

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**EVOLUÇÃO PETROLÓGICA DE UM SILL DE  
DIABÁSIO NA REGIÃO DE LIMEIRA (SP):  
PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA**

Camila Antenor Faria

Orientador: Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2005/04)

SÃO PAULO  
2005

TF  
F224  
CA.e

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC



30900018062

**Evolução Petrológica de um Sill Diabásio na Região  
de Limeira – SP: Caracterização de Líquidos  
Residuais Graníticos e da Alteração Hidrotermal  
Através de Análise Química de Minerais por  
Microssonda Eletrônica**

**Camila Antenor Faria**



Monografia de Trabalho de Formatura

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi

Prof. Dr. Silvio Roberto Farias Vlach

Prof. Dr. Ian McReath

São Paulo

TP  
F224  
CA e



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP**

**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IGc**

**044-500 – TRABALHO DE FORMATURA**

**Trabalho de Formatura 2005**

**Evolução petrológica de um sill de diabásio na região de  
Limeira (SP): petrografia e geoquímica**

TF/2005-04

Aluna: Camila Antenor Faria

Orientador: Valdecir de Assis Janasi

São Paulo, novembro de 2005

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, o Prof. Valdecir Janasi, por sua enorme paciência, dedicação, incentivo e compreensão na elaboração e correção deste trabalho, além é claro por contribuir constantemente, já a 3 anos para o meu crescimento científico e me fazer ver o quão maravilhoso é o mundo da geologia.

Agradeço às diversas pessoas que colaboraram com a execução desse trabalho nos laboratórios do GMG, IGc da USP, principalmente: a Angélica (Óptica), Zé (LTA), o Paulinho (FRX) e em especial ao Marcos (Microssonda) por sua imensa paciência e auxílio. E a agência FAPESP, pela bolsa de Iniciação Científica e auxílio financeiro.

Agradeço e muito ao Frederico (Jaú) por ser um anjo e se mostrar um grande amigo. Sua paciência, seu conhecimento me foram de grande valia durante todo esse ano.

Agradeço também a todas as pessoas envolvidas durante os 5 anos de graduação como funcionários e professores, alguns dos quais guardo grande carinho como: o Prof. Schorscher, Prof. Silvio Vlach, Prof. Excelso Ruberti e Prof. Daniel Atencio. Principalmente a TODOS os colegas de sala (Turma 2001) que proporcionaram momentos inesquecíveis, em aula, em campo, no bandejão (Tampax!) no banco ou fora dele. Ao pessoal da Turma de 2000 e 1999 pelas noites e tardes do Franguinho.

Ao Elder (Noku) por sua amizade e companheirismo nas discussões científicas; o Danilo (Biva) por ser um amigo e tanto pra todas as horas; a Maria Elisa (Kacilda – A DUPLA!) companheira e amiga inseparável de discussões, estresses, campos e muitos papos; a Diana por sua amizade e mais outras coisinhas; a Patrícia (Lamera) e Débora (OB) companheiras inesquecíveis de longos papos e D4.

Agradeço ao geólogo Leandro Bertossi (Xubaca), companheiro e amigo ao longo desses anos, que tornou a realização desse trabalho possível. Seu constante incentivo, apoio e ajuda sempre foram muito importantes para me dar forças. Pelas horas de estudo ao longo da graduação, pelas horas que passou arrumando figuras deste trabalho, por correções prévias e me apoiar sempre serei grata por todo o tempo.

Agradeço com todo meu amor os meus pais, por todo o apoio que tive quando optei por geologia. Por toda a ajuda, compreensão e carinho que sempre foram muito importantes para mim, não apenas nos últimos 5 anos, mas por toda a minha vida. Sem eles esse trabalho não seria possível.

Por último, mas não menos importante, muito pelo contrário, agradeço ao Júlio Cesar (Chachá). Por ser meu amigo ao longo de todos esses anos, companheiro de campo, e nesse último ter se tornado alguém tão especial. Alguém que me faz muito feliz e faz a diferença, me faz rir, me mima, está sempre me dando forças e incentivando, agüentando mau humor, falta de tempo e o estresse de fim de curso; por querer ajudar mesmo sabendo que não pode, e sem poder também sempre arrumar um tempinho pra gente se ver e matar um pouco as saudades. Por tudo isso e muito mais agradeço a ele com todo meu coração.

Agora por fim mesmo eu agradeço a mim!!! Depois de tudo isso eu mereço! Pois só eu sei “o quanto eu caminhei, pra chegar até aqui, percorri milhas e milhas, antes de dormir, eu não cochilei, os mais belos montes escalei, nas noites escuras de frio chorei”.

## RESUMO

Evolução petrológica de um sill de diabásio na região de Limeira (SP):  
petrografia e geoquímica

TF/2005-04

Aluna: Camila Antenor Faria

Orientador: Valdecir de Assis Janasi

A ocorrência de diabásio da Pedreira Cavinatto em Limeira, SP, expõe uma grande variedade de rochas e feições estruturais/texturais incomuns em sills associados à Formação Serra Geral.

As rochas possuem ampla variação composicional, aparentemente contínua, entre basalto afanítico, na borda de resfriamento, e diorito muito grosso na parte mais central. Em veios centimétricos que cortam os gabros e dioritos, ocorre riolito, que mostra existir um importante salto composicional em relação às demais rochas. Os diabásios próximos à borda de resfriamento exibem ocelos, de composição quartzo-feldspática semelhantes ao riolito, enquanto veios hidrotermais podem preencher porções centrais de veios riolíticos e formar amígdalas em diabásio e basalto na parte superior do sill.

O processo de cristalização fracionada pode explicar a tendência evolutiva contínua até o diorito, como mostrado pela geoquímica de rochas e pela química dos piroxênios e plagioclásios. No entanto, existem feições petrográficas que indicam desequilíbrio químico: pigeonitas corroídas por augitas nas bordas e plagioclásios (An50-30) com sobrecrecimento de albita e feldspato potássico.

