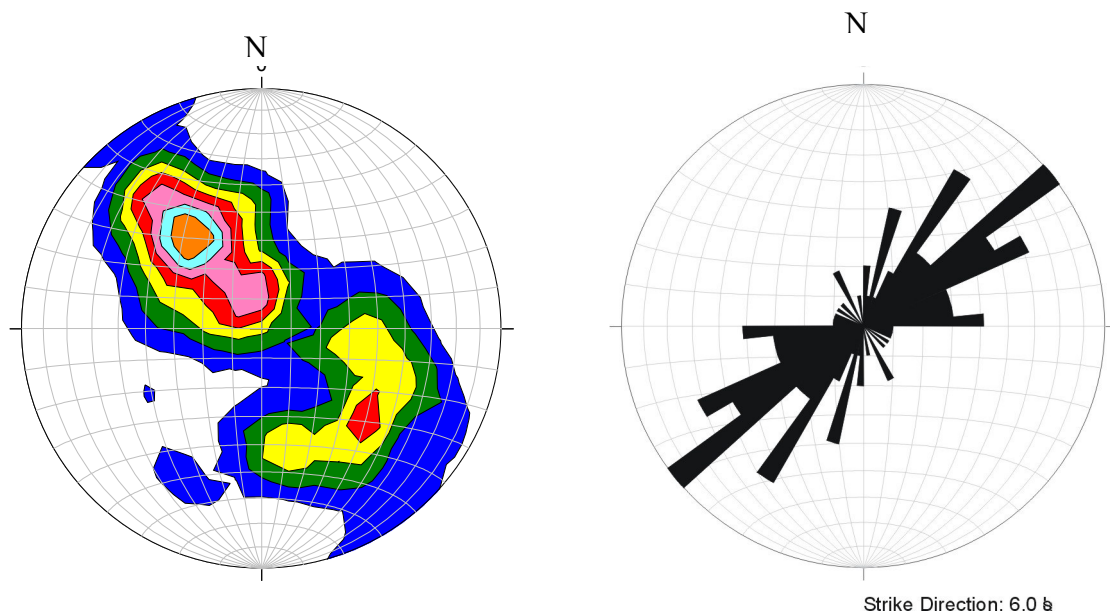


Figura 11: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas do compartimento 1. Total de atitudes 68.

#### 3.3.1.1.2 Regime Rúptil

O diagrama de rosetas indica direção preferencial das famílias de juntas para o quadrante NE/SE e quadrante NW/NE. Apesar da incidência de medidas para NW, as mais significativas são para o quadrante NE, observado na maior moda (figura 12).

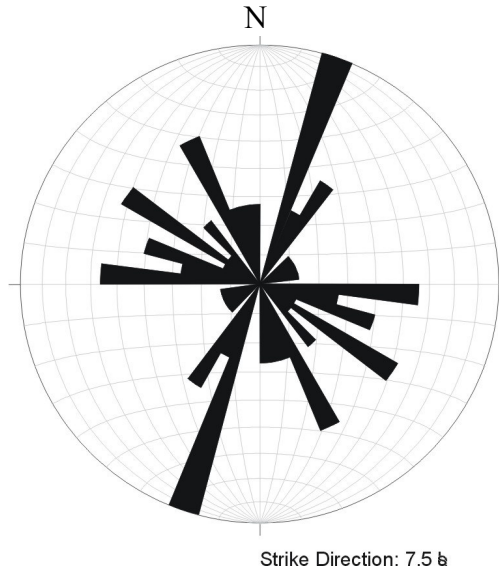


Figura 12: Diagrama de rosetas para as medidas totais de juntas do compartimento 1. (48 atitudes).

### 3.3.1.2 Compartimento 2

Formado pela Formação Votuverava e uma lente da Formação Camarinha. Delimitado por duas falhas transcorrentes: a sul a falha do Cerne e a norte uma provável componente desta mesma falha.

#### 3.3.1.2.1 Regime Dúctil

Por intermédio da análise do diagrama dos pólos e diagrama de rosetas (figura 13) interpretam-se os planos mais representativos N41E/ 60NW, seguidos de N57E/50 SE. Apresenta um padrão de dobramento com dobra do tipo fechada assimétrica, com ângulo interflancos de 66°.

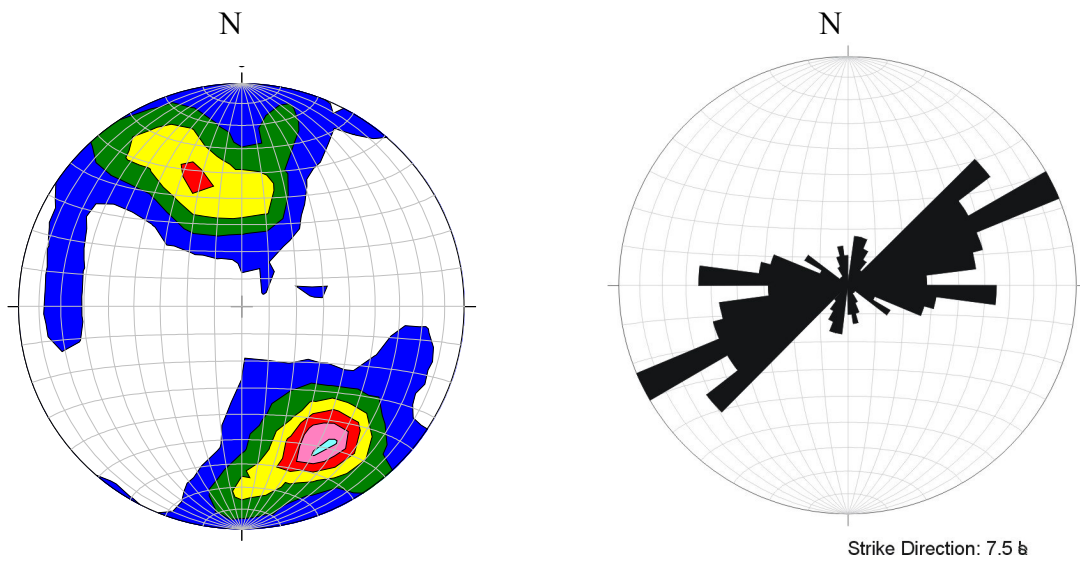


Figura 13: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas do compartimento 2. (164 atitudes).

### 3.3.1.2.2 Regime Rúptil

O diagrama de rosetas indica que há duas direções preferenciais das famílias de juntas estando posicionadas respectivamente para NW/NE e NE/SE (figura 14).

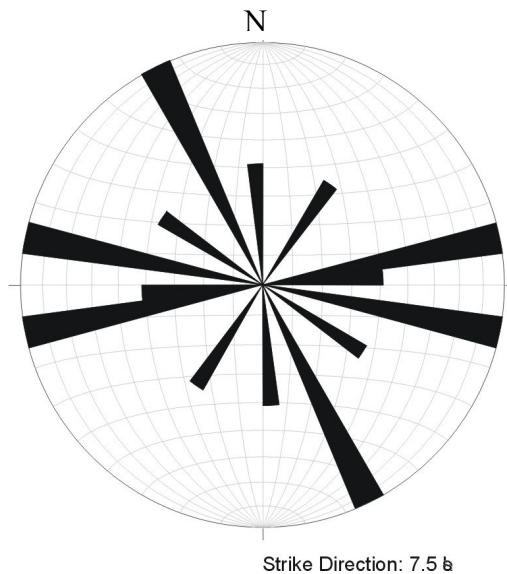


Figura 14: Diagrama de rosetas para as medidas totais de juntas do compartimento 2. (10 atitudes).

Apesar da pouca quantidade de medidas, observa-se que as direções das falhas são perpendiculares entre si (figura 15). O diagrama de rosetas mostra as falhas deste compartimento distribuídas entre os quadrantes NE e NW.

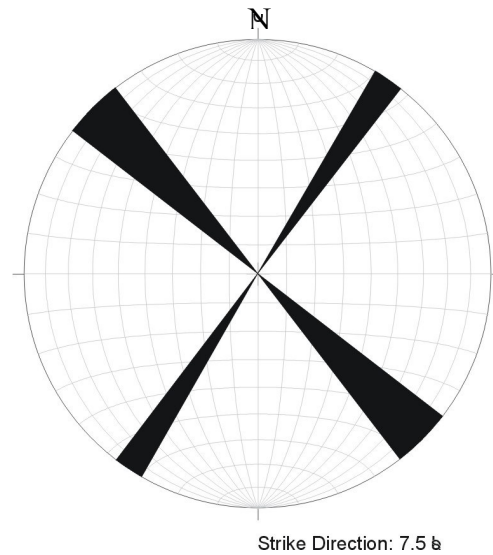


Figura 15: Diagrama de rosetas para as atitudes das falhas do compartimento 2 (total de 3 medidas).

### 3.3.1.3 Compartimento 3

Localizado na parte centro norte, onde existe a mina possui rochas da Formação Água Clara e algumas lentes da Formação Camarinha. A sul é delimitado por falha transcorrente e a norte por uma falha com movimento indefinido.

### 3.3.1.3.1 Regime Dúctil

Com a análise do diagrama dos pólos e representação em roseta (figura 16) o plano mais representativo é N20E/45 NW, e secundariamente N15W/30NE e N70W/65SW. Apresenta padrão de dobra tipo cônica.

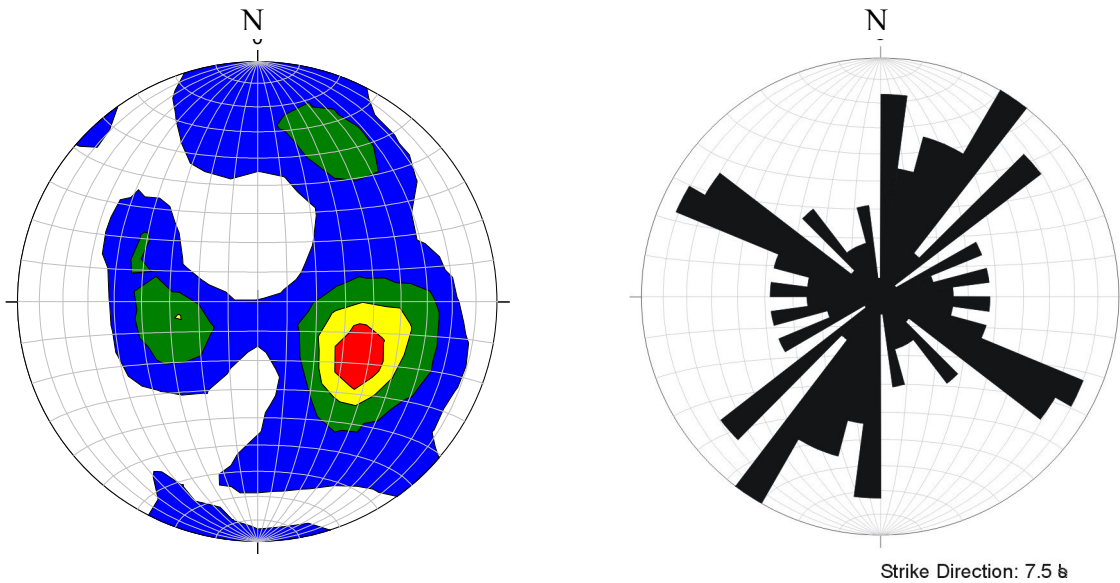
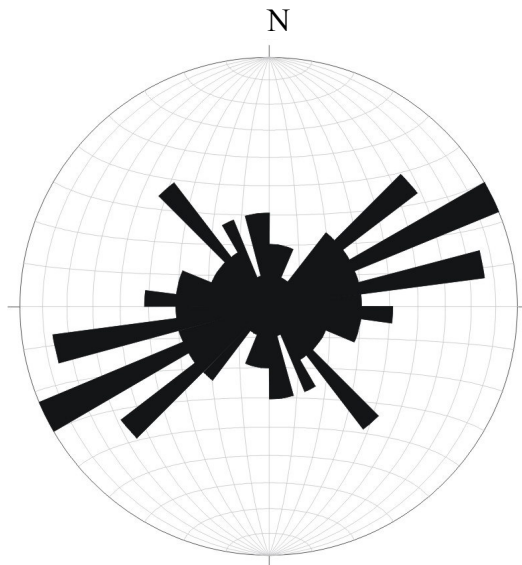


Figura 16: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas do compartimento 3 (145 atitudes).

### 3.3.1.3.2 Regime Rúptil

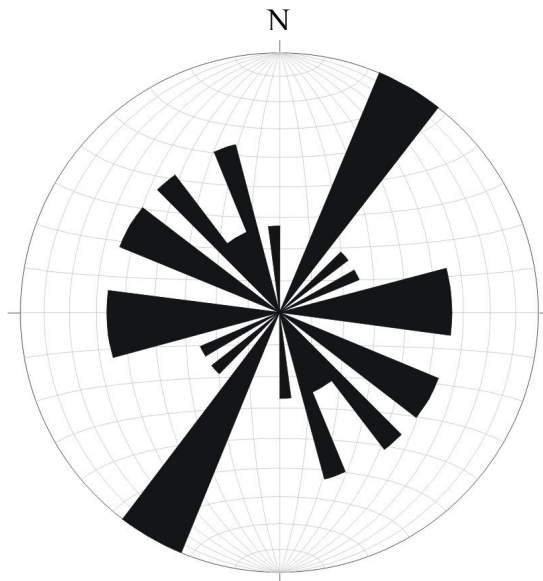
O diagrama de rosetas (figura 17) indica duas direções preferenciais das famílias de juntas, para o quadrante NE e subordinariamente NW.



Strike Direction: 7.5 b

Figura 17: Diagrama de rosetas para as medidas totais de juntas do compartimento 3 (74 medidas).

O diagrama de rosetas (figura 18) mostra que as falhas deste compartimento têm direção preferencial para N30-40E e subordinariamente para o quadrante NW com dispersão na moda predominante para este quadrante.



Strike Direction: 7.5 b

Figura 18: Diagrama de rosetas para as atitudes das falhas do compartimento 3

### 3.3.1.4 Compartimento 4

Localizado na porção norte é constituído pela Formação Água Clara e delimitado por um alinhamento de relevo marcante.

#### 3.3.1.4.1 Regime Dúctil

A representação em pólos e rosetas (figura 19) mostra o maior volume de planos com atitudes médias de N60E/subverticalizados, havendo uma segunda família com mergulhos de aproximadamente 45° NW. Esta direção preferencial da foliação Sn, também pode ser observada no diagrama de rosetas.

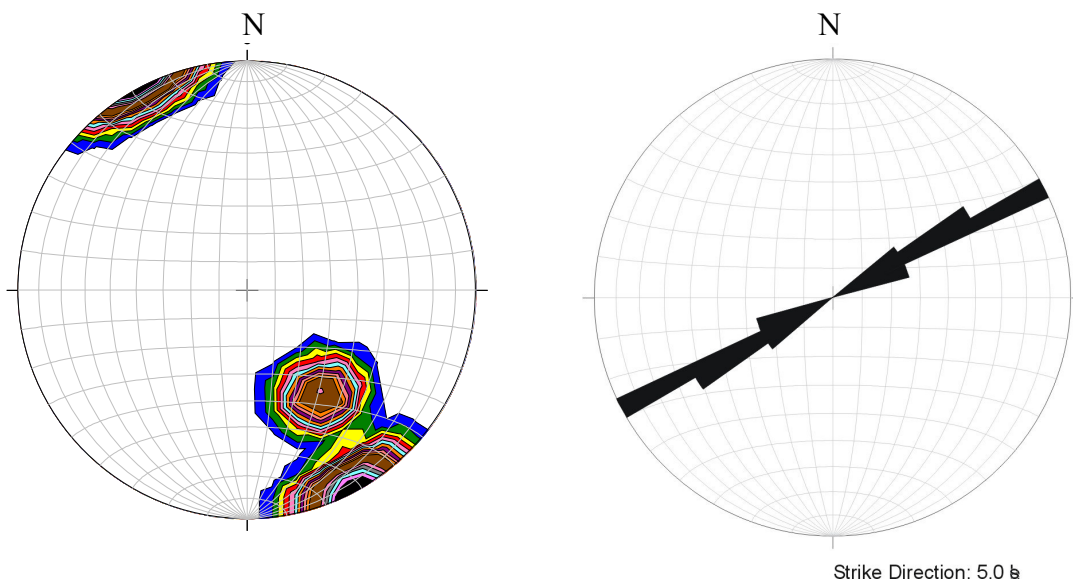


Figura 19: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas do compartimento 4. Total 8 atitudes.

Neste compartimento, apesar dos poucos afloramentos descritos, é identificado uma falha com sentido de deslocamento anti-horário e atitude N80W/40SW.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA

Na área, de uma forma geral, os litotipos associados são em sua maioria extremamente lenticularizados, com neocrystalização, principalmente de sericita.

Em alguns litotipos a deformação é descontínua e heterogênea, com preservação de estruturas sedimentares.

De acordo com Reis Neto e Soares (1987), a foliação principal, predominantemente desenvolvida nas rochas pelíticas, apresenta-se geralmente paralela ou subparalela a níveis de diferente composição, interpretados como acamamento sedimentar. Esta foliação é relacionada à tectônica de cavalgamento e sofreu uma deformação posterior caracterizada por dobramento heterogêneo. Como resultado deste último evento, há geração de uma segunda foliação (clivagem de crenulação) não havendo na maior parte das rochas cristalização e/ou recristalização de minerais.

A presença de porfiroclastos rotacionados, com sombra de pressão assimétrica sugere que estes litotipos sofreram um cisalhamento simples.

O filito do ponto 76 possui grãos de quartzo orientados na direção da foliação Sn (foto 15) em meio às lamelas de muscovita e sericita, com minerais dispostos em concentrações de níveis. Ocorre uma segunda geração de muscovita onde são dispostas perpendiculares à direção da xistosidade (foto 16). Ocorrem grãos de quartzo *boudinados* com sombra de pressão (foto 17).

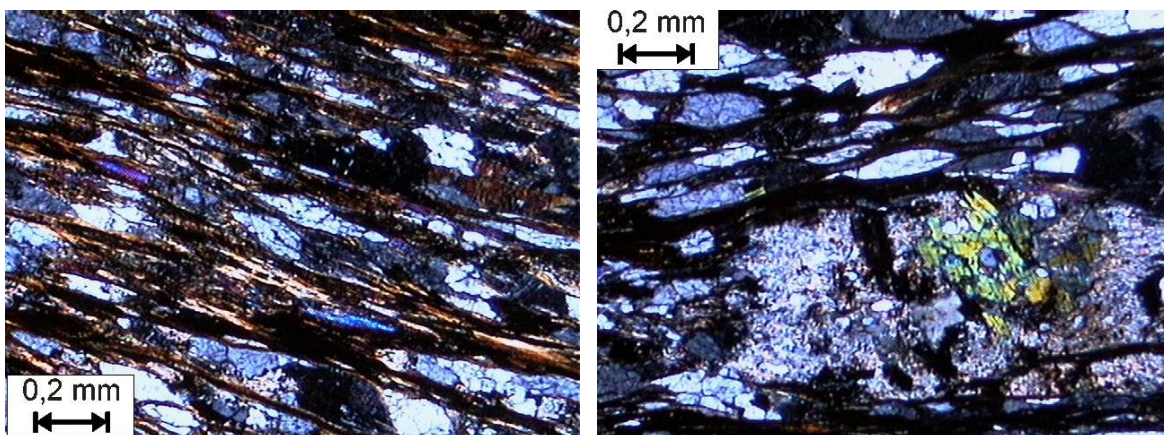


Foto 15 e 16: Sericita filito com grãos de quartzo orientados no plano da foliação. Na foto da esquerda é identificada uma segunda geração de muscovita perpendicular à foliação principal (nicóis cruzados).

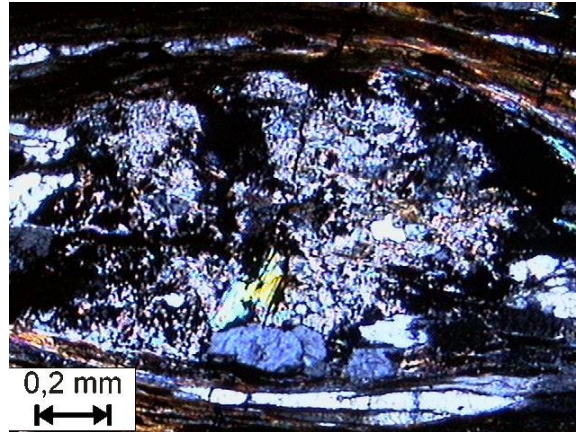


Foto 17: Sericita filito com grãos de quartzo boudinados, fraturados com sombra de pressão (nicóis cruzados).

O filito do ponto 85 possuem grãos de quartzo finamente moídos e lamelas de sericita, orientados paralelamente entre si, concordantes com a foliação  $S_n$ . Observam-se estruturas como porfiroclastos rotacionados (foto 18) com sombra de pressão assimétrica (foto 19), dobras em “*kink*” (foto 20) e dobras – falha (foto 21) com eixos verticalizados, típicos de zonas de transcorrência.

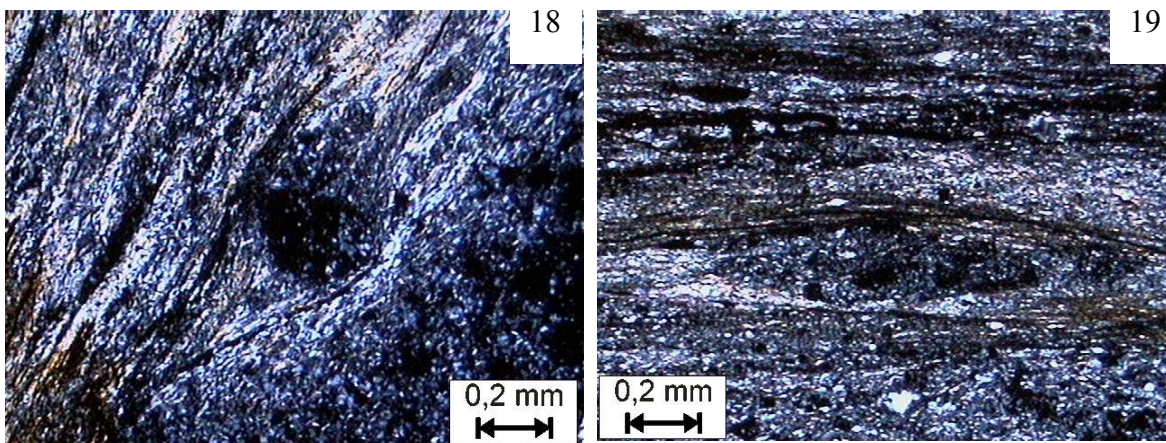


Foto 18 e 19: Estruturas com porfiroclastos rotacionados e com sombra de pressão (nicóis cruzados).

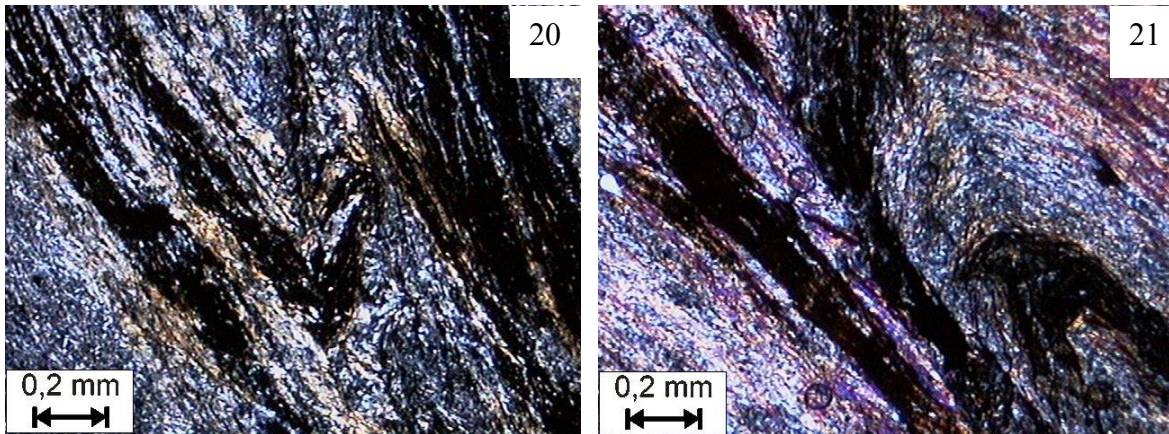


Foto 20 e 21: Estruturas com dobras em kink (em A) e dobras-falha (em B) (nicóis cruzados).

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

Os dados neste capítulo, adquiridos pelos métodos de difração de raios X e fluorescência de raios X são apresentados em forma de tabelas químicas e difratogramas, com objetivo de mostrar os teores dos elementos maiores contidos nas amostras dos litotipos aflorantes e sua mineralogia constituinte.

As análises químicas permitem quantificar os 10 óxidos maiores constituintes das rochas. Quando estes não perfazem uma somatória entre 99,5% a 100,5% é realizada uma análise semiquantitativa, onde são lidos também os elementos menores (traços), tais como Sr, Ba, E que não estão presentes na curva analítica e sua concentração é normalizada para 100%.

Nos difratogramas as cores grifadas em cada mineral correspondem aos “picos” dos gráficos (anexo).

Os primeiros relacionados são amostras de filitos localizados em diferentes locais da área, sendo estes:

- Ponto 21 A -Filito da Formação Votuverava
- Ponto21B - Filito Formação Votuverava
- Ponto 23 - Contato filito da Formação Votuverava com dique
- Ponto 27– Contato filito da Formação Votuverava com conglomerado da Formação Camarinha
- Ponto em frente à administração da mina - Conglomerado da Formação Camarinha

- Ponto 6B – Filito grafitoso da Formação Água Clara
- Ponto 6C – Plano de falha com filito grafitoso da Formação Água Clara
- Ponto 4 – Filito em contato com calcário impuro da Formação Água Clara

Tabela 01: Resultado dos teores químicos dos filitos do entorno.

Amostra	Ponto	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PF	Soma
Filito	21 A	66,70	13,88	8,07	0,09	0,43	4,89	0,90	0,35	0,08	1,17	3,40	100,06
Filito	21 B	69,58	11,57	7,53	0,10	0,30	6,10	0,40	0,04	0,04	1,33	2,67	99,68
Filito	23	64,16	17,59	7,60	0,01	0,48	3,93	1,40	0,20	0,07	0,83	3,30	99,62
Filito	27	65,69	15,74	0,77	8,74	0,01	0,46	3,86	0,62	0,13	0,11	3,60	99,36
Conglomerado	XX	54,83	9,27	3,82	12,35	2,64	2,05	1,24	0,08	0,13	0,49	1,50	100,46
Filito grafitoso	6C	11,62	0,73	0,87	79,81	6,40	0,12	0,05	0,10	0,08	0,03	0,10	99,91
Filito grafitoso	6B	78,13	3,85	7,54	0,06	0,32	0,73	0,01	8,40	0,17	0,13	0,23	99,57
Filito	4	66,03	20,25	6,02	0,41	1,62	3,51	0,01	0,08	0,11	0,68	0,10	99,82

Algumas amostras de mármore e margas do entorno foram coletadas

- Ponto 70 (292/04 A) Contato do mármore com o filito – Formação Água Clara
- Ponto 88 (292/04 B) Mármore brechado- Formação Água Clara
- Ponto 102 (311/04 A) Metamarga – Formação Água Clara
- Ponto 102 A (311/04 B) Metamarga- Formação Água Clara
- Ponto 31, 32, 33,34 e 35 (084/04F,G,H,I,J)- Mármore estrada atrás mina.

Tabela 02: Resultado dos teores químicos dos mármore do entorno.

Amostra	Ponto	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PF	Soma
mármore	70	4,32	0,92	0,29	52,95	0,26	0,22	0,01	0,01	0,04	0,05	41,73	100,79
Brechado	88	25,07	3,60	2,15	35,36	1,41	0,36	0,11	0,07	0,10	0,06	30,72	99,01
Metamarga	102	14,79	1,90	1,41	41,53	3,74	0,27	0,12	0,06	0,03	0,03	36,34	100,20
Metamarga	102 A	6,72	0,80	0,88	49,00	1,94	0,18	0,01	0,07	0,01	0,03	40,43	100,05
Mármore	31	11,16	1,21	0,24	48,15	0,50	0,39	0,09	0,00	0,06	0,02	37,73	99,55
Mármore	32	1,91	0,51	0,23	54,80	0,52	0,12	0,09	0,01	0,02	0,00	41,78	99,97
Mármore	33	2,95	0,68	0,34	53,77	0,41	0,12	0,09	0,01	0,02	0,02	41,59	99,98
Mármore	34	15,15	4,70	0,78	40,66	0,54	0,91	0,23	0,01	0,10	0,20	35,00	100,46
Mármore	35	1,12	0,20	0,22	31,04	20,71	0,04	0,09	0,00	0,01	0,01	45,62	99,05

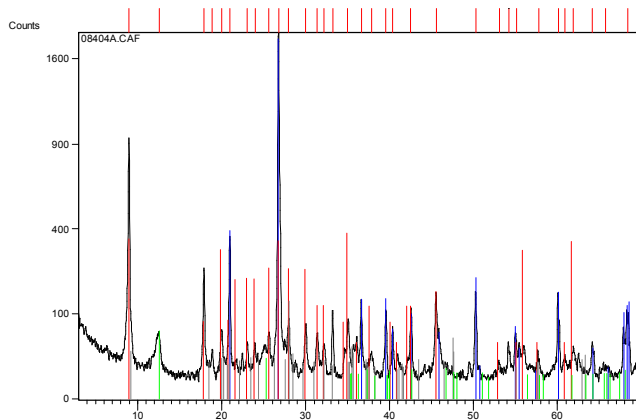
Observando os resultados químicos das amostras dos filitos da Formação Votuverava e o conglomerado da Formação Camarinha os teores de  $K_2O$  e  $MgO$  são maiores nos conglomerados e os teores de  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$  menores

Os filitos da Formação Água Clara possuem teores variados pelo fato das amostras serem coletadas em situações distintas. Nos pontos 6C e 6B, apesar da proximidade das amostras, o que difere os teores destas amostras é a proximidade com o plano de falha. A rocha que está no plano de falha apresenta teores de  $SiO_2$  e  $Fe_2O_3$  elevados.

Os mármore e margas próximos à mina apresentam teores variados dos elementos. Apenas os mármore dos pontos 31,32 e 33 são indicados para a fabricação do cimento. Os pontos 34 e 35 são margas com teores elevados de  $SiO_2$  e  $MgO$  respectivamente. O ponto 34 apresenta alto teor de  $SiO_2$  devido à proximidade do contato com o quartzito.

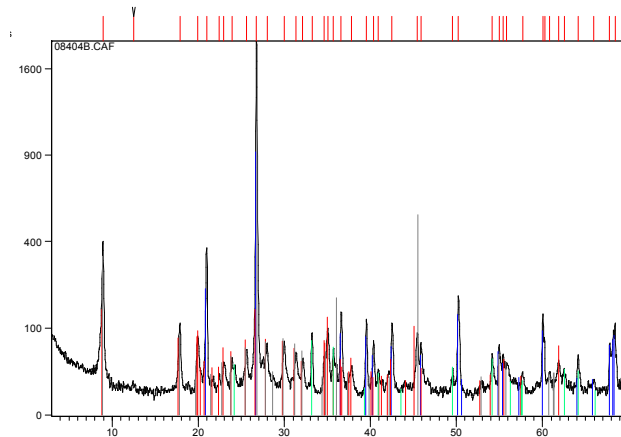
A interpretação dos difratogramas das amostras de filitos mostra que o “pico” principal é do quartzo, seguido de muscovita e algumas vezes há ocorrência de margarita e hematita.

Ponto 21 A (084/04A)-Filito da Formação Votuverava



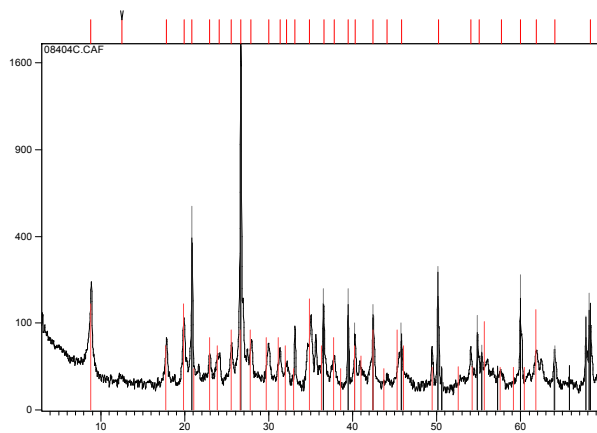
Score	Nome	Fórmula Química
74	Quartzo	$SiO_2$
40	Muscovita	$K(Al, V)_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$
25	Margarita	$CaAl_2(Si_2Al)_2O_{10}(OH)_2$
35	Hematita	$Fe_2O_3$

Ponto21B (084/04B)- Filito Formação Votuverava



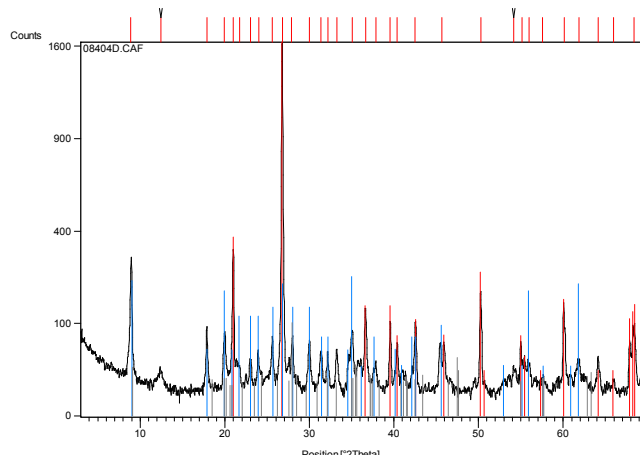
Score	Nome	Fórmula Química
52	Quartzo	Si O2
35	Muscovita	K Al2 Si3 Al O10 ( O H )2
53	Hematita	Fe2 O3

Ponto 23 (084/04C)- Contato filito da Formação Votuverava com dique



Score	Nome	Fórmula Química
78	Quartzo	Si O2
47	Muscovita	H4 K2 (Al , Fe )6 Si6 O24
28	Hematita	Fe2 O3

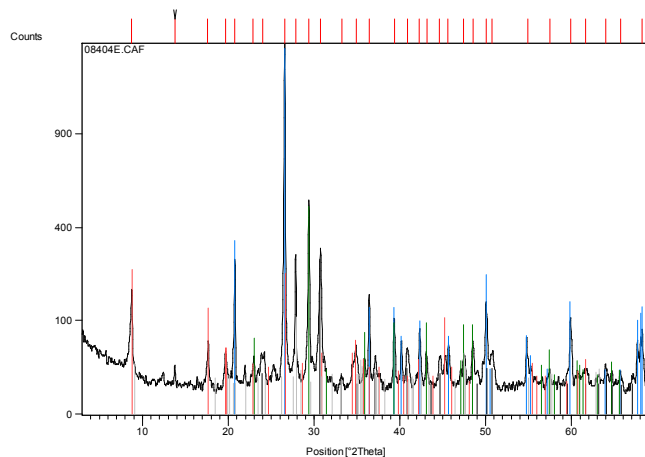
Ponto 27 (084/04D)– Contato filito da Formação Votuverava com conglomerado da Formação Camarinha



Score	Nome	Fórmula Química
77	Quartzo	Si O <sub>2</sub>
55	Muscovita	K ( Al , V ) <sub>2</sub> ( Si , Al ) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>
23	Margarita	Ca Al <sub>2</sub> ( Si <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> ) O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>
42	Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

O difratograma do conglomerado mostra que o mineral principal é o quartzo, seguido da muscovita, dolomita e margarita.

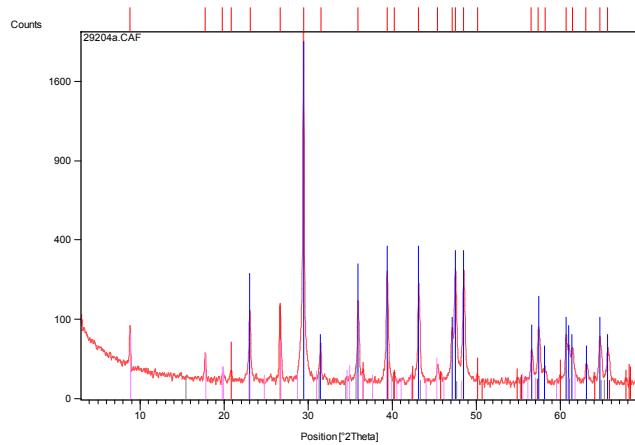
Ponto em frente administração da mina (084/04E)- Conglomerado da Formação Camarinha



Score	Nome	Fórmula Química
77	Quartzo	Si O <sub>2</sub>
48	Dolomita	Ca ( Mg , Fe ) ( C O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
46	Muscovita	( K , Na ) ( Al , Mg , Fe ) <sub>2</sub> ( Si <sub>3.1</sub> Al <sub>0.9</sub> ) O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>
29	Margarita	Ca Al <sub>2</sub> ( Si <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> ) O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>

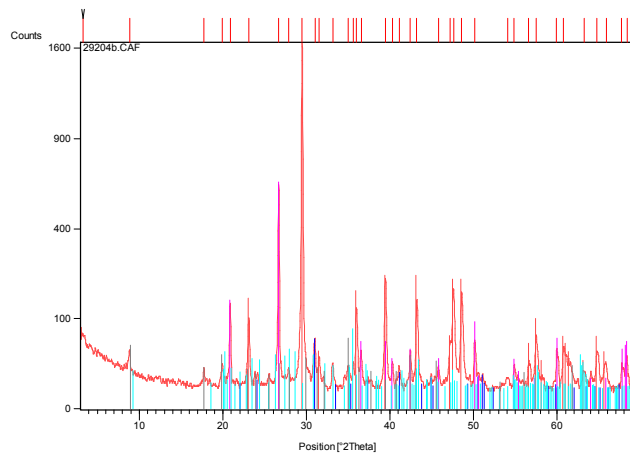
Os difratogramas dos mármore mostram que os minerais principais são calcita, quartzo e muscovita. As margas e o mármore brechado apresentam os mesmos picos, incluindo a dolomita, devido ao aumento dos teores de MgO.