Uma possível explicação para o salto de composição entre o diorito e o riolito, seria um processo de imiscibilidade que poderia estar relacionado com o enriquecimento de sílica e ferro no magma, durante o fracionamento, até um limite de imiscibilidade no qual poderiam resultar dois líquidos: um “rico em sílica”, o riolito, e ou outro “rico em ferro”. Neste caso, é possível que também os ocelos tenham sido gerados por um processo desse tipo, representando líquidos riolíticos que ascenderam até o topo da câmara antes da cristalização completa do sill.

## ABSTRACT

### Petrologic evolution of a diabase sill in the Limeira region (State of São Paulo): petrography and geochemistry

The diabase occurrence at the Cavinatto Quarry, Limeira (State of São Paulo) exposes a wide rock variety with structural and textures that are not common in the Serra Geral Formation.

The compositional variation is apparently continuous from cooling top border aphanitic basalt to inner coarse-grained diorite. Rocks with rhyolite composition occur filling thin centimetric veins that cut the gabbros and diorites and as ocelli within diabase near the floor, and point to the existent of an important compositional gap within the sill. A late hydrothermal phase is represented by a quartz-zeolite-apophyllite assemblage that appears filling veins and amygdales in the upper portion of the sill.

A fractional crystallization process can explain the continuous evolutive sequence from basalt to intermediate diorite, as shown by rock geochemistry variations and by the continuous evolution of plagioclase and pyroxene. There are, however, petrographic features suggestive of chemical disequilibrium such as corroded pigeonite mantled by Fe-rich augite and calcic plagioclase (An50-30) overgrown by albite and K-feldspar.

A possible explanation for the compositional hiatus between diorite and rhyolite would be an immiscibility process where by extended crystal fractionation led to a extreme iron and silica enrichment reaching a imiscibility limit at which two liquids were generated, one "silica-rich" and the other "iron-rich". If this is the case, it is possible that the ocelli were also generated by such a process, and represent early rhyolite drops that ascended to the upper portion of the camera before the complete solidification of the magma.

# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>TRABALHOS PRÉVIOS.....</b>	<b>3</b>
<b>3.1</b>	<b><i>GEOLOGIA REGIONAL .....</i></b>	<b>3</b>
<b>3.2</b>	<b><i>GEOLOGIA LOCAL.....</i></b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS, MÉTODOS E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....</b>	<b>6</b>
<b>4.1</b>	<b><i>PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....</i></b>	<b>6</b>
<b>4.2</b>	<b><i>ANALISES PETROGRÁFICAS .....</i></b>	<b>6</b>
<b>4.3</b>	<b><i>ANALISES QUÍMICAS DE MINERAIS.....</i></b>	<b>7</b>
<b>4.4</b>	<b><i>ANALISES QUÍMICAS DE ROCHA TOTAL.....</i></b>	<b>8</b>
<b>4.5</b>	<b><i>AVALIAÇÃO DA QUALIDADE ANALÍTICA .....</i></b>	<b>9</b>
<b>4.6</b>	<b><i>DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....</i></b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>EXPOSIÇÃO DA PEDREIRA CAVINATTO .....</b>	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>PETROGRAFIA.....</b>	<b>15</b>
<b>6.1</b>	<b><i>BASALTOS.....</i></b>	<b>16</b>
<b>6.2</b>	<b><i>DIABÁSIO .....</i></b>	<b>16</b>
<b>6.3</b>	<b><i>GABROS.....</i></b>	<b>17</b>
<b>6.4</b>	<b><i>DIORITO.....</i></b>	<b>18</b>
<b>6.5</b>	<b><i>RIOLITOS.....</i></b>	<b>19</b>
<b>6.6</b>	<b><i>VEIOS HIDROTERMAIS .....</i></b>	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>QUÍMICA MINERAL .....</b>	<b>19</b>
<b>7.1</b>	<b><i>PIROXÊNIOS.....</i></b>	<b>19</b>
<b>7.2</b>	<b><i>FELDSPATOS .....</i></b>	<b>25</b>
<b>8</b>	<b>GEOQUÍMICA DE ROCHAS .....</b>	<b>30</b>
<b>9</b>	<b>SÍNTESE FINAL E CONCLUSÕES.....</b>	<b>40</b>
<b>10</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>44</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>37</b>

**Figura 4 – Fotografias de campo de rochas do sill de Limeira**

**Figura 5 – Fotomicrografias de lâminas de rochas do sill de Limeira**

**Figura 8 – Fotomicrografias mostrando a posição de pontos de análise por microssonda eletrônica em rochas do sill de Limeira**

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> – Localização da área e acessos à cidade de Limeira, SP. Mapa Rodoviário do Estado de São Paulo, modificado de Guia Quatro Rodas, 2002.	2
<b>Figura 2</b> – Comparação das análises de elementos traços por ICP-MS das duplicatas da amostra IGN75G1 (riolito).	11
<b>Figura 3</b> – Perfil esquemático da Pedreira Cavinatto e localização das amostras IGN.	14
<b>Figura 6</b> – Classificação dos piroxênios no basalto e diabásio, do sill de Limeira, no diagrama Wo-Fs-En.	21
<b>Figura 7</b> – Classificação dos piroxênios no gábrico, do sill de Limeira, no diagrama Wo-Fs-En.	22
<b>Figura 9</b> – Classificação dos piroxênios no diorito, do sill de Limeira, no diagrama Wo-Fs-En.	23
<b>Figura 10</b> – Classificação dos piroxênios no ríolito, do sill de Limeira, no diagrama Wo-Fs-En.	24
<b>Figura 11</b> – Composições dos piroxênios do sill de Limeira, no diagrama Wo-Fs-En, e isotermas. Adaptado de Lindsley, 1983.	25
<b>Figura 12</b> – Classificação dos plagioclásios no basalto e diabásio, do sill de Limeira, no diagrama Or-Ab-An.	27
<b>Figura 13</b> – Classificação dos plagioclásios no gábrico, do sill de Limeira, no diagrama Or-Ab-An.	28
<b>Figura 14</b> – Classificação dos plagioclásios no diorito, do sill de Limeira, no diagrama Or-Ab-An.	29
<b>Figura 15</b> – Classificação dos plagioclásios no ríolito, do sill de Limeira, no diagrama Or-Ab-An.	30

**Figura 16** – Diagrama para os elementos traços, obtidos através de FRX e ICP-MS. 34

**Figura 17** – Diagrama dos Elementos Terras Raras, obtidos por análise de ICP-MS, normalizados para C1 Condrito. 35

**Figura 18** - Diagramas de variação para os óxidos dos elementos maiores (em %) utilizando da sílica como índice de diferenciação. 36

**Figura 19** - Diagramas de variação para os óxidos dos elementos traço (em ppm) utilizando da sílica como índice de diferenciação. 37

## Índice de Tabelas

<b>Tabela I</b> – Resultados de análises químicas dos padrões de referência geoquímica internacional: JB 1a e JG 1a para basaltos e granitos, utilizados para o método de FRX.	10
<b>Tabela II</b> – Parâmetros utilizados para controle de qualidade das análises de ICP-MS, incluindo limites de detecção e análises de branco.	12
<b>Tabela III</b> – Cronograma de atividades desenvolvidas ao longo do ano.	13
<b>Tabela IV</b> – Análises químicas representativas, por microssonda eletrônica, de piroxênios de diabásios e rochas associadas na Pedreira Cavinatto (sill de Limeira, SP).	20
<b>Tabela V</b> – Análises químicas representativas por microssonda eletrônica de plagioclásios de diabásios e rochas associadas na Pedreira Cavinatto (sill de Limeira, SP).	26
<b>Tabela VI</b> – Análises químicas por microssonda eletrônica de granófiros em gabros e diorito na Pedreira Cavinatto (sill de Limeira, SP).	28
<b>Tabela VII</b> – Análises químicas por FRX (Fluorescência de Raios-X) e normas CIPW de amostras representativas do sill de Limeira.	31
<b>Tabela VIII</b> – Análises químicas de elementos traços por FRX (Fluorescência de Raios-X) e ICP-MS (Espectrometria de Massas com Plasma Acoplado) de amostras representativas do sill de Limeira.	32

# 1 INTRODUÇÃO

---

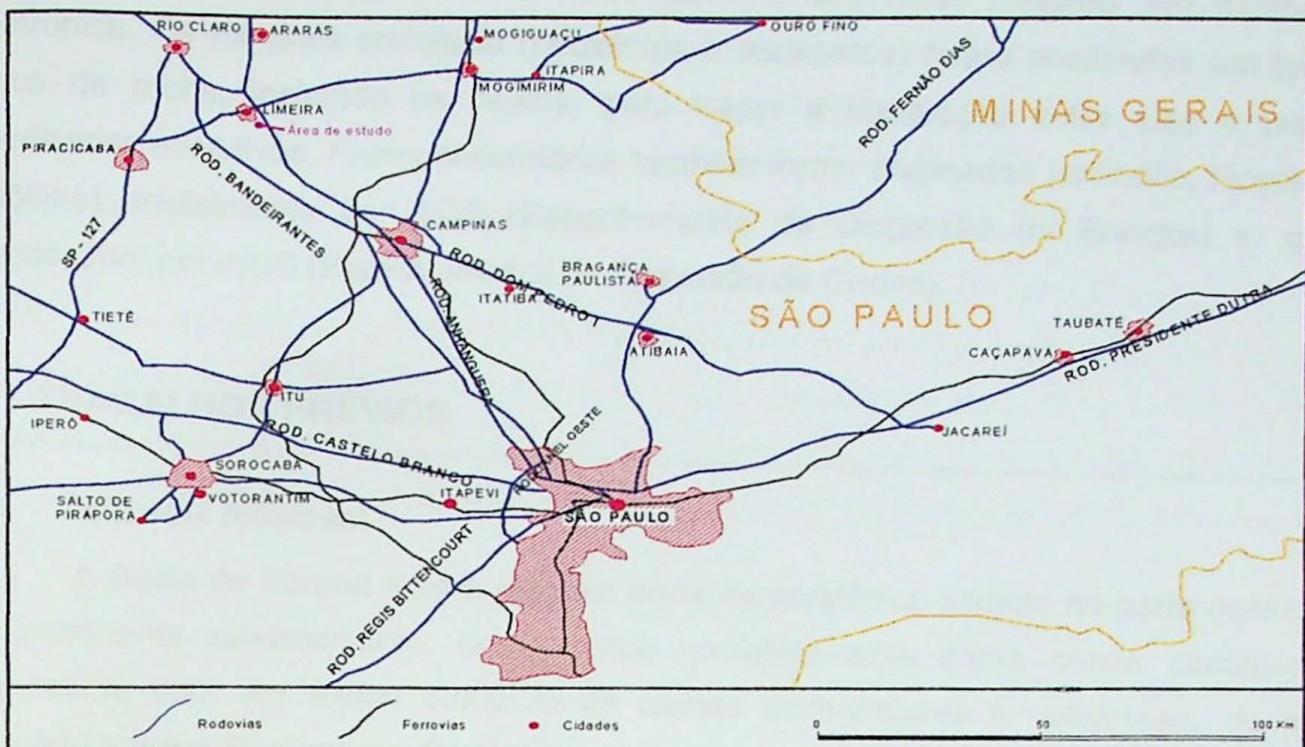
O principal tema tratado nesta Monografia é o processo de diferenciação magmática ocorrido em um sill de diabásio, exposto em meio a arenitos do Subgrupo Itararé (Bacia do Paraná), na cava da Pedreira Cavinatto, cidade de Limeira, SP. A ocorrência é particularmente interessante por apresentar algumas feições peculiares, raramente reportadas em outras ocorrências semelhantes, como a presença de dioritos extremamente grossos, com expressivas manchas de composição quartzo-feldspática, a presença de veios de rocha ácida (riolítica), freqüentemente associados a microvenulações de natureza pós-magmática (e.g., preenchidas por zeólitas, apofilita) e a intensa transformação da mineralogia primária.