Ponto 70 (292/04 A) Contato do mármore com filito – Formação Água Clara



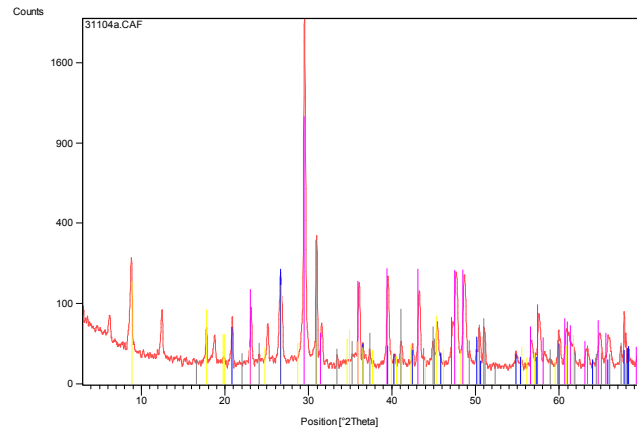
Score	Nome	Fórmula Química
76	Calcita	Ca C O3
16	Quartzo	Si O2
20	Muscovita	( K , Na ) ( Al , Mg , Fe )2 ( Si3.1 Al0.9 ) O10 ( O H )2

Ponto 88 (292/04 B) Mármore brechado - Formação Água Clara



Score	Nome	Fórmula Química
60	Calcita	Ca C O3
24	Dolomita	Ca Mg ( C O3 )2
69	Quartzo	Si O2
26	Muscovita	H2 K Al3 ( Si O4 )3

Ponto 102 (311/04 A) Marga – Formação Água Clara



Score	Nome	Fórmula Química
44	Quartzo	Si O <sub>2</sub>
33	Calcita	Ca C O <sub>3</sub>
25	Muscovita	( K , Na ) ( Al , Mg , Fe ) <sub>2</sub> ( Si <sub>3.1</sub> Al <sub>0.9</sub> ) O <sub>10</sub> ( O H ) <sub>2</sub>
44	Dolomita	Ca Mg ( C O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>

## 4- Geologia da Mina Rio Bonito

### 4.1 UNIDADES LITOLÓGICAS

As rochas na mina Rio Bonito estão dispostas em forma de bancadas a céu aberto com as partes mais extensas voltadas para as faces sul e norte (foto 22)



Foto 22: Vista parcial da mina mostrando as bancadas.

São em sua maioria mármore calcítico, de cor cinza escura, com venulações também de calcita, sem orientação preferencial (foto 23).

Apresentam algumas porções com mármore dolomítico brechado, constituído por cristais de dolomita, tanto na matriz quanto nos clastos. Os clastos são facetados de tamanho milimétrico a centimétrico, não possuem orientação nem estruturas sedimentares preservadas e apresentam porosidade secundária (foto 24). A porosidade secundária ocorre devido os cristais de dolomita possuírem granulação maior em relação ao mármore calcítico. São mais densos e sua estrutura cristalina mais compacta em relação à calcita, o que implica no aumento de volume dos poros da rocha (Shinn, 1998).

O contato entre as porções calcíticas e dolomíticas é abrupto (foto 25 e 26). Localmente há uma camada de material conglomerático (foto 27) com matriz suportado. Os clastos estão deformados juntamente com a matriz.

Dentro da mina, mais precisamente nas bancadas mais altas da face sul, ocorre contato gradacional com o filito, onde há pequenos sets de tamanho milimétrico a centimétrico de material pelítico em meio à matriz carbonática. Estes pequenos sets inicialmente possuem tamanhos métricos (foto 28) gradacionando até o material ficar completamente pelítico (filito). A intercalação torna-se mais intensa e deformada e com presença de porfiroclastos de quartzo e dobras cerradas assimétricas (foto 29).

O contato gradacional repete-se no contato do filito com o quartzito do Morro Grande. À medida que se aproxima da base do quartzito observam-se sets de tamanho métrico de material pelítico (filito) em meio ao arenoso (quartzito) (foto 30).

No extremo E na mina ocorre um dique de rocha básica com espessura aproximada de 3 metros.



Foto 23: Mármore calcítico típico da mina

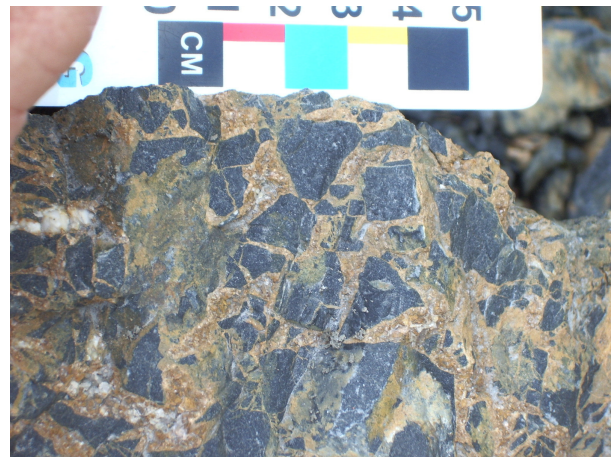


Foto 24: Material brechado.



Foto 25: Detalhe do contato abrupto entre as frentes calcíticas e dolomíticas.

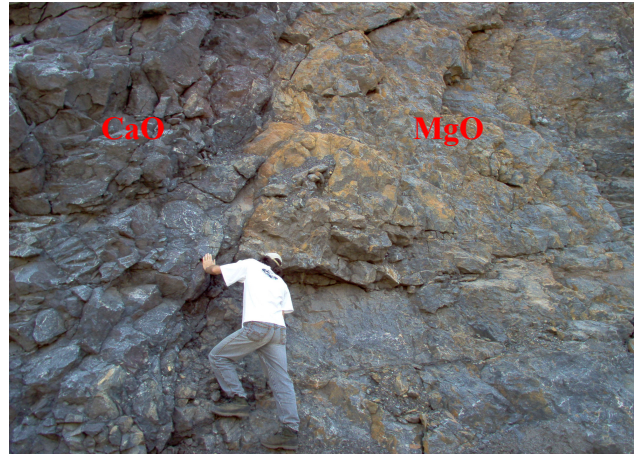


Foto 26: Contato abrupto de frente calcítica com dolomítica.



Foto 27: Nível conglomerático .



Foto 28: Intercalação de níveis carbonáticos e pelíticos em escala métrica

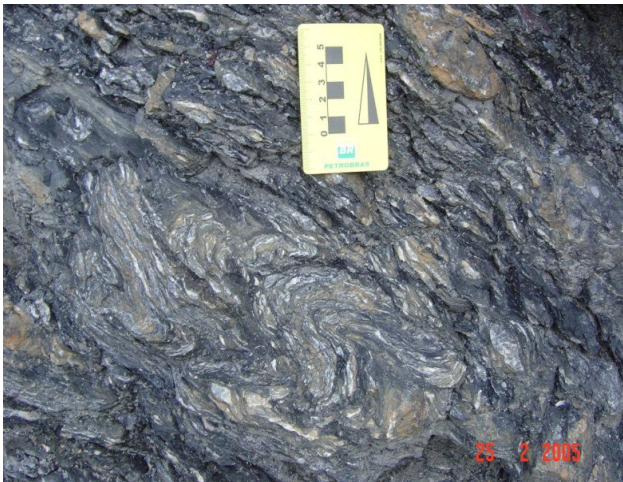


Foto 29: Intercalação de níveis carbonáticos e pelíticos, com dobras cerradas, assimétricas.



Foto 30: Intercalação de níveis pelíticos (filito) com o material arenoso (quartzito).

A foto 31 mostra a vista parcial das bancadas da frente norte e o contato das frentes calcíticas e dolomíticas. A frente dolomítica tem cor castanha devido sua maior porosidade e conseqüente alteração.

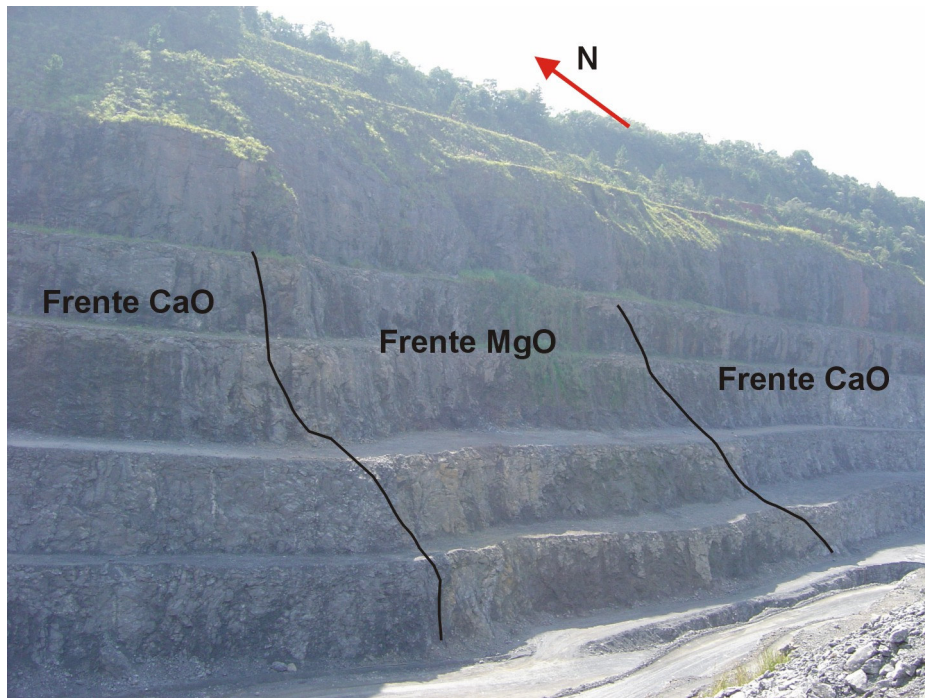


Foto 31: Vista parcial da mina mostrando as bancadas e contatos aproximados das frentes calcíticas e dolomíticas.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL

### 4.2.1 Regime Dúctil

A foliação principal  $S_n$  nos mármore/metacalcários da mina é paralela ao acamamento sedimentar preservado, como observado em afloramento no extremo W da mina.

A foliação  $S_n$  desenvolvida em um nível crustal mais inferior tem caráter heterogêneo, tornando-a por vezes bastante evidente e penetrativa e fortemente anastomosada, por vezes mascarada pelo posterior sistema de fraturas.

Possui dobras abertas a suaves e eixos subhorizontalizados (foto 32). Apresenta um segundo padrão de dobramentos com grandes amplitudes e comprimentos de onda e eixos subverticalizados (foto 33 e 34). A foliação  $S_n$

sofreu fases de dobramentos distintas, podendo ser observado pela figura de interferência tipo domo-bacia.

As rochas estão fortemente fraturadas, porém o sistema dúctil superimposto apresenta-se mais acentuado.



Foto 32: Foliação Sn com dobras abertas a suaves e eixos subhorizontalizados.



Foto 33: Foliação Sn mostrando eixos subhorizontalizados e subverticalizados.



Foto 34: Padrão de redobramento da foliação Sn.

Os dobramentos da foliação Sn foram descritas e identificados por Salamuni (1995) em afloramentos do Núcleo Betara, próximos a Zona de Cisalhamento Lancinha-Cubatão, na região de Rio Branco do Sul-PR.

Devido ao intenso anastomosamento e às fases de dobramento, a distribuição nos diagramas de contorno máximo dos pólos apresenta uma certa dispersão dos valores.

No diagrama de contorno máximo dos pólos (figura 20), verificou-se que os planos representativos da foliação Sn possuem atitudes médias de N30E/ 50-60 NW. Secundariamente as atitudes têm direção N60W/ 20-30 NE.

O diagrama de rosetas mostra que a maior moda possui direção NE/NW e secundariamente, menos evidenciada, direção NW /NE.

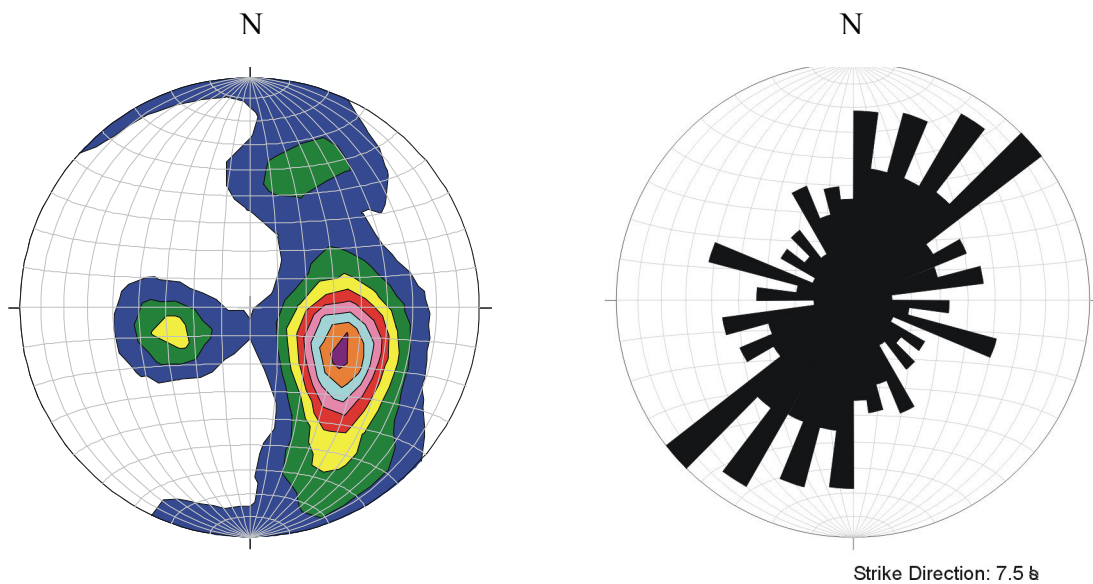


Figura 20: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas. Total 630 atitudes da foliação Sn.

Apesar da dispersão das concentrações das medidas, a foliação Sn, de uma forma geral, tende ao fechamento de uma dobra aberta com ângulo interflancos de 75°.

Para dentro da mina os diagramas de *Schmidt Lambert* são divididos em frentes norte e sul e extremos leste e oeste.

As bancadas da frente norte apresentam um padrão contínuo das medidas, onde os planos representativos da foliação Sn têm atitudes N10W/53SW, observadas também no diagrama de rosetas, onde mostram que as concentrações das medidas estão no quadrante NW/SW.

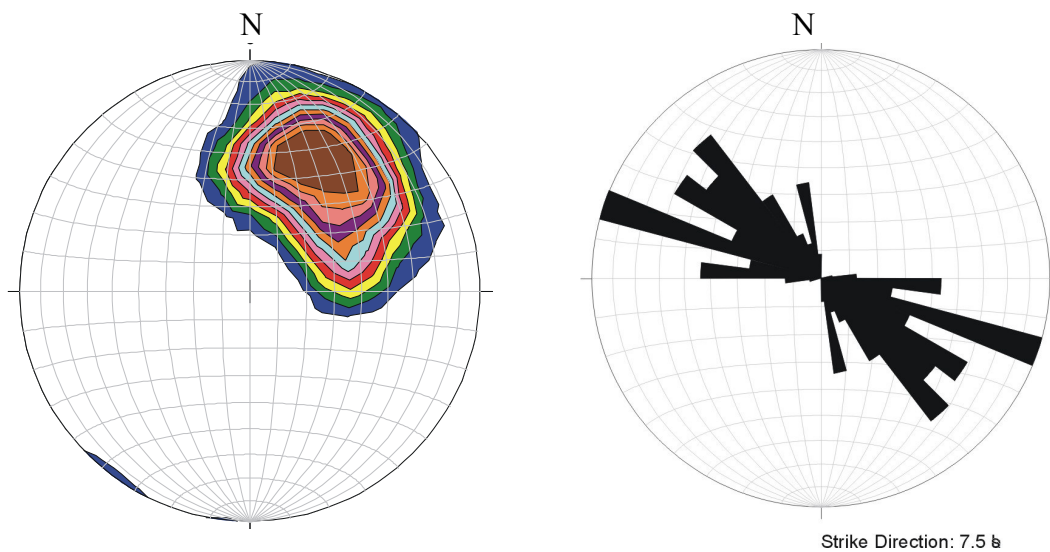


Figura 21: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas. Total 113 atitudes da foliação Sn das bancadas da frente Norte.

As bancadas da frente sul possuem padrão definido da foliação Sn com planos N10E/60NW, observadas também no diagrama de rosetas, com concentrações NE/NW.

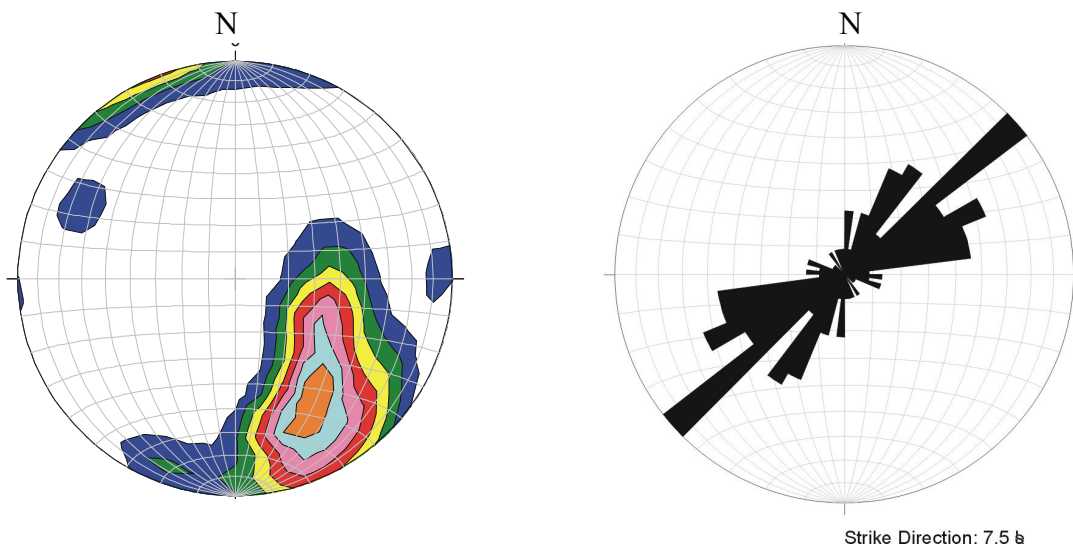


Figura 22: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas. Total 115 atitudes da foliação Sn das bancadas da frente Sul.

Para os extremos (E e W) da mina, as figuras 23 e 24, respectivamente, mostram que o lado leste (E) da mina possui concentração dos planos medidos em N35E/35NW e uma segunda concentração N57W/25NE. O diagrama de rosetas mostra a direção preferencial NE/NW. Neste extremo da mina, observa-se que a foliação Sn apresenta o fechamento de uma dobra com ângulo interflancos de 60°, caracterizando uma dobra fechada assimétrica.

O extremo W da mina mostra que há uma concentração definida da foliação Sn N15W/45SW. O diagrama de rosetas mostra também direção preferencial NW/SW. Estes planos são condizentes com as medidas da foliação Sn das bancadas da frente norte.

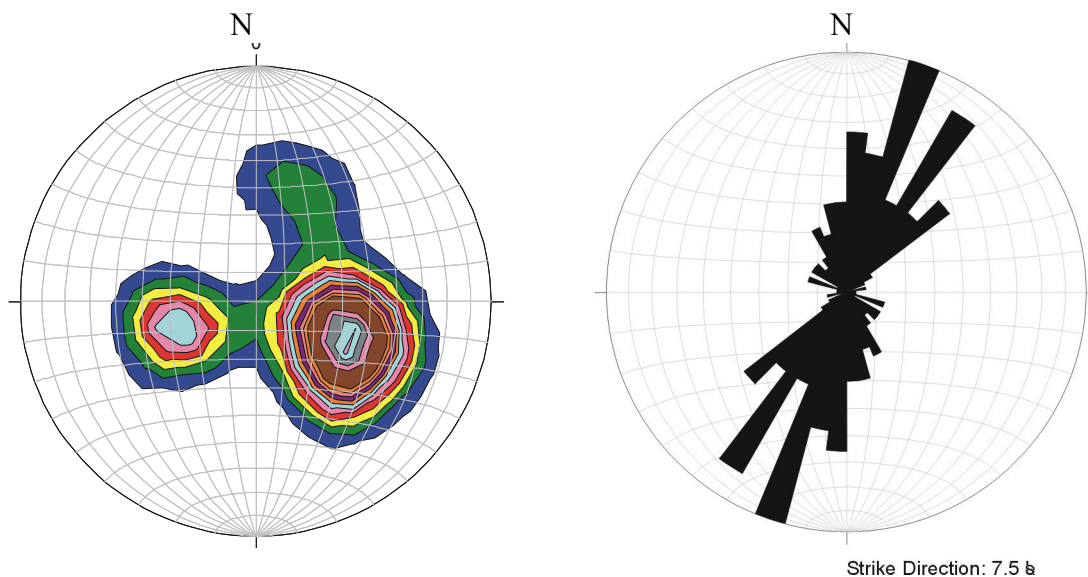


Figura 23: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas. Total 169 atitudes da foliação Sn das bancadas da frente E.