Poucos lugares apresentam tamanha variação de feições estruturais e texturais em sills associados à Formação Serra Geral como a exposição da Pedreira Cavinatto, o que torna o local excelente para estudos. Entende-se que as feições estruturais e texturais presentes neste sill oferecem uma exposição privilegiada que permite a investigação das relações entre os produtos de processos magmáticos tardios (líquidos residuais graníticos que formam bolsões granofíricos nos gabros grossos; veios riolíticos; ocelos quartzo-feldspáticos) e entre estes e os processos hidrotermais (veios e amígdalas preenchidos por zeólitas, apofilita, carbonato e outros minerais secundários; substituições da mineralogia magmática nos gabros e diabásios).

Pouco se encontra na literatura sobre processos de fracionamento em sills. No entanto, recentemente esse tema tem ganhado a atenção de pesquisadores das universidades paulistas (Oliveira *et al.*, 2000; Alves *et al.*, 2002; Nardy *et al.*, 2003), sendo um trabalho pioneiro nessa região de Limeira o de Carvalho *et al.* (1988). Desta forma a presente Monografia visa contribuir junto à literatura com novos dados, em especial análises químicas de minerais e rochas, e apresentar uma discussão preliminar sobre a evolução e diferenciação dessa ocorrência.

## Localização

O sill alvo do presente estudo se localiza pouco a sul da cidade de Limeira. A exposição estudada é a cava da Pedreira Cavinatto, situada pouco a oeste da Rodovia Anhangüera, à altura do Km 140. O acesso rodoviário até a cidade de Limeira a partir da capital, São Paulo, se dá através da Rodovia dos Bandeirantes, SP-348 e/ou Anhangüera, SP-330. (Figura 1)



**Figura 1 – Localização da área e acessos à cidade de Limeira, SP. Mapa Rodoviário do Estado de São Paulo, modificado de Guia Quatro Rodas, 2002.**

## 2 OBJETIVOS

A presente Monografia investiga a evolução magmática nas exposições de diabásio da Pedreira Cavinatto fazendo uso principalmente das técnicas de microscopia eletrônica para caracterização química das fases minerais.

As feições estruturais e texturais presentes neste sill oferecem uma exposição privilegiada que permite a investigação das relações entre os produtos de processos magmáticos tardios (líquidos residuais graníticos que formam bolsões granofíricos nos gabros grossos; veios riolíticos; ocelos quartzo-feldspáticos) e entre estes e os processos hidrotermais (veios e amígdalas preenchidos por zeólitas, carbonatos e outros minerais secundários; substituições da mineralogia magmática nos gabros e diabásios).

As ferramentas de microanálise, disponíveis no laboratório de Microssonda Eletrônica do Instituto de Geociências da USP, são complementares às empregadas por outros pesquisadores nesta ocorrência (geoquímica de rochas e isotopia Sm-Nd), e têm elevado potencial para identificar as relações entre as diferentes litologias e a evolução dos líquidos magmáticos (e.g., Gomes & Berenholc, 1980; Monteiro, 1986). Em particular, possibilitam estudar os materiais na escala das pequenas estruturas ocelares que potencialmente refletem processos de diferenciação magmática ainda pouco compreendidos, como imiscibilidade líquida (e.g., Philpotts, 1990).

A atividade principal é a análise química das fases minerais em microssonda eletrônica. Os minerais principais (piroxênios e feldspatos) foram analisados em todos os tipos de rocha, incluindo os ocelos, para traçar a correlação entre elas e possíveis tendências evolutivas. Fases secundárias também foram analisadas (anfibólio, filossilicatos, zeólitas), inicialmente por EDS (Espectrometria de Dispersão de Energia) e, quando necessário, por WDS (Espectrometria de Dispersão de Ondas).

### 3 TRABALHOS PRÉVIOS

---

#### 3.1 GEOLOGIA REGIONAL

A Bacia do Paraná é uma extensa bacia intracratônica situada na parte centro-leste do continente sul-americano, desenvolvida completamente sobre crosta continental, e preenchida com em média 5.000 m de rochas sedimentares e vulcânicas, de idades variando entre o Siluriano e o Cretáceo.

Sua área total ultrapassa 1.500.000 Km<sup>2</sup>, estendendo-se pela parte meridional do Brasil, pela metade oriental do Paraguai, a região mesopotâmica da Argentina e a metade ocidental do Uruguai (Milani, 2004).

Ela possui um formato alongado na direção NNE-SSW, com largura média de 900 km, e seu nome deriva do Rio Paraná, que corre paralelo ao seu eixo maior, na direção NE-SW.

Os conjuntos de rochas que compreendem a Bacia do Paraná representam a superposição de pacotes depositados, no mínimo, em três diferentes ambientes tectônicos, decorrentes da dinâmica de placas da evolução do continente Gondwânico. Tal continente era composto de vários núcleos cratônicos, rodeado por vários cinturões móveis orogênicos e dispersamente cobertos por remanescentes de bacias de antepaís, todos formados durante o ciclo Brasiliiano.