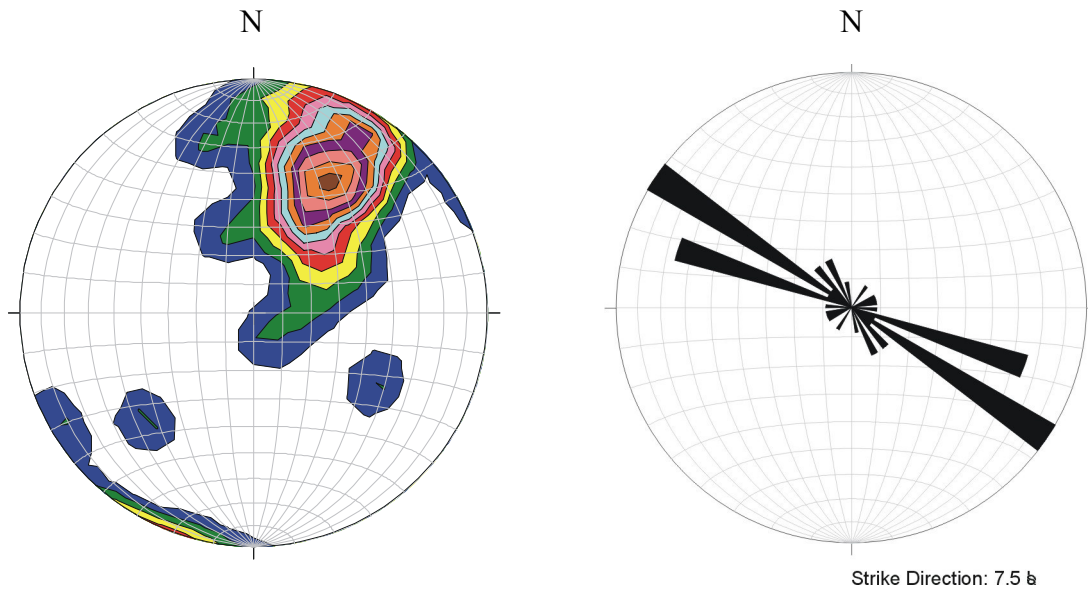


Figura 24: Diagrama de contorno máximo dos pólos e diagrama de rosetas. Total 28 atitudes da foliação  $S_n$  das bancadas da frente W.

A foliação  $S_{n+1}$  é pouco evidenciada e sem penetratividade e ocorre como uma clivagem de fratura, está perpendicular a  $S_n$  (foto 35).



Foto 35: Foliação  $S_{n+1}$  (clivagem de fratura) subverticalizada.

#### 4.2.2 Regime Rúptil

No sistema rúptil a deformação sofrida também é heterogênea causando em algumas porções, intenso fraturamento.

As zonas de cisalhamento são subverticalizadas e oblíquas à foliação principal (foto 36). Apresentam anastomosamento e boudinagem (foto 37), mascarando a deformação dúctil.

Presença de falhas com *steps* e estrias, indicando um sentido de movimento horário (foto 38). As falhas dentro da mina têm direção preferencial para NW/SW, como pode ser observado na figura 25.

O diagrama de rosetas das medidas das juntas mostra que a moda das juntas é NE/NW e as demais medidas apresentam muita dispersão (figura 26).



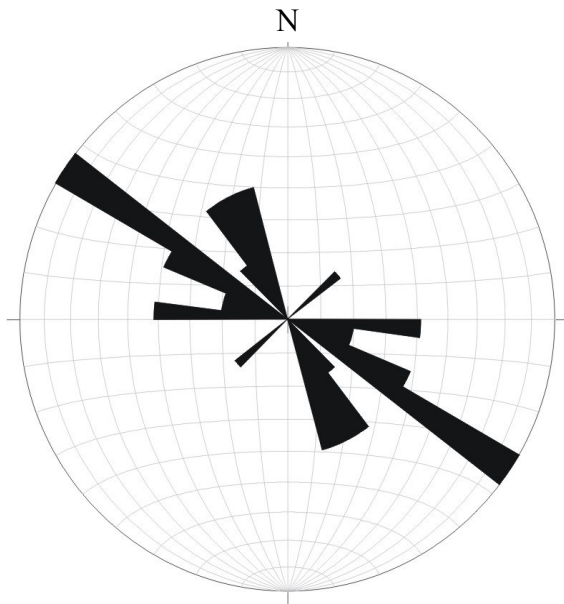
Foto 36: Zona de cisalhamento verticalizada.



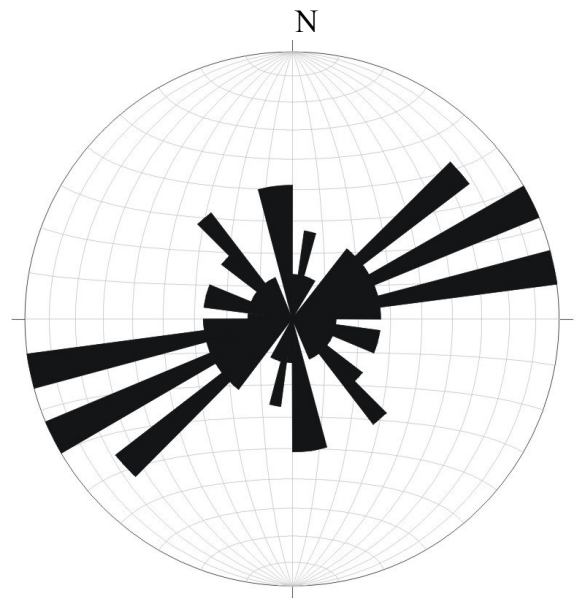
Foto 37: Detalhe da zona de cisalhamento, com anastomosamento e boudinagem da rocha.



Foto 38: Falha com presença de estrias subhorizontais e sentido de movimento horário.



Strike Direction: 7.5  
 Figura 25: Diagrama de rosetas das falhas. Total 18 medidas.



Strike Direction: 7.5  
 Figura 26: Diagrama de rosetas das juntas. Total 50 atitudes.

### 4.2.3 Relação dos contatos CaO X MgO

O mapa da mina (figura 27) mostra em detalhe as bancadas e um esboço das frentes calcítica e dolomítica. Como as análises químicas foram feitas nas frentes das bancadas não é possível afirmar quanto estas frentes dolomíticas avançam em profundidade e a norte. A sul da mina já existe o contato com o quartzito e o filito. O mapa mostra apenas a possível direção preferencial das frentes dolomíticas representadas pela cor vermelho, e em azul as frentes calcíticas.

Apesar do anastomosamento do pano de contato as maiores concentrações das medidas são N70-80W.

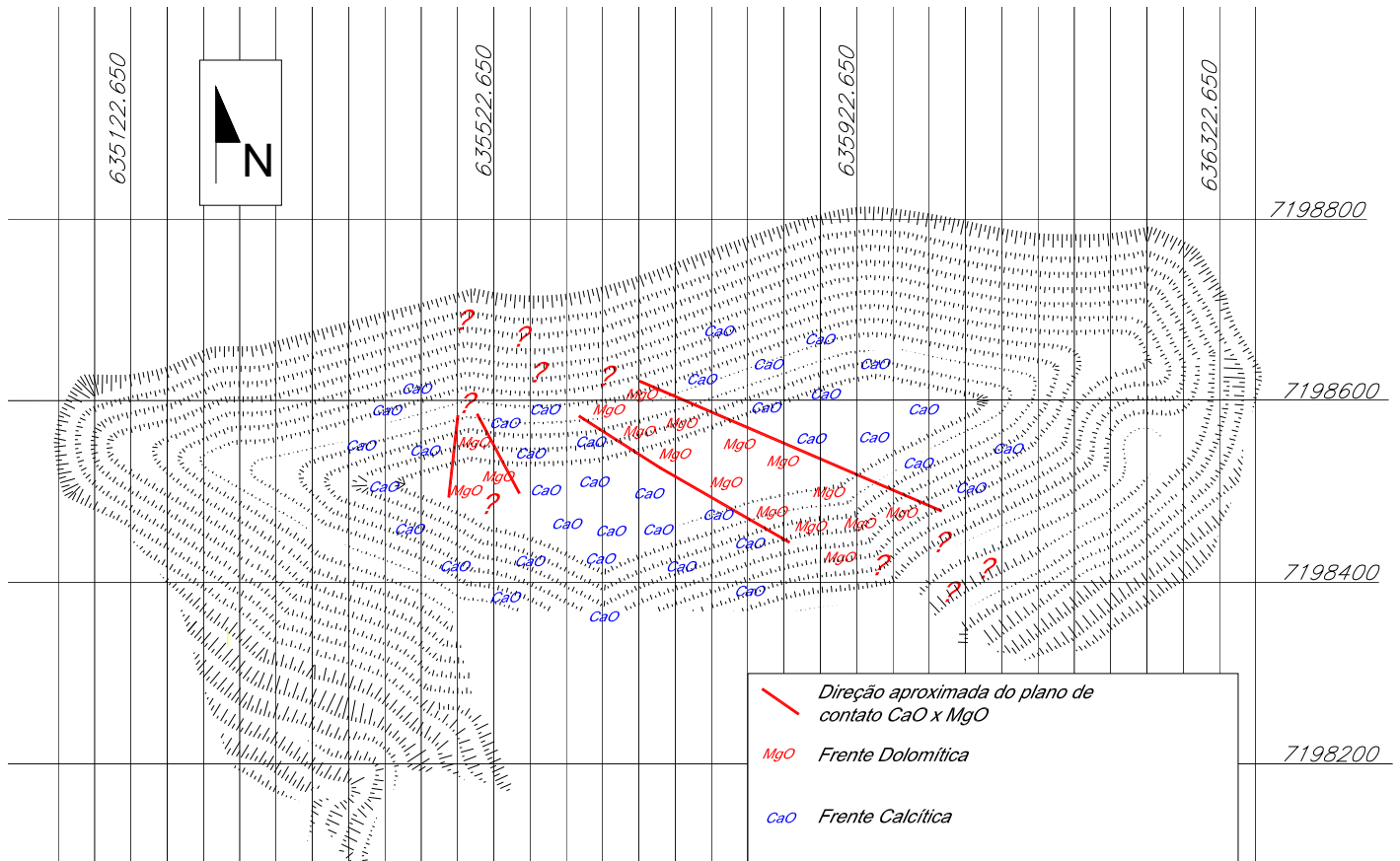


Figura 27: Mapa com planos aproximados de contato das frentes calcíticas e dolomíticas.

O contato entre os mármore calcíticos (não brechados) e dolomíticos (brechados) se faz através de sistema de fraturas. Apesar do anastomosamento do plano de contato da parte dolomítica com a calcítica, há uma tendência ao posicionamento oblíquo à foliação principal (foto 39 e 39 A).

Nas bancadas da frente norte a parte dolomítica é homogênea, e nas bancadas sul há uma pequena intercalação de uma parte calcítica, aproximadamente 10 metros, em meio à dolomítica.

Nas bancadas da frente norte a direção preferencial da foliação  $S_n$  é N10W/SW, e a direção preferencial da frente dolomítica é N70-80W, com algumas dispersões no mesmo quadrante (figura 28).

As bancadas da frente sul possuem direção preferencial da foliação  $S_n$  N10E/NW (figura 29). A frente dolomítica tem direção preferencial próximo a E-W a uma segunda direção configurando pares de fraturas conjugadas com direção N15E e N15W. O diagrama de rosetas para as direções dos contatos pode ser observado na figura 30.



Foto 39: Plano de contato do mármore calcítico com o dolomítico. Vista de três bancadas.  
39 A: Plano de contato oblíquo à foliação principal.

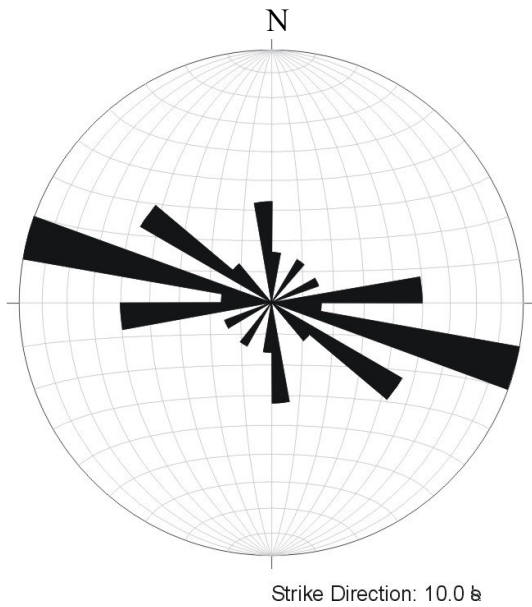


Figura 28: Diagrama de rosetas dos planos de contatos entre CaO e MgO nas bancadas da frente Norte. Total 19 atitudes.

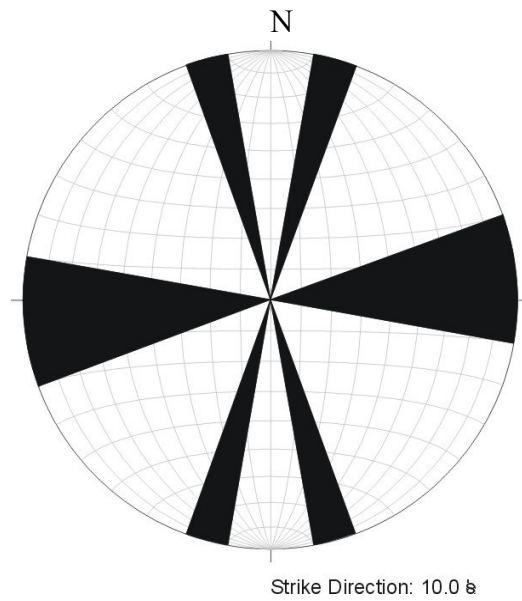


Figura 29: Diagrama de rosetas dos planos de contatos entre CaO e MgO nas bancadas da frente Sul. Total 5 atitudes.

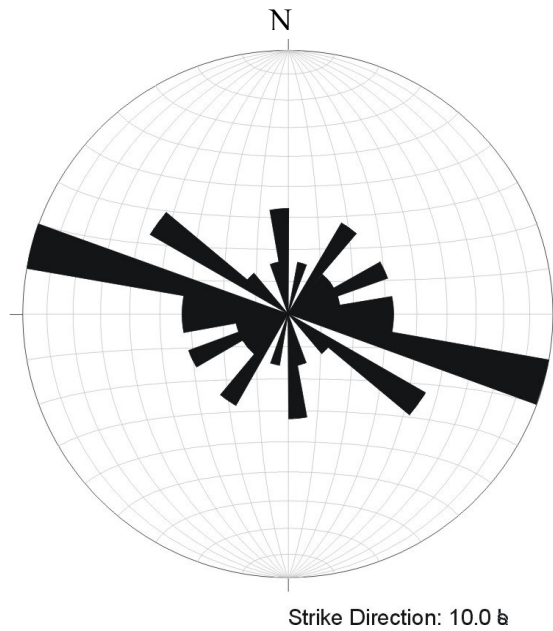


Figura 30: Diagrama de rosetas dos contatos do mármore calcítico com o dolomítico. Total 24 atitudes.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA

Basicamente quatro tipos de rochas são identificadas no interior na mina, sendo estas:

- Metacalcários com estruturas sedimentares preservadas

Ocorrem de forma pouco significativa, onde é possível visualizar o acamamento reliquiar (foto 40). Em lâmina este acamamento reliquiar é incipiente (foto 41), visualizando apenas cristais de calcita com granulação fina, em meio a fraturas estilólíticas preenchidas por calcita, orientadas segundo o plano do acamamento e da foliação (foto 42). Ocorrem venulações de calcita, na maioria das vezes subverticalizadas (foto 43).

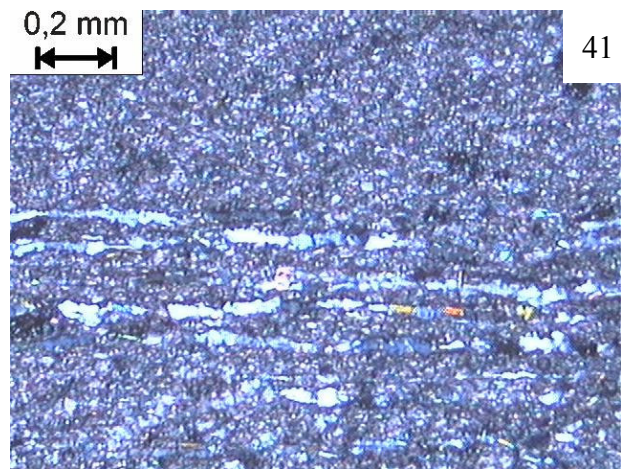


Foto 40: Metacalcário com estrutura sedimentar preservada.

Foto 41: Fotomicrografia mostrando a foliação incipiente da rocha e sua mineralogia.

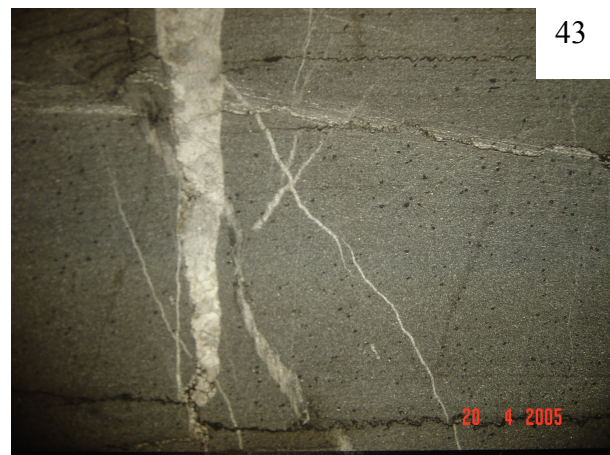
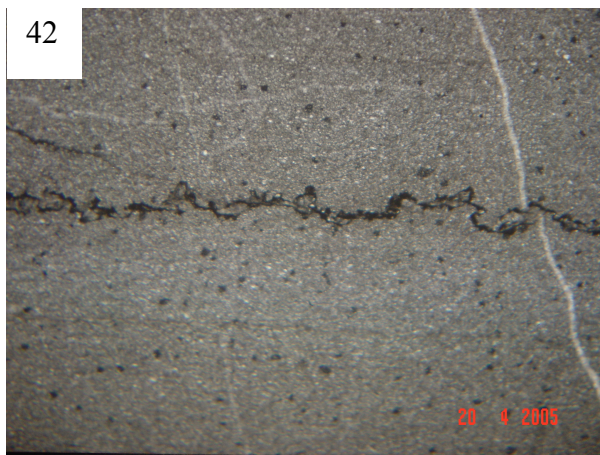


Foto 42: Mármore calcítico com granulação fina e presença de fraturas estilólíticas.