#### A Província Magmática Paraná-Etendeka

A Província Magmática Paraná-Etendeka é uma das maiores ocorrências de basaltos continentais (CFB) do mundo, com cerca de 800.000 Km<sup>3</sup> de lavas formadas em um curto período de tempo (138-127 Ma; Stewart *et al.*, 1996), atingindo o ápice de seu magmatismo a 132 Ma, segundo Nardy *et al.* (2002). Sua origem é associada à abertura do Atlântico sul e à influência térmica de uma pluma mantélica que para alguns autores como Ewart *et al.* (1998) e Gibson *et al.* (1999) seria a pluma de Tristan da Cunha; por outro lado Comin-Chiaromonti *et al.* (1997) e Peate *et al.* (1999), sugerem que essa pluma pode ter apenas contribuído como fonte de calor, para a fusão de manto litosférico.

Estudos de datação  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  realizados em basaltos e riolitos da província sugerem que a taxa de erupção aumentou continuamente até que ocorreu a ruptura continental, alcançando valores da ordem de 0,21 Km<sup>3</sup> de lava por ano durante o seu ápice (Stewart *et al.*, 1996).

Os sucessivos derrames basálticos, denominados de Formação Serra Geral, se assentaram sobre os arenitos eólicos da Formação Botucatu (Marques & Ernesto, 2004) e foram posteriormente recobertos pelos arenitos cretáceos da Formação Bauru. A espessura dos derrames basálticos é muito variável, e alcança totais da ordem de 1000 m em algumas seções. As exposições presentes na borda erosiva atual da bacia na porção central do Estado de São Paulo são relativamente pouco espessas, em alguns trechos com menos de 100 m.

Os derrames são essencialmente de caráter toleítico, e predominantemente basálticos; estima-se que rochas ácidas e intermediárias, mais abundantes na porção meridional da Bacia do Paraná, não chegam a atingir 3% do volume total de rochas vulcânicas (Nardy *et al.* 2002).

Tradicionalmente, os basaltos da PMPE têm sido separados em dois grandes grupos: predominantes a sul ocorrem basaltos com baixas concentrações em TiO<sub>2</sub> (< 2%) e elementos incompatíveis, enquanto na porção norte os basaltos têm altas concentrações em TiO<sub>2</sub> (2 <= TiO<sub>2</sub> < 3% e TiO<sub>2</sub> > =3%) e elementos incompatíveis.

Vários grupos de pesquisa têm se dedicado ao estudo das rochas ácidas e intermediárias da PMPE ao longo das duas últimas décadas, e têm sido unânimes em distinguir dois tipos principais, designados Chapecó (ao norte, caracterizado como de "alto Ti") e Palmas (predominante na porção sul da bacia, com baixo conteúdo de Ti e elementos incompatíveis). As rochas vulcânicas tipo Chapecó mostram assinatura geoquímica e isotópica compatível com a dos basaltos associados, e são interpretadas como produtos da refusão, na base da crosta continental, de "underplates" desses mesmos basaltos, enquanto as do tipo Palmas mostram variação contínua na composição química e isotópica indicativa de processos de cristalização fracionada associados à contaminação pela crosta pré-existente (Bellieni *et al.*, 1986; Raposo, 1987; Comin – Chiaramant *et al.*, 1988; Garland *et al.*, 1995; Nardy *et al.*, 2002).

Uma subdivisão desses grupos baseada em geoquímica convencional e isotópica foi proposta por Peate *et al.* (1992), que subdividiram o tipo Palmas nos subgrupos Santa Maria e Caxias do Sul e o tipo Chapecó em Guarapuava, Ourinhos e Sarusas. Mais recentemente, Luchetti *et al.* (2005) apresentaram uma extensa revisão do magmatismo ácido por toda a PMPE, e propuseram modificações nesta subdivisão, distinguindo 4 magmas-tipo: para o tipo Palmas, denominados Caxias do Sul, Jacuí, Santa Maria e Anita Garibaldi e 3 magmas-tipo Chapecó denominados Ourinhos, Tamarana e Guarapuava.

Recentemente, um terceiro tipo de rochas vulcânicas ácidas foi reconhecido no Uruguai, caracterizado por temperaturas de cristalização mais baixas e assinatura isotópica de Nd compatível com a fusão de crosta máfica pré-existente (Kirstein *et al.*, 2000).

## **Os corpos intrusivos associados**

Expressivos volumes de magma basáltico contemporâneo ao vulcanismo da Bacia do Paraná cristalizaram em corpos subvulcânicos que se alojaram como sills ao longo de toda a seção da Bacia, especialmente em descontinuidades, como contatos entre diferentes formações paleozóicas e no contato das rochas sedimentares com o embasamento cristalino. Outra forma de ocorrência comum são os diques, que recortam principalmente o embasamento cristalino, localmente formando verdadeiros enxames.

O estudo de processos de diferenciação magmática “in situ” pode ser feito nos abundantes corpos intrusivos associados ao vulcanismo Serra Geral. O trabalho pioneiro de Gomes & Berenholc (1980) reconheceu uma significativa zonalidade textural e mineralógica no dique de Toninhas (litoral norte do Estado de São Paulo), interpretada como produzida pela combinação de dois processos: múltiplas intrusões e transferência gasosa. Zonalidade semelhante foi estudada em um sill da região de Tanquinho (SP) por Monteiro (1986), que pôde modelar o processo de fracionamento magmático utilizando estudos petrográficos e de química mineral.

Os diabásios que formam os sills presentes no Estado de São Paulo são quimicamente semelhantes, e têm idades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  idênticas às dos basaltos vizinhos (132-130 Ma; Ernesto *et al.* 1999). Aparentemente, existe uma leve diminuição das idades para o norte, também marcada pela mudança da polaridade magnética, de normal para reversa, a norte de Santa Rita do Passa Quatro (Ernesto *et al.* 1999).

A espessura dos sills varia de alguns metros até 200 m, podendo ocorrer variação expressiva em um mesmo corpo. Em pedreiras que exploram a rocha para brita, encontram-se exposições contínuas que revelam variações texturais e compostionais importantes.