Foto 43: Presença de veios e venulações de calcita oblíquas ao plano de foliação.

- Mármore calcítico com forte padrão de deformação

Cerca de 70% das rochas da mina apresentam deformação dúctil proeminente, com foliação  $S_n$  paralela ao acamamento sedimentar, algumas vezes é possível observar uma segunda foliação perpendicular à foliação principal,  $S_{n+1}$  (foto 44). Em lâmina observa-se uma granulação fina de cristais de calcita e venulações também preenchidas por calcita (foto 45). No contato do mármore com o filito a rocha está fortemente dobrada, com presença de sericita (foto 46).



Foto 44: Mármore calcítico mostrando as duas foliações existentes ( $S_n$  e  $S_{n+1}$ ), perpendiculares entre si.

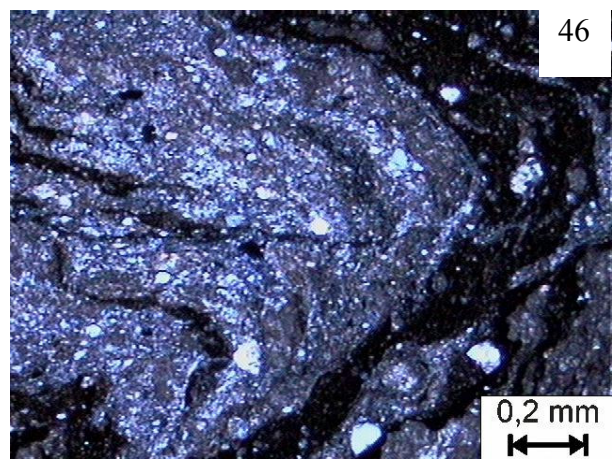
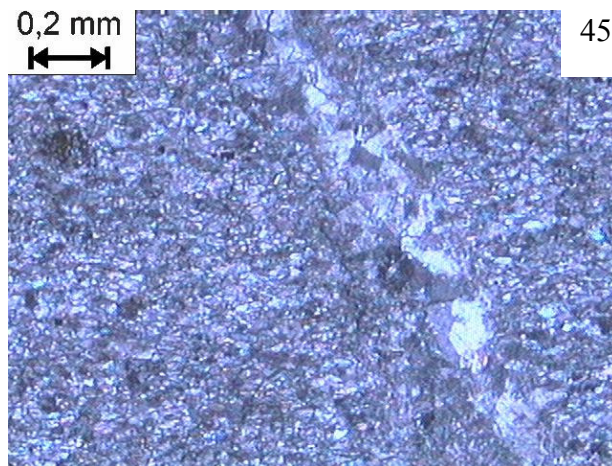


Foto 45: Fotomicrografia do mármore calcítico com granulação fina com fraturas e venulações preenchidas por calcita.

Foto 46: Fotomicrografia do mármore calcítico dobrado em contato com filito.

- Mármore dolomítico brechado.

Ocorrem em uma faixa na parte central da mina, com aproximadamente 100 metros de largura. Estes mármore são constituídos por cristais de dolomita (foto 47) facetados e com matriz com granulação grossa em meio a clastos também de dolomita (foto 48). Estas características são observadas tanto em fotomicrografia como em amostras macro (foto 49). As fotos 50 a 53 mostram comparações das texturas dos mármore em fotomicrografias e amostras macro.

O contato entre os mármore (calcítico e dolomítico) é abrupto (foto 54).

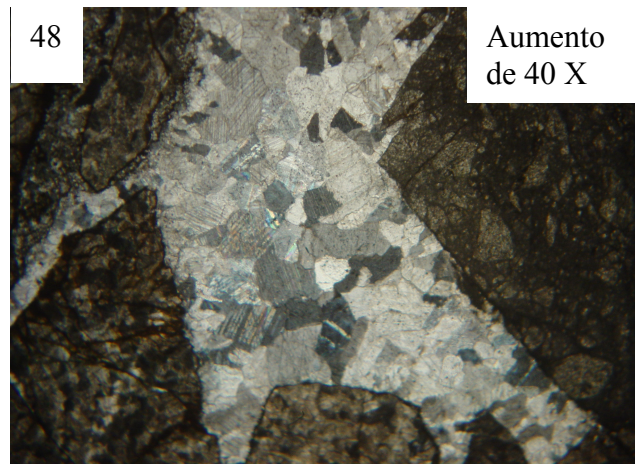
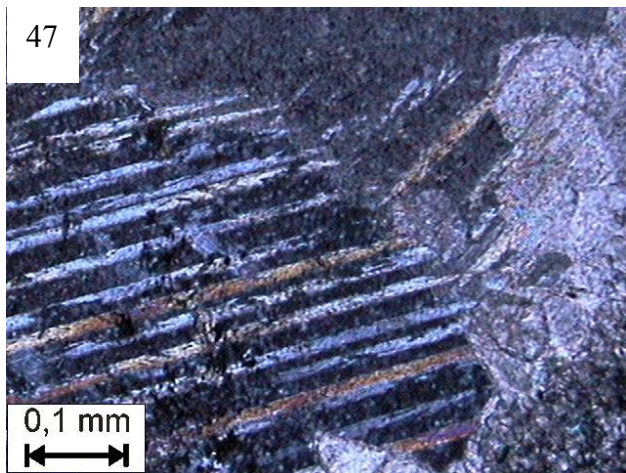


Foto 47: Cristais de dolomita mostrando sua geminação (nicóis cruzado).  
Foto 48: Clastos facetados de dolomita em meio a matriz também de dolomita.

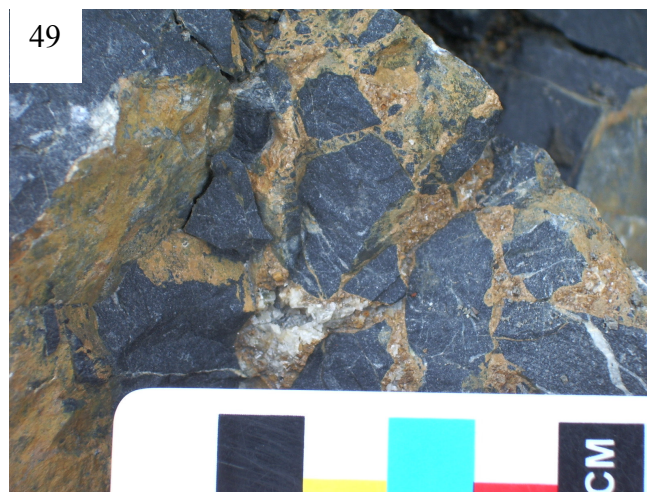


Foto 49: Material brechado, constituído por cristais de dolomita na matriz e nos clastos.

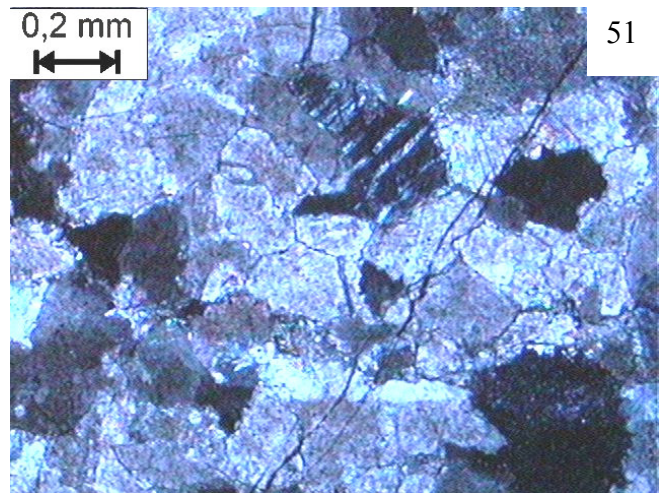
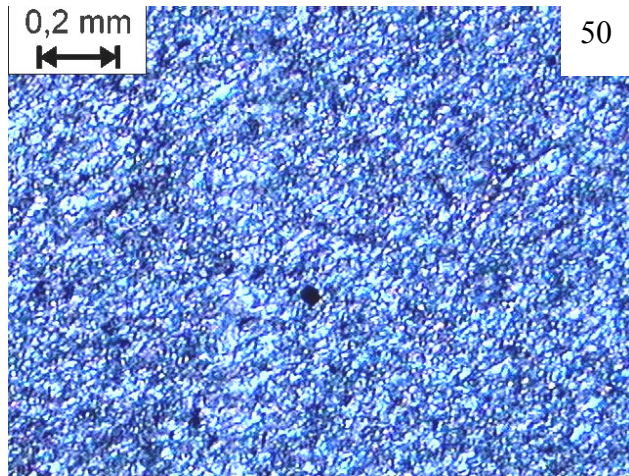
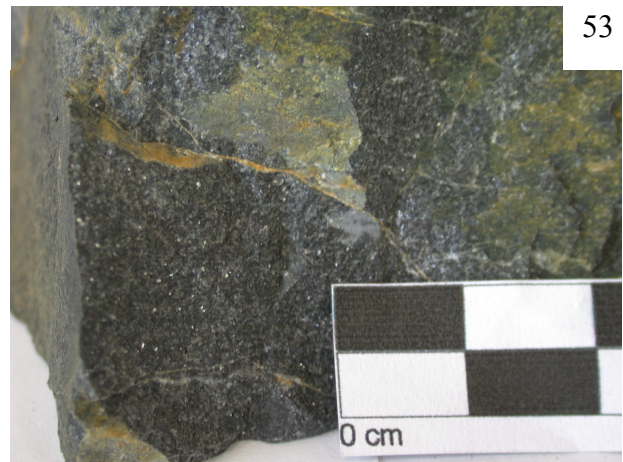


Foto 50: Fotomicrografia de mármore calcítico com granulação fina (nicóis cruzado).  
 Foto 51: Fotomicrografia do mármore dolomítico. Observar a diferença de granulação entre as fotos 50 e 51 (nicóis cruzado).



Fotos 52 e 53: Fotografias de amostras de mão referentes as fotomicrografias acima visualizadas. Na foto 52 observa-se o mármore calcítico com granulação fina e na foto 53 mármore dolomítico com granulação média/grossa.



Foto 54: Contato entre o material brechado (dolomítico) e o não brechado (calcítico).

- Metaconglomerados

Pequena faixa dentro da mina, apenas em um nível da bancada da frente sul. Apresenta material pouco coeso, impossibilitando a confecção de lâmina delgada. O metaconglomerado é polimítico com matriz suportado, com seixos de quartzo e material carbonático de tamanho centimétrico, e sua matriz constituída de quartzo, muscovita e carbonatos (foto 55).

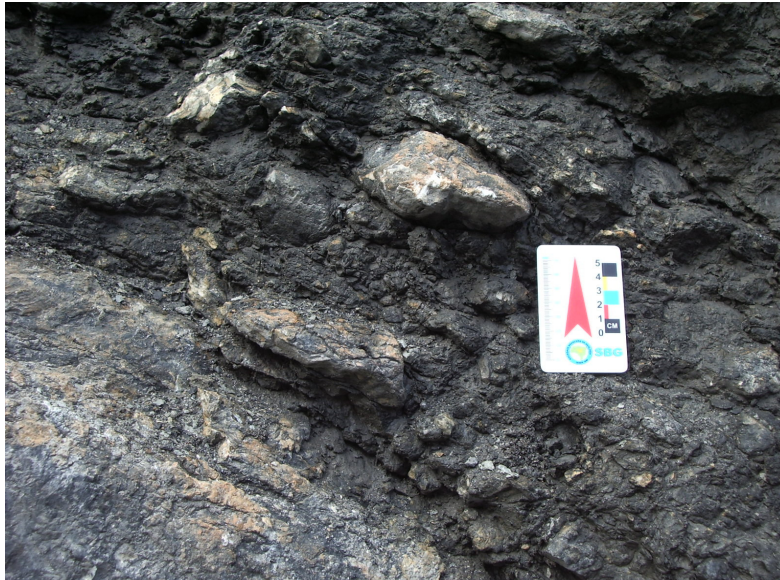


Foto 55: Material conglomerático.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

Segundo Frazão e Paraguassu (1998) os calcários são constituídos basicamente de carbonato de cálcio  $\text{CaCO}_3$  e, dependendo da sua origem geológica, podem conter várias impurezas, como magnésio, silício, alumínio ou ferro. O elemento cálcio, que abrange 40% de todo o calcário, é o quinto mais abundante na crosta terrestre, após o oxigênio, silício, alumínio e o ferro.

De acordo com o teor de magnésio o calcário se classifica em:

- calcário calcítico ( $\text{CaCO}_3$ ): o teor de  $\text{MgO}$  varia de 0 a 4%. Devido à maior quantidade de cálcio a rocha quebra com maior facilidade e em superfícies mais uniformes e planas. Este calcário, também por ter menor quantidade de carbonato de magnésio, exige maior temperatura para descarbonatar.

- calcário dolomítico ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ): o teor de MgO é acima de 18% e por isso possui uma temperatura de descarbonatação ainda menor do que o calcário magnesiano.

- calcário magnesiano ( $\text{MgCO}_3$ ): o teor de MgO varia de 4 a 18%. A presença maior de carbonato de magnésio faz com que este calcário tenha características bem diferentes do calcítico.

Na mina foram coletadas amostras de todas as variações dos mármore, inclusive dos metaconglomerados. Inicialmente a coleta das amostras foi aleatória, até ser observado que a mudança dos teores de CaO e MgO eram abruptas, associadas a uma diferença textural nos mármore.

A partir desta observação o método de coleta das amostras foi modificado para que houvesse uma coleta baseada na diferença textural das mesmas. As amostras foram coletadas por bancadas, porém por uma forma de exposição estas serão apresentadas conforme os diferentes tipos de litologias ocorridas no interior na mina. As tabelas químicas e difratogramas que separam as amostras por bancadas estão apresentadas como anexo do trabalho.

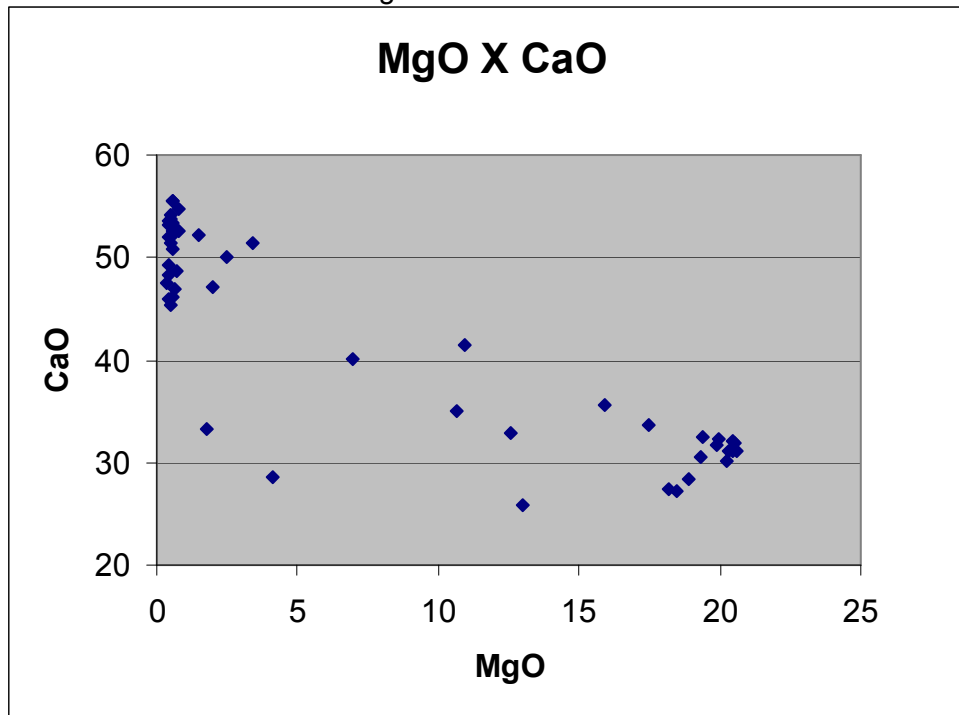
A interpretação das análises químicas e mineralógicas permite afirmar que as amostras que contêm o material brechado de cor acastanhada, com textura mais grossa em relação ao mármore de cor cinza escuro, são os que possuem os teores de MgO em torno de 16%.

Os mármore que contêm teores de CaO em torno de 52% são os mármore que possuem cor cinza escuro, com granulação fina e possuem venulações de calcita. Nestes mármore calcíticos a foliação é facilmente observada, ao contrário dos mármore dolomíticos, onde suas estruturas deformacionais estão mascaradas e apenas é observado o sistema rúptil (juntas).

O gráfico abaixo (tabela 03) mostra a relação dos teores de MgO X CaO de todas as análises químicas realizadas nos mármore da mina. Fica evidenciado que existe relação entre esses teores. À medida que aumenta o CaO, há uma diminuição de MgO, com uma variação média de 20%. A maior concentração mostra que os valores de CaO próximos de 50% possuem valores menores que 5% de MgO, e a segunda maior concentração mostra que quando há o aumento

dos teores de MgO, em torno de 20%, há uma queda nos teores de CaO, para aproximadamente 30%.

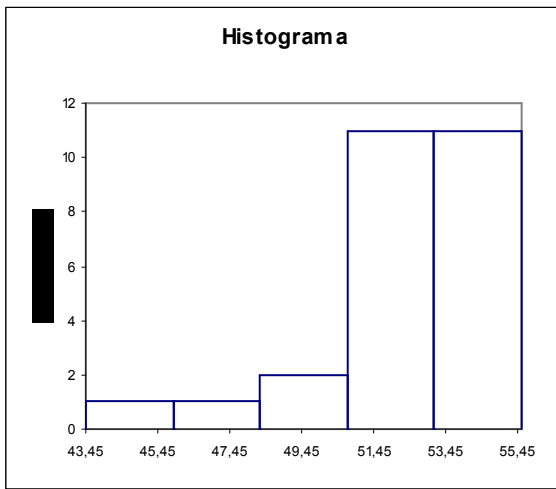
Tabela 03: MgO X CaO dos mármore da mina



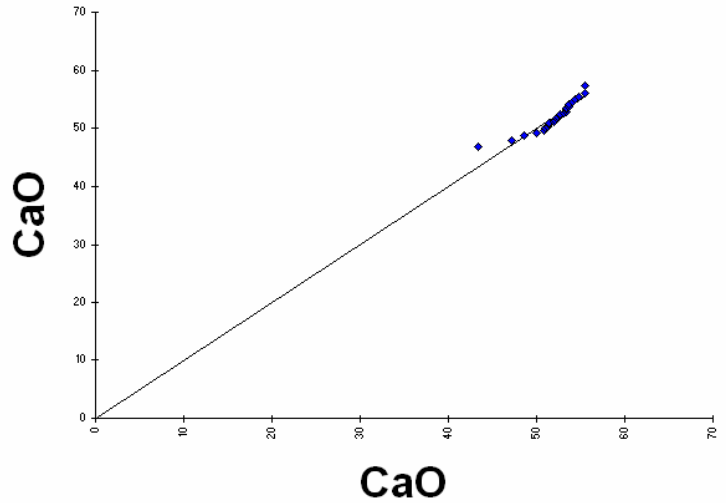
Foram realizados histogramas e gráficos de correlação dos valores observados com valores calculados para os dois grupos de amostras analisadas, os mármore calcíticos e os dolomíticos.

Para os mármore calcíticos, num total de 26 amostras, o histograma da variável CaO mostra que a média dos teores é de 52%, com valor mínimo de 43,45%, máximo de 55,55 e desvio padrão de 2,5%. Apresenta curva de distribuição unimodal simétrica (gráfico 01).

Gráfico 01: Histograma e gráfico de correlação dos valores da variável CaO nos mármore calcíticos.