Oliveira *et al.* (2000) identificaram feições de bandamento na porção superior de um sill que ocorre na região de Campinas, na base da pilha sedimentar. O bandamento é marcado pela injeção, no diabásio fino predominante, de corpos tabulares de gábrico granofílico, interpretado como produto de um líquido residual mais fracionado. Sills posicionados em níveis mais rasos da pilha sedimentar mostram feições estruturais diferentes. Wernick & Landim (1966) identificaram estruturas vesicular e amigdaloidal no topo de um sill na região de Rio Claro (SP), e sills posicionados em porções ainda mais rasas (e.g., na base da Fm. Botucatu, já próximo à superfície na época do vulcanismo) podem ser difíceis de distinguir das lavas associadas.

### 3.2 GEOLOGIA LOCAL

Recentemente, a investigação de processos de fracionamento em sills de diabásio localizados na borda leste da Bacia do Paraná tem ganhado a atenção de pesquisadores das universidades paulistas (Oliveira *et al.*, 2000; Alves *et al.*, 2002; Nardy *et al.*, 2003).

Um desses sills, explorado para obtenção de brita em pedreiras pouco a sul da cidade de Limeira (SP), tem sido visitado em excursões didáticas de cursos de geologia das três universidades paulistas por mostrar uma expressiva variedade de estruturas, texturas e composições.

Observando-se mapas geológicos locais, a ocorrência exposta na pedreira Cavinatto e também explorada em outra pedreira vizinha, não se encontra exposta em área muito expressiva (pouco mais de 2,5 Km<sup>2</sup>). No entanto Carvalho *et al.* 1988, denominaram na região o que foi designado **sill Limeira–Cosmópolis**, que compreenderia diversos corpos de diabásio, em forma de sills e de lacólitos que em superfície não exibem continuidade lateral. Esse sill atingiria 60 km de extensão linear e espessuras da ordem de 280 metros, e se encontraria intrudido nos sedimentos do Subgrupo Itararé em diversos níveis estratigráficos. Evidências de que ocorre continuidade desses corpos foram identificadas em perfurações feitas para água subterrânea, na região de Cosmópolis e Paulínia (Soares, 1985 *apud* Carvalho *et al.*, 1988).

## 4 MATERIAIS, MÉTODOS E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

---

As atividades desenvolvidas para a preparação da Monografia incluíram pesquisas bibliográficas contínuas, análises de laboratórios e contínuos trabalhos de interpretação e organização de dados, conforme detalhados a seguir.

### 4.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Os principais tópicos desenvolvidos durante a pesquisa bibliográfica se referem à coleta de informações sobre a geologia regional e local da área estudada, bem como à familiarização com trabalhos anteriores em áreas semelhantes, que contribuem principalmente para a interpretação de dados e elaboração de conclusões.

### 4.2 ANALISES PETROGRÁFICAS

A amostragem inicial, utilizada para descrição macroscópica e microscópica, foi realizada em excursões de Petrologia Ígnea e faz parte da coleção didática da disciplina. Foram coletadas em diferentes seções representativas da variedade composicional e textural observada. Incluem diabásio e gábrico de granulação variada, basalto fino do topo do sill, veios de riolito, além de amostras portadoras de ocelos e amígdalas e materiais de preenchimento de fraturas.

Os estudos petrográficos foram efetuados com o microscópio petrográfico *Olympus*<sup>TM</sup> modelo BXP-40, sob luz transmitida e *Zeiss*<sup>TM</sup> modelo Axioplan-pol, sob luz transmitida e refletida do Laboratório de Óptica do GMG-IGc/USP, em seções delgadas convencionais e delgadas-polidas, respectivamente. Foi dada ênfase ao reconhecimento e caracterização das principais fases minerais e acessórias, bem como das diferentes texturas que caracterizam os diferentes litotipos.

Nesta etapa também foram selecionados cristais mais representativos de cada geração textural das fases minerais principais para análises em microssonda eletrônica.

Foi efetuada uma documentação fotográfica macroscópica e microscópica das fases minerais principais e acessórias, texturas principais das amostras mais representativas. Para tanto se fez uso das câmeras fotográficas digitais *Olympus*<sup>TM</sup>, modelo C2500L, de 2,5 megapixels de resolução para fotos macroscópicas e *Olympus*<sup>TM</sup>, modelo C5050Z, com resolução de 5,0 megapixels acoplada ao microscópio *Olympus*<sup>TM</sup>, modelo BXP-50, do Laboratório de Óptica do GMG-IGc/USP, para as fotos microscópicas.

#### 4.3 ANALISES QUÍMICAS DE MINERAIS

Análises químicas pontuais quantitativas por espectrometria de dispersão de onda (WDS) das principais fases minerais (piroxênio, plagioclásio e feldspato alcalino) foram realizadas no Laboratório de Microssonda Eletrônica do GMG-IGc/USP. O equipamento utilizado é um *Jeol*<sup>TM</sup> modelo Superprobe JXA-8600S, equipado de detector ED e cinco espectrômetros WD, cada qual com dois cristais analisadores (STE/TAP, TAP/PET, PET/LiF, PET/LiF, PET/LiF), e sistema de automação *Voyager* 3.6.1 da *Noran Instruments*<sup>TM</sup>. As análises foram efetuadas em seções delgado-polidas cobertas com uma fina película de C (ca. 25 nm) com evaporador da *Edwards*<sup>TM</sup>, modelo Auto 306. As condições analíticas empregadas foram de 15 KeV, 20 nA e 1 µm, respectivamente para a voltagem de aceleração, corrente e diâmetro do feixe, apenas abriu-se o feixe para 20 µm, ao analisar os granófiros das amostras de gabros e dioritos.

Foram selecionadas 10 seções delgadas-polidas entre as mais representativas, sendo IGN75I – basalto; IGN4.2.Z(1)/(2) e IGN75F4 – diabásio; IGN75I - gabro, IGN 4.2.M(1)/(2), APOF. - Diorito e gabro, respectivamente, com veio riolítico; IGN4.2.H - Diorito e IGN75G1 - riolito.

As análises pontuais foram realizadas nas zonas de núcleo, intermediárias e bordas dos cristais, utilizando-se como referência os zoneamentos ópticos. Os resultados das análises dos piroxênios e plagioclásios estão representados respectivamente na Tabela IV e V (Capítulo 7 – Química Mineral), junto com as fórmulas estruturais, que foram calculadas com a utilização do software *Minpet* 2.02, também utilizado na obtenção dos diagramas ternários.

#### 4.4 ANALISES QUÍMICAS DE ROCHA TOTAL

Foram selecionadas ao todo 12 amostras entre as mais representativas, com texturas e estruturas particulares, sendo 2 rochas basálticas “puras”, 5 diabásios, 4 gabros/dioritos e 1 amostra de veio riolítico. Cuidados foram tomados para que as amostras tivessem dimensões adequadas para representar a composição da rocha; desta forma, no caso dos gabros, de granulação muito grossa, as amostras iniciais pesavam entre 5 e 10 kg.

A preparação de amostras para a química total da rocha por Fluorescência de Raios-X (FRX) e ICP-MS (Espectrometria de Massas com Plasma Acoplado Indutivamente) foi realizada no LTA (Laboratório de Tratamento de Amostras, do GMG-IGc/USP). As amostras passaram por tratamento de redução da granulação, nas seguintes etapas, para a obtenção do pó de rocha, com o qual se fez as pastilhas finais para análise:

1. para obter a fragmentação da rocha, até atingir a fração de grânulos com aproximadamente 0,3 mm, foi necessária a utilização de prensa hidráulica, para as amostras de basaltos, diabásios e riolitos; e britador com mandíbulas de ferro para amostras de gabros;
2. quarteamento do material granulado;
3. moagem de aproximadamente 50 g de material granulado, em moinho de anéis de ágata, para atingir granulação de aproximadamente 200 mesh;
4. para a confecção de **pastilhas prensadas**, utilizadas para determinação de elementos traços em FRX foi feita a micronização de 8 g de cada amostra, resultando em granulação inferior a 200 mesh, e secagem em estufa; desse material, 7,5 g foram homogeneizadas manualmente com 20% de ligante em pó (parafina) e em seguida prensadas em prensa hidráulica;
5. a **pastilha fundida** foi obtida no Laboratório de Química GMG-IGc/USP, através da fusão de 1 g de amostra, granulação final, com 9 g de tetraborato de lítio (75%) e metaborato de lítio (25%), a aproximadamente 1000°C por 25 minutos. Após seu resfriamento essa pastilha é utilizada pra detecção dos elementos maiores.

As pastilhas foram então analisadas por Fluorescência de Raios X, utilizando um espectrômetro marca Philips modelo PW2400 no Laboratório de Raios-X do GMG-IGc/USP.

Os dados obtidos foram trabalhados em planilhas *Excel* e os diagramas de variação foram gerados através do software *Petroplot*. As normas foram obtidas através de planilha *Excel* baseada e modificada por John D. Winter, para 85 % FeO.

Das 12 amostras representativas analisadas na Fluorescência de Raios-X, 5 delas (basalto, diabásio, gábro, diorito e riolito) foram selecionadas e enviadas para análises por ICP-MS (Espectrometria de Massas com Plasma Acoplado Indutivamente) no Laboratório de Química e ICP-MS do GMG-IGc/USP. Os dados obtidos também foram trabalhados em planilhas *Excel* e os diagramas de variação foram gerados através do software *Petroplot*. Os

dados tanto de Fluorescência quanto de ICP-MS estão apresentados na Tabela VII e VIII no Capítulo 8 – Química de Rochas.

#### **4.5 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE ANALÍTICA**

Nesse item estão discutidos e apresentados os padrões de controle de qualidade das análises químicas de rochas, por FRX (Fluorescência de Raios-X) e ICP-MS (Espectrometria de Massas com Plasma Acoplado) usadas na monografia.

##### **Análises por FRX**

A Tabela I apresenta os resultados analíticos obtidos por FRX para os padrões de referência geoquímica internacionais JB-1a e JG-1a (de composição próxima à de basaltos e granitos, respectivamente), bem como o Limite de Detecção (LD) de cada óxido e elemento traço.

Na comparação entre os resultados obtidos e os recomendados para esses padrões, foram considerados adequados os casos em que o valor recomendado ficou dentro de um limite de 5% nos óxidos e 10% nos elementos traços. Foram observadas as seguintes situações:

- o único óxido com valor obtido fora do limite é o  $P_2O_5$  no padrão JG-1a, o que pode ser atribuído ao baixo teor desse óxido, próximo ao Limite de Detecção;
- alguns elementos traços, em particular Pb, Th, U, Co, Cu, Nb, La, Sc, Ni, possuem erro maior que o recomendado no padrão JG-1a. Também neste caso, observa-se que os teores desses elementos são bastante próximos ou inferiores aos Limites de Detecção do método;
- o F e o Nd para o padrão JB-1a, possuem erros maiores que os aceitáveis, assim como o Pb, Th e U, o que parece mais uma vez ser devido à proximidade dos resultados aos teores do Limite de Detecção.

Desta forma podemos concluir que os casos em que a exatidão dos resultados obtidos através de FRX mostra-se fora do padrão desejado, isto se deve ao fato de que os teores são próximos aos do Limite de Detecção, e isto ocorre principalmente para alguns elementos traços. Assim optou-se no caso desses elementos, sempre que possível, por utilizar valores resultantes das análises por ICP-MS, para as quais os Limites de Detecção são bem menores e, portanto os valores obtidos são mais confiáveis.