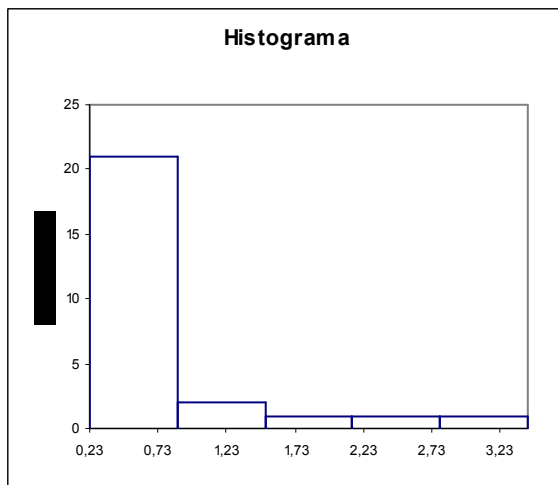
CaO



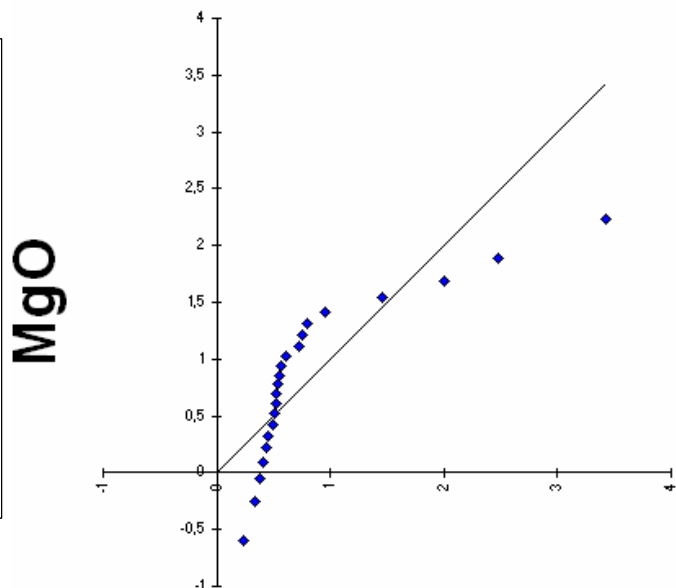
CaO

O histograma da variável MgO mostra a média de 0,8% com valor mínimo de 0,2%, máximo de 3,4% e desvio padrão de 0,7%. Apresenta curva distribuição unimodal simétrica (gráfico 02).

Gráfico 02: Histograma e gráfico de correlação dos valores da variável MgO nos mármore calcíticos.



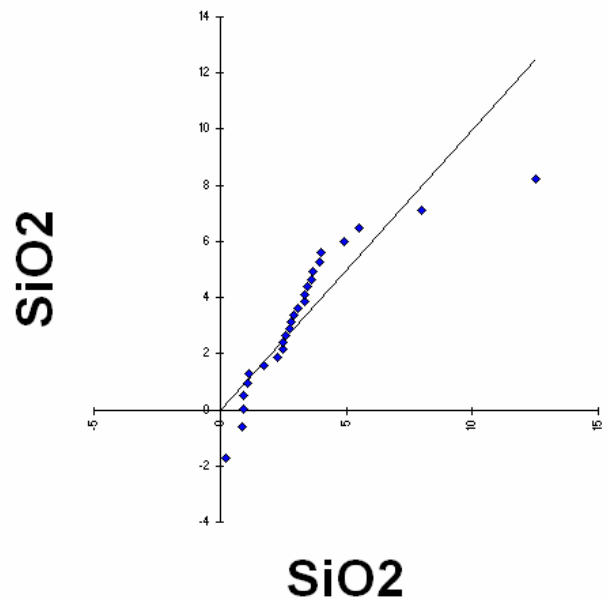
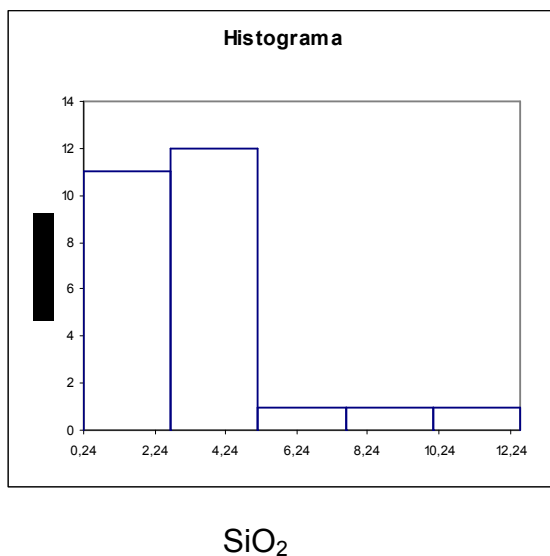
MgO



MgO

A variável  $\text{SiO}_2$  apresenta uma dispersão maior dos valores das porcentagens, sendo a média dos teores em 3,2%, com valor mínimo de 0,2%, máximo de 12,5% e desvio padrão de 2,4%. Apresenta curva de distribuição unimodal assimétrica (gráfico 03).

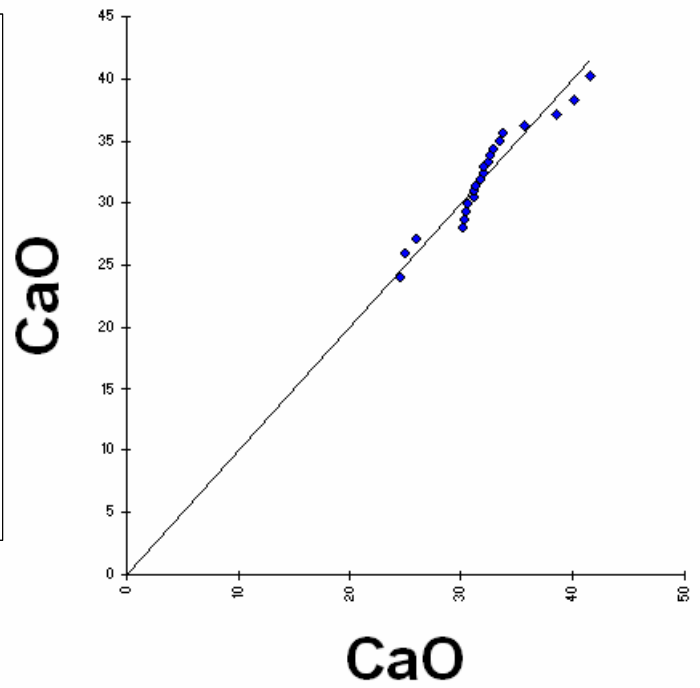
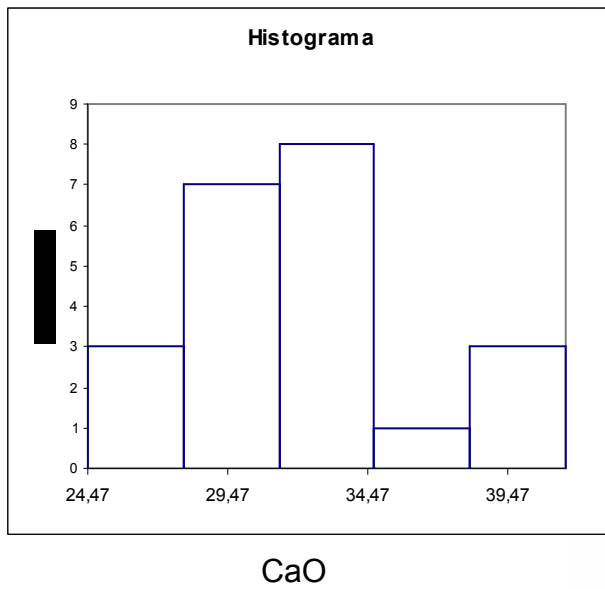
Gráfico 03: Histograma e gráfico de correlação dos valores da variável  $\text{SiO}_2$  nos mármore calcíticos.



Nos gráficos de correlação dos valores dos elementos  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{SiO}_2$  os pontos plotados representam os teores da rocha. Quando estes se encontram próximo à reta significa que há um padrão das amostras analisadas e de seus teores.

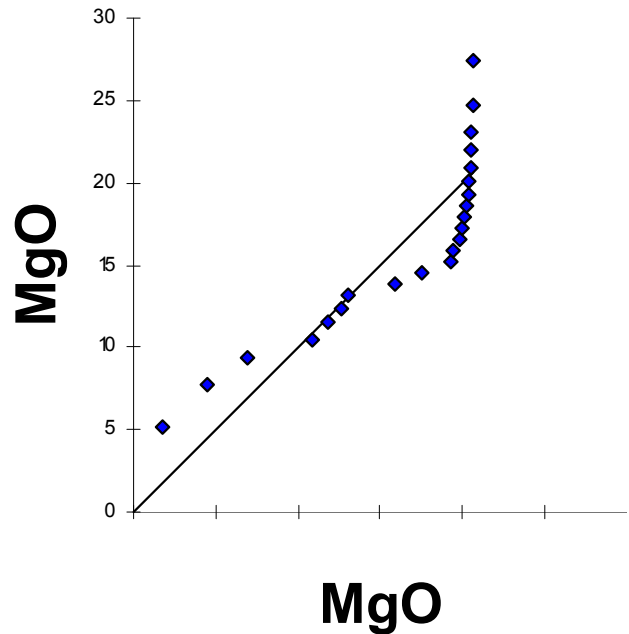
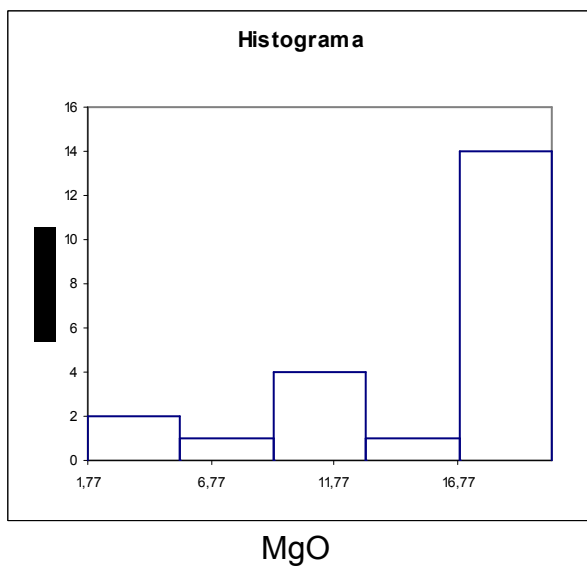
Para os histogramas dos mármore dolomíticos, num total de 22 amostras, a porcentagem dos teores tem uma maior heterogeneidade dentro das variáveis. A variável  $\text{CaO}$  tem média de 32%, com valor mínimo de 24,5%, máximo de 41,5% e desvio padrão de 4%. Apresenta curva de distribuição polimodal assimétrica (gráfico 04).

Gráfico 04: Histograma e gráfico de correlação dos valores da variável CaO nos mármore dolomíticos.



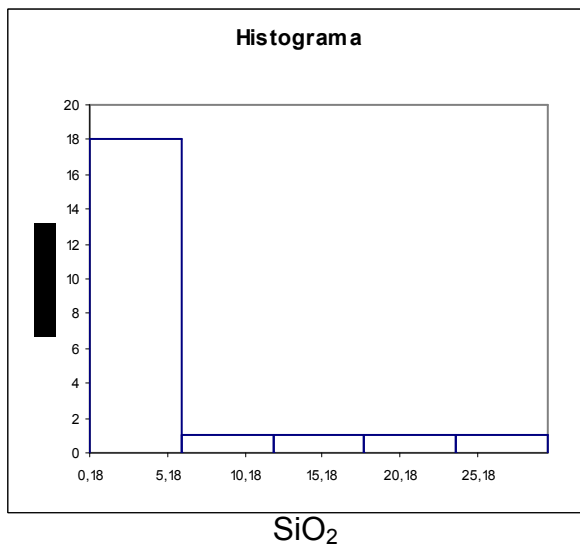
Os teores de MgO têm média de 16%, com valor mínimo de 1,7%, máximo de 20,6% e desvio padrão de 5,7%. Apresenta curva de distribuição polimodal assimétrica (gráfico 05).

Gráfico 05: Histograma e gráfico de correlação dos valores da variável MgO nos mármore dolomíticos.

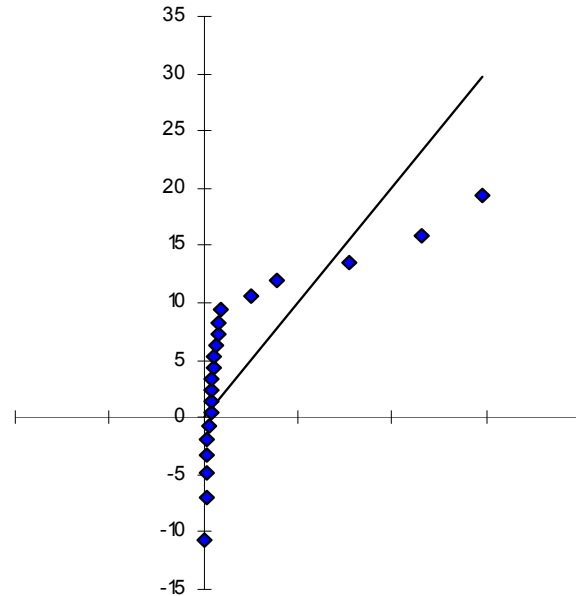


A variável  $\text{SiO}_2$  apresenta grande variação das porcentagens, sua média é 4,3%, valor mínimo de 0,2%, máximo de 29,7% e desvio padrão de 7,8%. Apesar da heterogeneidade das porcentagens dos teores, a curva de distribuição é unimodal simétrica (gráfico 06).

Gráfico 06: Histograma e gráfico de correlação dos valores da variável  $\text{SiO}_2$  nos mármore dolomíticos.



**SiO<sub>2</sub>**



**SiO<sub>2</sub>**

Os valores que estão fora da média seriam as amostras anômalas dos teores dentro do conjunto das rochas.

Os gráficos de correlação para as variáveis de  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$  dos mármore dolomíticos têm seus pontos plotados próximos a reta, mostrando um padrão no conjunto de amostras analisadas. Para a variável  $\text{SiO}_2$  há uma dispersão dos pontos devido às rochas possuírem uma maior variação dos teores deste elemento.

Os mármore calcícticos apresentam teores de  $\text{CaO}$  em torno de 52% e  $\text{MgO}$  0,8%. Os mármore brechados têm em média 16% de  $\text{MgO}$  e 32% de  $\text{CaO}$ . As tabelas abaixo (tabelas 04 e 05) mostram o resultado químico destas amostras.

Tabela 04: Resultados químicos das amostras dos mármore calcíticos (26 amostras).

Amostra	PF	CaO	MgO	Fe2O3	SiO2	Al2O3	MnO	TiO2	Na2O	K2O	P2O5	Sr	So3	Soma
calcítico	39,10	53,32	0,23	1,18	4,90	0,72				0,27			0,48	100,1
calcítico	42,00	53,34	0,49	0,43	2,3	0,66	0,01	0,04	0,02	0,15	0,02			99,56
calcítico	40,49	51,25	0,34	1,39	3,33	1,41		0,25	0,31	0,47	0,07		0,64	99,62
calcítico	42,75	54,41	0,45	0,38	0,93	0,41	0,01	0,02	0,02	0,1	0,02			99,57
calcítico	41,87	52,41	0,38	0,42	3,6	1,08	0,01	0,03	0,02	0,18	0,04			99,77
calcítico	41,06	50,98	0,96	0,59	2,75	1,50	0,15	0,06	1,11	0,39	0,06	0,15	0,72	100,45
calcítico	42,10	52,67	0,57	0,55	2,52	1,04	0,01	0,04	0,01	0,27	0,07			99,58
calcítico	39,74	51,44	0,49	0,44	3,94	1,63		0,08	0,02	0,38	0,04			99,25
calcítico	42,72	54,80	0,76	0,24	1,12	0,66	0,02	0,02	0,15	0,16	0,07			100,71
calcítico	43,43	51,44	3,44	0,60	0,89	0,47	0,04	0,01	0,08	0,13	0,03			100,55
calcítico	43,21	55,55	0,57	0,23	0,92	0,11	0,00	0,02	0,06	0,02	0,02			100,71
calcítico	41,59	47,18	2,00	1,68	3,48	2,51	0,37	0,10		0,51	0,09			99,00
calcítico	41,86	52,29	1,46	0,54	2,60	1,06	0,06	0,05	0,13	0,26	0,03			100,33
calcítico	40,90	49,97	2,48	0,69	4,01	1,54	0,06	0,09	0,05	0,11	0,05			99,93
calcítico	41,79	53,72	0,52	0,42	2,51	0,91	0,00	0,04	0,07	0,17	0,03			100,17
calcítico	40,66	52,03	0,44	0,58	2,96	2,33	0,01	0,09	0,29	0,40	0,03			99,82
calcítico	42,89	55,45	0,55	0,32	1,12	0,45	0,01	0,02	0,04	0,10	0,03			100,97
calcítico	39,18	48,65	0,73	0,65	7,99	1,86	0,01	0,07	0,05	0,42	0,04			99,64
calcítico	41,67	52,62	0,62	0,25	3,68	1,31	0,01	0,04	0,05	0,31	0,02			100,57
calcítico	41,23	52,14	0,55	0,46	3,34	0,97	0,01	0,05	0,01	0,28	0,03			99,06
calcítico	41,87	53,16	0,41	0,27	3,10	0,62	0,00	0,03	0,01	0,15	0,02			99,62
calcítico	42,35	53,34	0,58	0,46	1,75	1,16	0,04	0,05	0,01	0,27	0,02			100,02
calcítico	42,08	53,64	0,45	0,39	2,83	0,67	0,04	0,04	0,01	0,15	0,02			100,31
calcítico	37,75	43,45	0,79	0,71	12,52	3,25	0,13	0,53	0,08	0,64	0,14			100,00
calcítico	42,54	54,13	0,52	0,45	0,25	0,87	0,02	0,05	0,01	0,21	0,03			100,07
calcítico	40,90	50,84	0,53	0,50	5,52	1,44	0,02	0,07	0,02	0,28	0,05			100,17

Tabela 05: Resultados químicos das amostras dos mármore dolomíticos (22 amostras).

Amostra	PF	CaO	MgO	Fe2O3	SiO2	Al2O3	MnO	TiO2	Na2O	K2O	P2O5	Sr	So3	Soma
brechado	43,26	38,61	11,78	1,92	1,93	1,23	0,12	0,05	0,02	0,33	0,07			99,31
brechado	44,96	30,14	20,37	0,70	1,62	1,00	0,03	0,04	0,01	0,24	0,06			99,29
brechado	45,45	30,32	20,11	1,26	1,36	0,90	0,10	0,04	0,01	0,19	0,02			99,79
brechado	46,70	31,09	20,61	1,02	0,25	0,15	0,08	0,01	0,04	0,03	0,04			100,35
brechado	44,79	35,69	15,88	1,03	1,08	0,77	0,08	0,04	0,02	0,16	0,04			100,04
brechado	46,20	32,52	19,41	0,29	0,42	0,15	0,03	0,00	0,04	0,03	0,01			99,10
brechado	46,29	31,21	20,35	0,44	0,85	0,43	0,02	0,02	0,07	0,09	0,02			99,77
brechado	36,05	25,92	13,01	3,45	15,49	3,92	0,24	0,08	0,11	0,75	0,05			99,07
brechado	39,08	40,18	6,97	1,35	7,67	3,86	0,09	0,23	0,07	0,17	0,13			99,78
brechado	45,69	31,69	19,86	1,10	0,41	0,26	0,10	0,01	0,09	0,04	0,03			99,27
brechado	29,90	33,36	1,77	1,52	23,10	7,54	0,12	0,33	0,12	1,52	0,22			99,00
brechado	42,63	32,82	12,59	9,99	1,19	0,39	0,58	0,02	0,31	0,09	0,02			100,63
brechado	46,80	32,02	20,46	0,35	0,18	0,12	0,04	0,01	0,01	0,03	0,01			100,02
brechado	45,34	33,71	17,46	1,48	0,85	0,47	0,11	0,05	0,03	0,11	0,06			99,67
brechado	46,26	31,05	20,48	0,47	0,82	0,44	0,02	0,03	0,03	0,11	0,02			99,73
brechado	45,37	30,23	20,22	0,63	1,53	0,95	0,02	0,07	0,05	0,23	0,04			99,34
brechado	42,29	24,91	20,62	0,79	5,05	2,65	0,02	0,09	1,21	0,58	0,04	1,47		99,99
brechado	44,27	41,53	10,92	1,68	0,71	0,43	0,20	0,02	0,02	0,08	0,02			99,89
brechado	29,98	24,47	4,43	2,18	29,68	5,00	0,15	0,20	0,49	0,93	0,09	1,63	0,4	99,63
brechado	46,39	32,36	19,97	0,42	0,67	0,21	0,02	0,02	0,01	0,04	0,02			100,13
brechado	46,70	31,98	20,55	0,28	0,33	0,14	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02			100,07
brechado	45,99	30,58	19,32	1,89	0,83	0,52	0,11	0,02	0,03	0,09	0,03			99,39

Os difratogramas (tabelas 06 e 07) mostram os resultados reunidos de cada grupo de amostras (brechadas e não brechadas), caracterizado os picos dos minerais mais significativos das amostras.

Nos difratogramas dos mármore calcíticos (tabela 06), há uma coincidência dos picos, onde todos mostram que o principal mineral constituinte da rocha é a calcita e que de acordo com as análises químicas, os teores da CaO estão

contidos neste mineral. Subordinariamente, nos picos menos significativos, há quartzo e muscovita (ver no anexo os difratogramas para cada amostra).

Nos difratogramas das amostras dos mármore dolomíticos também há coincidência dos picos e estão condizentes com as análises químicas. Conforme os difratogramas (tabela 07) o principal mineral constituinte da rocha é a dolomita, e os subordinados calcita, quartzo e muscovita.

Tabela 06: Difratogramas reunidos das amostras dos mármore calcíticos.

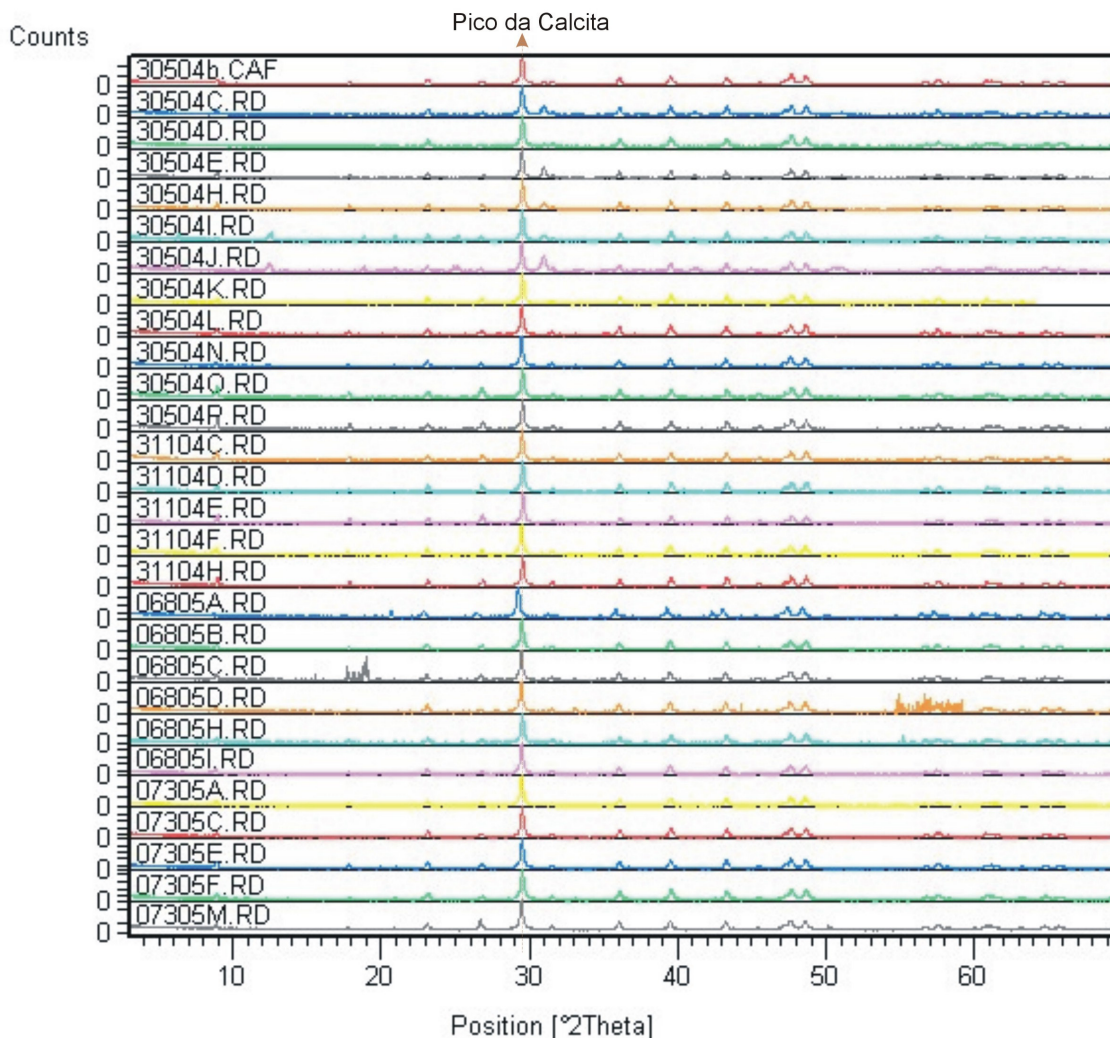
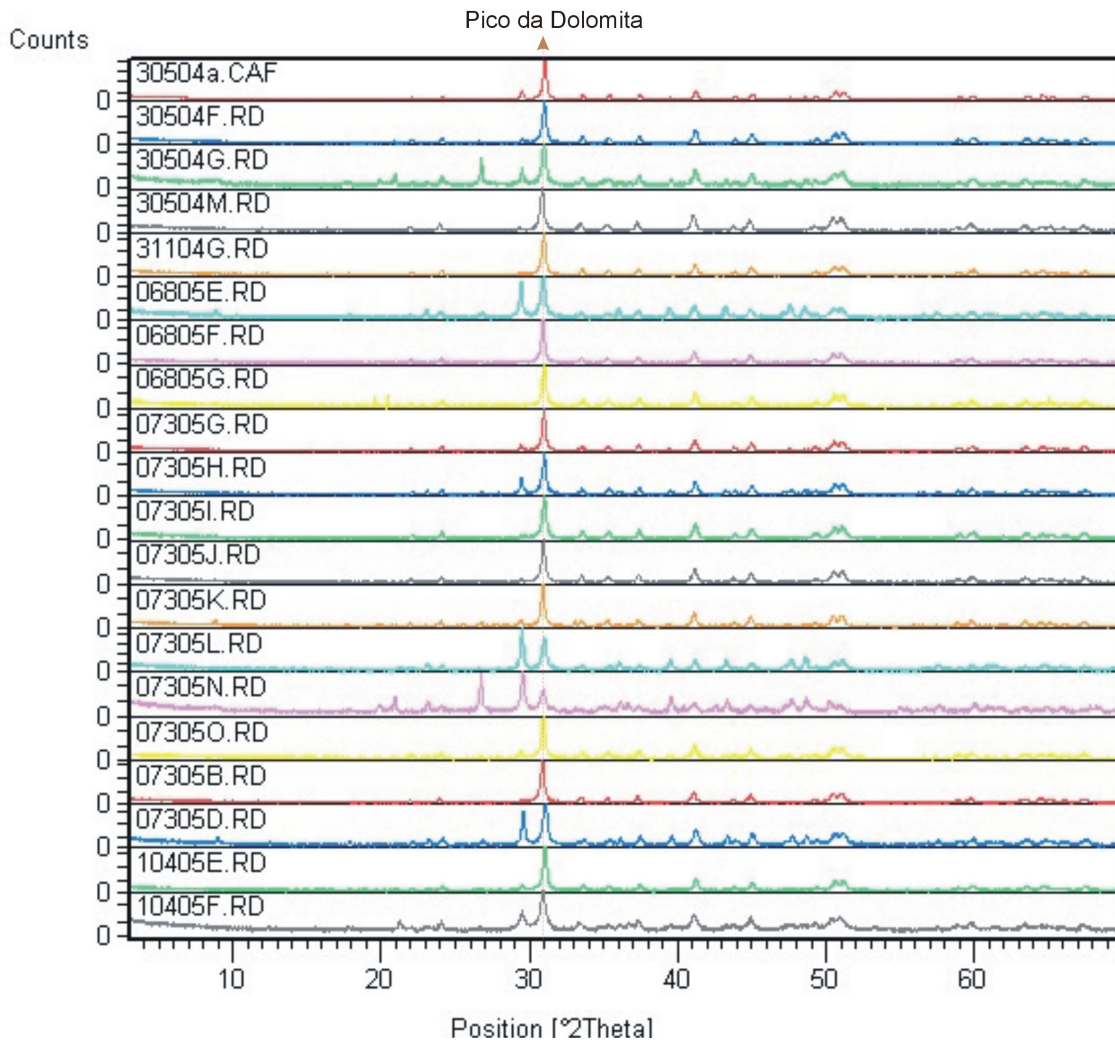


Tabela 07: Difratogramas reunidos das amostras dos mármore dolomíticos



No caso dos metaconglomerados que ocorrem em forma de uma fina lente, de tamanho métrico, restrita as análises foram feitas de três formas: inicialmente coletadas amostras como um todo (clastos do conglomerados mais a matriz), formando um *mix* do material e as outras duas foram separadas os clastos da matriz e analisados separadamente. Como observado na tabela abaixo os maiores teores são de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CaO, seguidos de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO.

Tabela 08: Resultados químicos das amostras dos metaconglomerados.

Amostra	PF	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Sr	Cl	Soma
Mix	21,69	15,68	4,10	4,02	45,57	6,33	0,15	0,27	0,37	1,07	0,07	0,36	0,05	0,13	99,86
Mix	33,76	25,05	3,28	4,70	21,35	10,36	0,13	0,12	0,56	0,18	0,07				99,57
Matriz	23,65	13,93	6,56	4,26	39,24	8,39	0,37	0,40		1,70	0,19	0,92	0,22	0,14	99,97
Clastos	31,16	23,23	7,95	3,44	27,80	3,83	0,29	0,11	0,48	0,71	0,07	0,72		0,18	99,25

## 5- Resultados e Discussões

Com base nas análises químicas, mineralógicas e petrográficas verificou-se que as altas concentrações de MgO (acima de 4%) estão relacionadas, principalmente, com os mármore brechados e, secundariamente, com as lentes metaconglomeráticas.

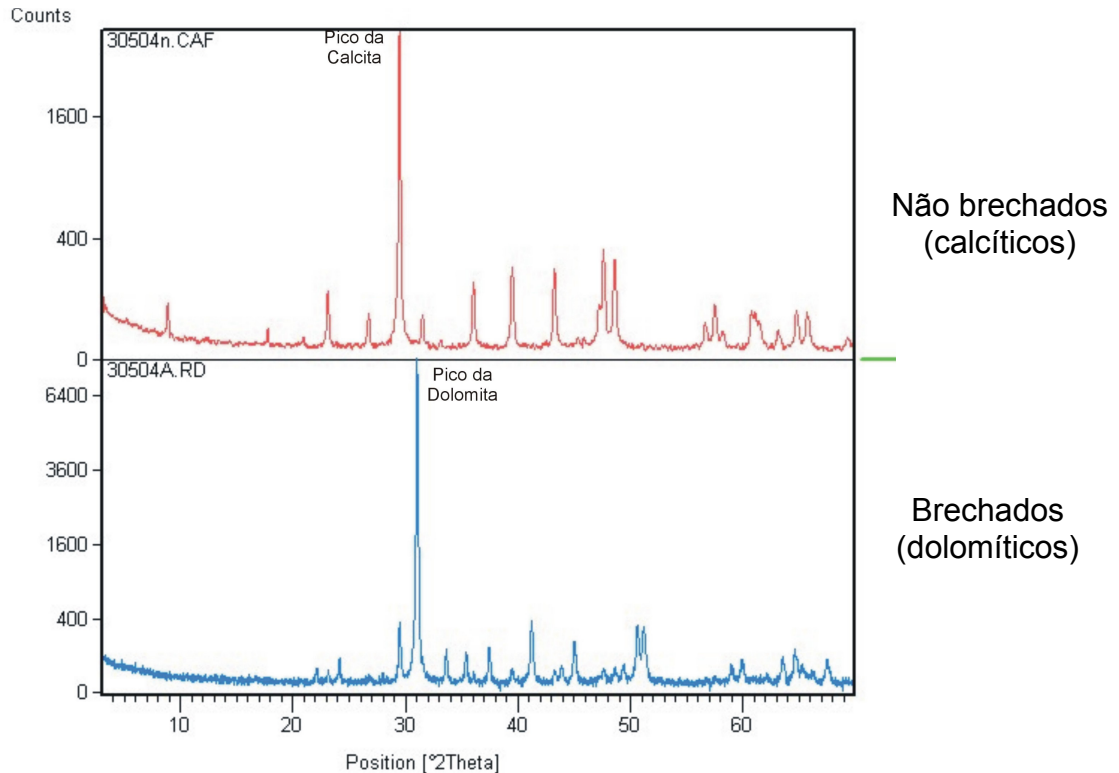
Os mármore dolomíticos (brechados) têm cor castanha, constituídos essencialmente por clastos de dolomita em meio à matriz fina, são facetados e não possuem orientação preferencial.

As análises químicas mostraram que nos mármore dolomíticos a concentração média dos teores de MgO são de 16% e de CaO são de 32%, enquanto que nos mármore calcíticos os teores de MgO são de 0,8% e CaO de 52%. Os teores de SiO<sub>2</sub> em algumas amostras, tanto nos mármore dolomíticos como nos calcíticos, apresentaram teores maiores que 10%. Porém as amostras que apresentaram teores de SiO<sub>2</sub> mais elevados estão concentradas nos mármore dolomíticos.

As análises químicas dos metaconglomerados mostram que os teores de MgO não ultrapassam 8%, porém o que torna este material estéril são os elevados teores de SiO<sub>2</sub>.

Na tabela 09, onde é apresentado o difratograma com a interpretação dos dois tipos de mármore (calcítico e dolomítico), verifica-se que os picos principais são de calcita para as amostras de mármore não brechados e da dolomita nos mármore brechados.

Tabela 09: Difratoograma comparativo dos mármore calcítico e dolomítico.



Petrograficamente é caracterizada esta diferença. Os mármore calcíticos possuem cristalização fina e homogênea de calcita, ao contrário dos mármore dolomíticos que possuem cristalização média-grossa e heterogênea de dolomita.

Neste caso, a cor da rocha também pode ser usada como guia prospectivo. Os mármore dolomíticos apresentam cor castanha e os calcíticos são cinza escuro azulado. A mudança da cor deve-se aos cristais de dolomita possuírem granulação maior, originando uma porosidade secundária. A dolomita é mais densa e sua estrutura cristalina é mais compacta em relação à calcita, o que implica no aumento de volume dos poros da rocha (Shinn, 1998).

A análise estrutural se vale das medidas de foliações, eixos de dobras, fraturas e falhas. Com o controle das deformações dúctil e rúptil e a observação das estruturas, é possível afirmar que o fator condicionante (controlador) destas frentes dolomíticas é estrutural, por meio de cisalhamento rúptil. Apesar do anastomosamento do plano de contato (fraturas) dos mármore calcíticos com os dolomíticos, há uma tendência ao posicionamento perpendicular à foliação

principal, sendo abrupto e limitado por fraturas. Este contato abrupto é confirmado pelas fraturas subverticalizadas, diferença de granulação das rochas, diferença da cor, e pelos resultados das análises químicas e mineralógicas.

O regime dúctil teve pelo menos três fases de deformação, sendo estas a geração da foliação, seu dobramento e posteriormente um redobramento, dando como resultado final um padrão de deformação tipo domo-bacia. Apesar da deformação dúctil estar mais evidente em relação à rúptil, esta não apresentou indícios de que fosse a responsável pelas concentrações e condicionamento das frentes enriquecidas em MgO.

Ao contrário, o regime rúptil, através das fraturas, mostra fortes indícios de ser o controlador das frentes dolomíticas, pelo fato de o contato destas frentes ser abrupto e oblíquo à foliação principal e estar limitando as porções com diferentes assinaturas geoquímicas.

De acordo com Hatch e Rastall (1952) citados em Amaral (1975), a dolomitização secundária pode ser gerada por processo de percolação de fluidos em zonas de fraqueza estrutural. Neste processo houve o rompimento dos grãos de calcita nos mármore calcíticos e o CaO foi substituído pelo MgO, recristalizando como dolomita. Inicialmente houve a cristalização dos clastos, e em uma fase mais tardia, com pressão menor, a cristalização da matriz. Posteriormente, em outra fase, houve a cristalização das calcitas nas fraturas por processos de percolação de águas superficiais.

A dolomitização foi posterior à geração dos mármore calcíticos. A hipótese dos mármore dolomíticos terem sido gerados por processos de dolomitização primária é descartada pelo fato de nenhum dos modelos apresentados por Tucker (1990) se enquadrarem.

O fator determinante para a caracterização da condição de dolomitização secundária é que as frentes dolomíticas estão em contato abrupto, apresentam composição química distinta e são balizadas por sistemas de fraturas em relação às frentes calcíticas.

O conduto mais provável para a circulação dos fluidos durante a brechação seria por fraturas distensionais ou por zonas de fraqueza estrutural pré-existentes. Nestes condutos/zonas de abertura é que o CaO teria sido substituído pelo MgO.

A estrutura deformacional mais proeminente próximo da mina é uma falha transcorrente dextral, componente da Falha do Cerne, com direção aproximada N60E. A falha transcorrente do Cerne também está próxima da mina, a cerca de 2Km a sul. A direção preferencial da porção brechada é N70-80W, seguida de três concentrações menores: N60-70E, N80-90E e N50-60W.

Na figura 31 o diagrama de rosetas mostra a direção dos planos de contato das frentes calcíticas com as dolomíticas. Quando estes planos de contato são sobrepostos ao modelo de *Riedel* (1929) há uma concordância das direções das fraturas e obtém-se:

- ✓ Direção principal das zonas brechadas N70-80W: estariam relacionadas às fraturas de abertura/ fraturas T de partição;
- ✓ As direções: N80-90E e N50-60W: seriam os pares conjugados de cisalhamento R e R';
- ✓ A direção N60-70E: seria a própria direção da falha transcorrente.

Apesar do anastomosamento e direções variadas do plano de contato das frentes dolomíticas em relação as calcíticas, a maior moda das medidas é N70-80W.

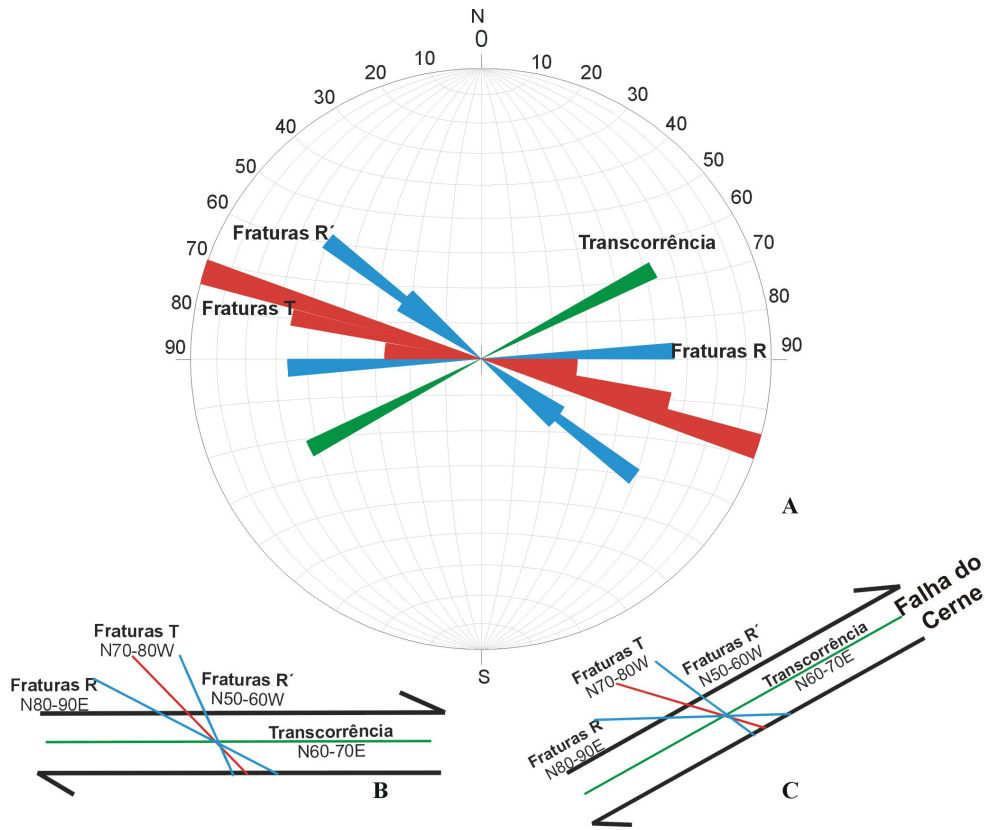


Figura 31: A: Diagrama de rosetas dos planos de contato.  
 B: Direções dos contatos aplicados a *Riedel*.  
 C: Direções dos contatos aplicados a *Riedel* e orientados segundo suas direções reais.

## 6- Considerações Finais e Recomendações

Neste trabalho foi realizado um estudo das rochas da Mina Rio Bonito e do entorno, aproximadamente 30Km<sup>2</sup>, caracterizando-as química, petrográfica, mineralógica e estruturalmente. Os métodos utilizados foram análises geoquímicas de rocha total por meio de fluorescência de raios X, análises mineralógicas por meio de difração de raios X, petrografia e análise estrutural. O enfoque integrado dos diversos métodos mostrou resultados satisfatórios, permitindo individualizar as frentes de mármore dolomítico e identificar fatores controladores de sua ocorrência no mármore calcítico.

Na área do entorno da mina afloram rochas de baixo grau metamórfico, pertencentes à fácies xisto-verde, zona da clorita, representadas por metacalcários, mármore, margas, filitos, quartzitos, além de granitos, conglomerados e secundariamente diques de rochas básicas e depósitos inconsolidados do quaternário.

Os conglomerados não possuem deformação, porém localmente apresentam elevado grau de silicificação. O granito Passa Três é balizado pela falha transcorrente do Cerne. No contato da falha com a encaixante a rocha está cataclada.

As demais unidades, mármore, filitos e quartzitos, apresentam forte padrão de deformação, evidenciados nas diferentes direções das foliações. A foliação principal Sn possui caráter penetrativo, paralela ou subparalela ao acamamento sedimentar e marcante anastomosamento. Apresenta dobras com ângulos interflancos de cerrados a suaves. A direção preferencial desta foliação é N30E/55NW. Uma segunda foliação, mais restrita, chamada de Sn+1, corta a foliação Sn com direção média N60W/35NE. Por vezes encontra-se paralela à Sn.

No sistema rúptil, as falhas de forma geral apresentam características de movimento anti-horário e direção média de N35-45E. As juntas não apresentam padrão definido.

Conforme o objetivo proposto, o detalhamento do estudo voltou-se para as rochas aflorantes na mina Rio Bonito, as quais são em sua maioria mármore calcítico, de cor cinza escura, com venulações também de calcita, sem

orientação preferencial. Normalmente apresentam forte deformação. A deformação dúctil é proeminente, com foliação principal  $S_n$  paralela ao acamamento sedimentar, algumas vezes é possível observar uma segunda foliação perpendicular à foliação principal, denominada de  $S_{n+1}$ . Em lâmina delgada, observa-se granulação fina de cristais de calcita e venulações preenchidas por calcita.

Algumas porções são representadas por metacalcários, onde é possível visualizar o acamamento reliquiar. Em lâmina delgada, o acamamento é incipiente, visualizando-se apenas cristais de calcita com granulação fina, em meio a fraturas estilolíticas preenchidas por calcita, orientadas paralelamente ao plano do acamamento e também da foliação.

O mármore dolomítico brechado aflora em uma faixa na parte central da mina, com aproximadamente 100 metros de largura. Os mármorees são constituídos por matriz e clastos de dolomita, os quais são facetados com tamanho milimétrico a centimétrico, não têm orientação nem estruturas sedimentares preservadas. Estes mármorees possuem maior nível de alteração superficial em relação ao mármore calcítico, devido ao processo de dolomitização que gerou uma porosidade secundária. Com o aumento da porosidade da rocha, a percolação de águas superficiais é facilitada, resultando, assim, maior alteração.

Em pequena faixa dentro da mina, apenas em um nível da frente sul, afloram os metaconglomerados com material pouco coeso. O metaconglomerado é polimítico com matriz suportado, os seixos são de quartzo e material carbonático de tamanho centimétrico, e a matriz constituída de quartzo, muscovita e carbonatos.

Os mármorees, de forma geral, possuem foliação  $S_n$  marcante, paralela ao acamamento sedimentar, penetrativa, anastomosada e heterogênea, possuem dobras métricas abertas a suaves e eixos subhorizontalizados. Existe um segundo padrão de dobramento da foliação  $S_n$ , com eixos subverticalizados, caracterizando uma terceira fase de deformação, configurando padrão de deformação tipo domo-bacia.

A direção preferencial da foliação Sn é N30E/55NW e subordinariamente N60W/25NE, configurando uma dobra aberta. Para o sistema rúptil as juntas apresentam direção preferencial N45-80E/NW e as falhas N60W/SW.

Apesar do anastomosamento do plano de contato das frentes calcíticas e dolomíticas as maiores concentrações das medidas são N70-80W. O contato entre os mármore se faz por meio de sistema de fraturas. Apesar do anastomosamento do plano de contato da parte dolomítica com a calcítica, há uma tendência ao posicionamento oblíquo à foliação principal.

As análises químicas realizadas nos mármore calcíticos mostraram que os valores médios de teores de CaO são de 52% e de MgO 0,8%. Os mármore dolomíticos possuem 32% de CaO e 16% de MgO. A diferença dos teores de CaO do mármore calcítico em relação ao dolomítico é de 20% e a relação de variação dos teores de MgO nos mármore calcítico e dolomítico é 16%.

Mineralogicamente, por meio das interpretações das difrações de raios X, é confirmado que os teores de CaO dos mármore calcíticos estão contidos em calcita, e os teores de MgO dos mármore dolomíticos estão em dolomita.

A hipótese inicialmente levantada de que o mármore dolomítico foi gerado após a gênese do mármore calcítico, a partir da dolomitização, por meio de processo de percolação de fluidos em zonas de fraqueza estrutural é coerente. Em estudos de dolomitização na Formação Irati, Hatch e Rastall (1952), citado por Amaral (1971), afirmaram a mesma hipótese para processos de dolomitização secundária. De acordo com os autores citados, o processo gerador é de dolomitização secundária e o fator controlador é estrutural.

De acordo com Amaral (1971), com a entrada dos fluidos nas fraturas houve o rompimento e brechação do material e o CaO dos mármore foi substituído pelo MgO.

As direções de percolação dos fluidos estão relacionadas ao regime rúptil. Aplicando o modelo de *Riedel* para a área estudada, verifica-se que as direções dos planos de contato das frentes calcíticas e dolomíticas são coincidentes com as fraturas de abertura, ou de extensão. Estas zonas de abertura, por onde houve a

percolação dos fluidos, estão geneticamente relacionadas à estrutura regional mais significativa, a falha transcorrente do Cerne.

Porém, como os dados químicos, mineralógicos, petrográficos e estruturais foram obtidos em amostras de superfície (frentes de lava), é necessária a investigação em furos de sondagem.

A malha dos furos de sondagem deve ser detalhada próxima aos planos de contato para constatar sua direção preferencial. Deve-se evitar abrir novas bancadas na direção N70-80W, conforme esboço da figura 32.

Sugere-se ainda o mapeamento estrutural das novas bancadas, conforme o desenvolvimento da mina, verificando o plano de contato das frentes CaO e MgO, com abertura e avanço das bancadas onde a probabilidade de existir mármore calcítico seja menor, ou seja, lado E na mina.

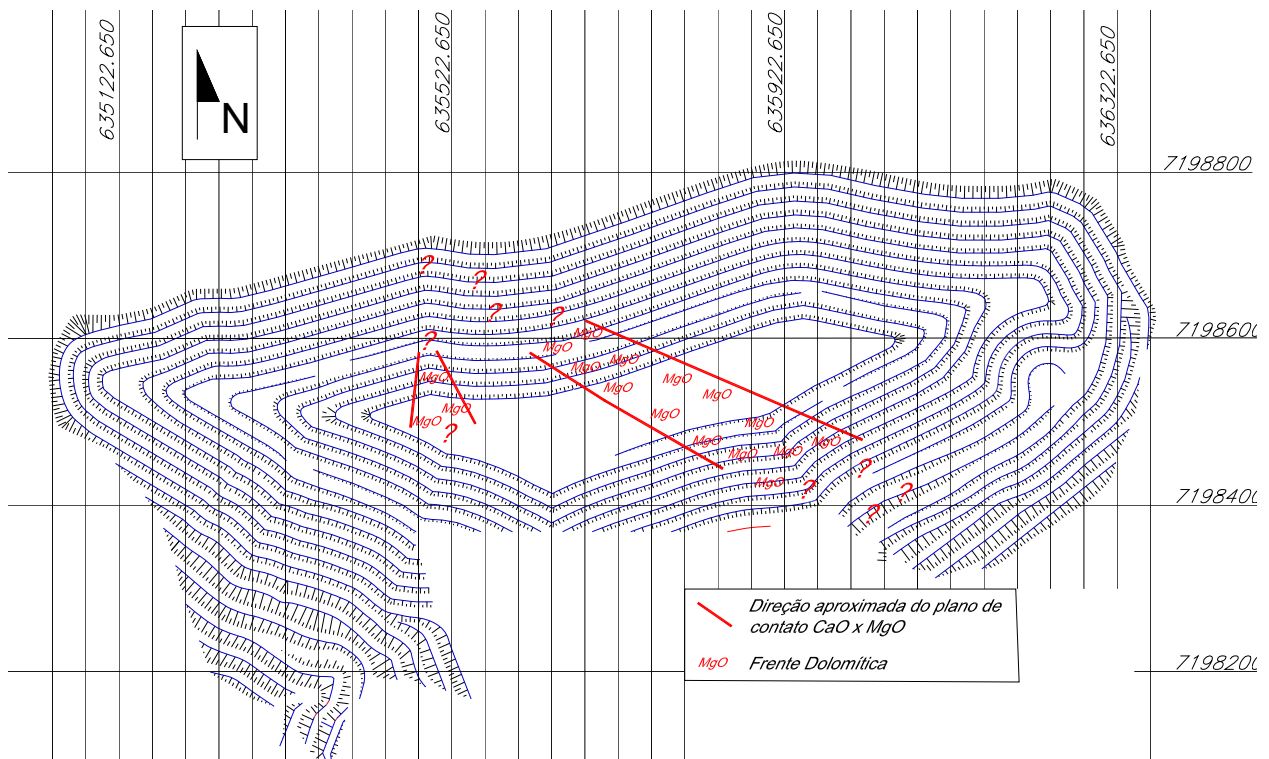


Figura 32: Esboço da mina com a direção preferencial da frente dolomítica.

Como guias prospectivos para exploração deve-se levar em consideração algumas características, entre elas, cor e granulação da rocha. Os mármore dolomíticos são castanhos com granulação média-grossa e os mármore calcíticos são cinza escuro com granulação fina. Outro guia é o quimismo dos mármore, observando as variações dos teores de CaO e MgO a partir dos planos de fratura subverticalizados.

## 7- Referências

- ALMEIDA, F.F.M; HASUI,Y; NEVES, B.B.; FUCK, R.A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. In: Simpósio Geologia. do Nordeste, 8, Campina Grande, 1977. **Atas...** Campina Grande, SBG/NNE. P.363-391.
- AMARAL,S. E 1971 Geologia e Petrologia da Formação Irati (Permiano) do Estado de São Paulo. **Boletim IGA**. Instituto de Geociências e Astronomia-USP. São Paulo. Número 6:03-82.
- AMARAL,S. E 1975 Sobre os Dolomitos e o processo da dedolomitização na Formação Irati (Permiano) do estado de São Paulo. **Boletim IG**. Instituto de Geociências USP. São Paulo. Vol 6:21-32.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM. 1990.C: **Standart test method for uniaxial compressive strength**. 170p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT.. NBR 9773: Agregados – Determinação das impurezas orgânicas húmicas em agregado miúdo. Rio de Janeiro. 1987d.
- DAITX, E. C. *et al.* (1983). **Projeto Anta Gorda, fase III**. Mapeamento geológico da área norte. São Paulo : DNPM.
- FASSBINDER, E. 1996. **A unidade Água Clara no contexto do Grupo Açungui: Um modelo transpressivo de colisão oblíqua no Neoproterozóico paranaense**. Tese. São Paulo. Departamento de Geologia. USP.
- FIORI, A. P. *et al.* (1987). Compartimentação tectônica do Grupo Açungui a Norte de Curitiba. In: Simpósio Sul Brasileiro de Geologia, 3., 1987, Curitiba. **Atas...** Curitiba : SBG, p. 183-196.
- FIORI, A. P. 1990. **Tectônica e Estratigrafia do Grupo Açungui a Norte de Curitiba**. Tese de Livre Docência, Inst. de Geoc., USP.
- FIORI, A.P. 1992. O Grupo Açungui a norte de Curitiba. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 37., 1992, São Paulo. **Boletim de Resumos Expandidos...** São Paulo: SBG, p.279-280.V1.
- FIORI, A.P. 1993. Considerações sobre a estratigrafia do Grupo Açungui (proterozóico superior), Paraná, Sul do Brasil.. **Boletim do IG-Série Científica**. São Paulo, v24,p1-19.

FIORI, A P. (1994). Evolução geológica da Bacia Açungui. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n. 42, p. 7-27.

FRAZÃO, E.B.; PARAGUASSU, A.B. 1998. Materiais rochosos para construção. Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE. P.331-342.

FRAZÃO, E.B. 2002. **Tecnologia das Rochas na Construção Civil**. São Paulo ABGE. 131p.

FRITZONS JUNIOR, O. *et al* 1982 Geologia e potencial econômico do Grupo **Setuva (PR)**. In: **Congresso Brasileiro de Geologia, 32., 1982, Salvador. Anais.....** Salvador:SBG, p.9887-1001.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; COIMBRA, A M. 1975. The Ribeira folded belt. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 5, n. 4, p. 257-266.

KOPS, P.I. (1994). **Geologia das formações Antinha, Votuverava e Água Clara à sudoeste do Complexo Granítico Três Córregos. Estado do Paraná**. Dissertação de Mestrado, São Paulo, UNESP. 132p.

MAACK, R. 1968. **Geografia Física do Estado do Paraná**. Curitiba-PR. 350p.

MORO, R.P.X. 2000. **Proposta da Origem, Evolução e Contexto da Formação Camarinha-Transição Neoproterozóico-Eocambriano do Estado do Paraná**. Tese de Doutorado. São Paulo. Departamento de Geologia. USP. 145p.

MURATORI, A.; FUCK, R.A.; BIGARELLA, J.J. 1966. Contribuição ao estudo da Formação Camarinha. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n23/25, p. 221-255.

PETRI, S. SUGUIO, K. 1969. **Sobre os metassedimentos do Grupo Açungui no Extremo sul do Estado de São Paulo**. Convênio USP-DAEE, 98p. Inédito.

PETRUCCI, E.G. 1971. **Concreto de cimento Portland**. Porto Alegre: Globo. 277p.

PETRUCCI, E.G. 1975. **Materiais para construção**. Porto Alegre: Enciclopédia Técnica Universal Globo. 435p.

PIRES, F.A. 1990. **Análise Paleoambiental e Estratigrafia das Seqüências metassedimentares (Grupo Açungui) na região de Iporanga-Apiá-São Paulo**. Dissertação de Mestrado. USP. 151p.

- PONTES, J.B. 1982. Geologia e potencialidades econômicas da Formação Água Clara. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 32., 1982.Salvador. **Anais...**Salvador:SBG, p 1002-1016.v.3.
- POPP, J. H. (1972). Contribuição à estratigrafia e sedimentologia da Formação Camarinha (pré-devoniano do Estado do Paraná). **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n. 30, p. 7-97.
- REIS NETO, J.M.; SOARES, P.C. 1987. Um estudo de caracterização termodinâmica de micro-estruturas dos grupos Açungui e Setuva (PR). In: Simpósio Sul Brasileiro de Geologia, 3.1987, Curitiba. **Atas...**Curitiba:SBG.p.147-165.
- SALAMUNI, E. 1995. Dobramentos e redobramentos superpostos na porção Sul da zona de cisalhamento Lancinha-Cubatão. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, n. 43, p. 135-149.
- SHINN,E 1998.Tidal Flat. In: Shoole, P.A, Bebout, D.G, Moore, C.H. (ed.) **Carbonate Depositional Enviroments**. 4<sup>a</sup> ed.. Tusla, Oklahoma, AAPG, 173-207.
- SOARES, P.C. 1987. Seqüências tectono-sedimentares e tectônica deformadora no centro-oeste do escudo paranaense. In: Simpósio Sul Brasileiro de Geologia. 1987, Curitiba . **Atas...**Curitiba: SBG. p.743-771.v 2.
- SOARES, P. C.; GOIS, J.R. 1987- Geologia do Granito Passa Três (Pr) e suas mineralizações auríferas. In: Simpósio Sul Brasileiro de Geologia, 3, Curitiba, 1897, **Atas...**V.2, p 497-514.
- SUGUIO, K. 2003. **Geologia sedimentar**. Editora Edgard Blucher Ltda., EDUSP, 400pp.
- TUCKER, M.E. 1990. Dolomites and dolomitization models. In: TUCKER, M.E. & JAMES, N. (ed). **Carbonate Sedimentology**. Ontário Blackwell Science Geological Association of Canadá, 365-400.
- VENUZZO, G.C. 2001. **Aspectos geológicos, geoquímicos e genéticos das mineralizações de calcita e rochas encaixantes da Serra do Corumbé, Vale do Ribeira, Estado do Paraná**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia UFPR. 104p.