Os padrões de precisão são obtidos através da comparação das duplicadas, que são feitas para o controle a cada 5 amostras. Para o FRX temos duas duplicatas, das amostras IGN4.2.L (Basalto amigdaloidal) e IGN75I (Gabro). Através da comparação dos dados vemos uma boa precisão atestada, por exemplo, por variações relativas máximas da ordem de 1% para os óxidos principais, como  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$ . Nos elementos traços como o F no basalto amigdaloidal e o Ce e Nd no gabro, a precisão é menor que o desejado, o que se associa aos valores baixos, próximos dos Limites de Detecção.

		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LoI	Total
<b>JB 1a</b>	Oblito	51,99	1,297	14,26	9,00	0,149	7,69	9,32	2,69	1,40	0,259	1,1	99,16
	Recomendado	52,16	1,3	14,51	9,1	0,15	7,75	9,23	2,74	1,42	0,26	1,1	99,72
<b>JG 1a</b>	Oblito	72,06	0,239	14,05	1,96	0,061	0,65	2,13	3,38	3,98	0,087	0,59	99,19
	Recomendado	72,19	0,25	14,22	2,05	0,06	0,69	2,13	3,41	4,01	0,08	0,59	99,68
<b>LD</b>		0,01	0,01	0,002	0,01	0,01	0,02	0,01	0,007	0,003	0,01	0,01	

		Ba (f)	Ce (f)	Cl (f)	Co (f)	Cr (f)	Cu (f)	F (f)	Ga (f)	La (f)	Nb	Nd (f)
<b>JB 1a</b>	Oblito	518	60	184	36	407	57	484	19	43	28	36
	Recomendado	497	66,1	170	39,5	415	55,5	385	18	38,1	27	25,5
<b>JG 1a</b>	Oblito	467	40	355	4	35	3	656	19	10	9	< 22
	Recomendado	458	45,2		5,7	18,6	1,3	450	17	21,8	12	21
<b>LD</b>		17	18	15	3	2	2	223	2	14	1	22

		Ni (f)	Pb (f)	Rb (f)	S (f)	Sc (f)	Sr (f)	Th	U	V (f)	Y (f)	Zn (f)	Zr (f)
<b>JB 1a</b>	Oblito	143	5	39	< 100	30	461	10	6	199	24	83	139
	Recomendado	140	7,2	41	9	27,9	443	8,8	1,6	220	24	82	146
<b>JG 1a</b>	Oblito	9	27	178	< 100	4	182	7	8	24	32	39	125
	Recomendado	6,4	27	180	10	6,31	185	12,1	4,7	23	31,6	38,8	121
<b>LD</b>		2	5	2	100	4	1	3	3	3	1	1	3

Duplicatas:

Amostra	Nome da Rocha	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LoI	Total
IGN 4.2.L (a)	Basalto amigdaloïdal	48,59	3,870	12,16	15,60	0,225	4,28	7,14	3,90	1,37	0,555	1,52	99,21
IGN 4.2.L (b)	Basalto amigdaloïdal	48,65	3,907	12,08	15,62	0,226	4,35	7,15	3,93	1,37	0,577	1,52	99,38
IGN 75I (b)	Gabro	54,22	2,495	12,12	14,76	0,242	2,23	6,08	3,05	2,35	1,012	0,70	99,26
IGN 75I (a)	Gabro	54,64	2,505	12,13	14,82	0,244	2,28	6,08	3,11	2,35	1,011	0,84	100,01
Amostra	Nome da Rocha	Ba (f)	Ce (f)	Cl (f)	Co (f)	Cr (f)	Cu (f)	F (f)	Ga (f)	La (f)	Nb	Nd (f)	
IGN 4.2.L (a)	Basalto amigdaloïdal	50,1	60	<15	35	14	49	367	22	30	26	59	
IGN 4.2.L (b)	Basalto amigdaloïdal	51,8	56	<15	35	13	51	618	22	44	26	64	
IGN 75I (b)	Gabro	74,2	116	<15	19	6	22	1076	25	64	36	56	
IGN 75I (a)	Gabro	72,8	96	<15	18	4	21	1077	26	55	37	82	

**Tabela I - Resultados de análises químicas dos padrões de referência geoquímica internacional: JB 1a e JG 1a para basaltos e granitos, utilizados para o método de FRX.**

Valores do Limite de Detecção (LD) dos óxidos e elementos traços.

Análises de duplicadas, realizadas a cada 5 amostras, para a referência de precisão.

## Análises por ICP-MS

A Tabela II mostra os padrões de controle utilizados para a análise por ICP-MS, sendo BHVO-2 (basalto), W2 (diabásio) materiais de referência desenvolvidos pelo USGS (EUA) e BR (basalto), material de referência do CRPG (França). Estão indicados também valores de branco (bco) e os desvios padrões das análises (sd).

Para o padrão BR a incerteza indicada para resultado recomendado corresponde a um limite de confiança de 95%, ou seja de  $2\sigma$ . Desta forma, para padronizar a análise de qualidade foram considerados os desvios padrões dos padrões BHVO-2 e W2, multiplicados por dois, desta forma correspondendo também ao valor de  $2\sigma$ .

As exatidões das análises dos elementos traços estão dentro do limite de aceitação de  $2\sigma$  (95%), o que confirma o motivo pelo qual se optou por usar os resultados obtidos no ICP-MS ao invés dos obtidos pela FRX, para os elementos traço presentes em baixos teores.

A precisão é baseada nas duplicatas analisadas, e no caso do ICP-MS a única duplicata obtida é referente à amostra IGN75G1, o riolito. As diferenças estão todas dentro do limite aceitável de 10%. A Figura 2 compara em um diagrama multielemental normalizado pelo condrito o resultado das análises da duplicata (amostra IGN75G1). Observa-se que ambas as amostras apresentam resultados bastante semelhantes, embora possa ser observado que a amostra "b" possui valores pouco mais altos que os da amostra "a", onde se destacam principalmente os elementos Th, Ba, Nb, Ta e terras raras médios.

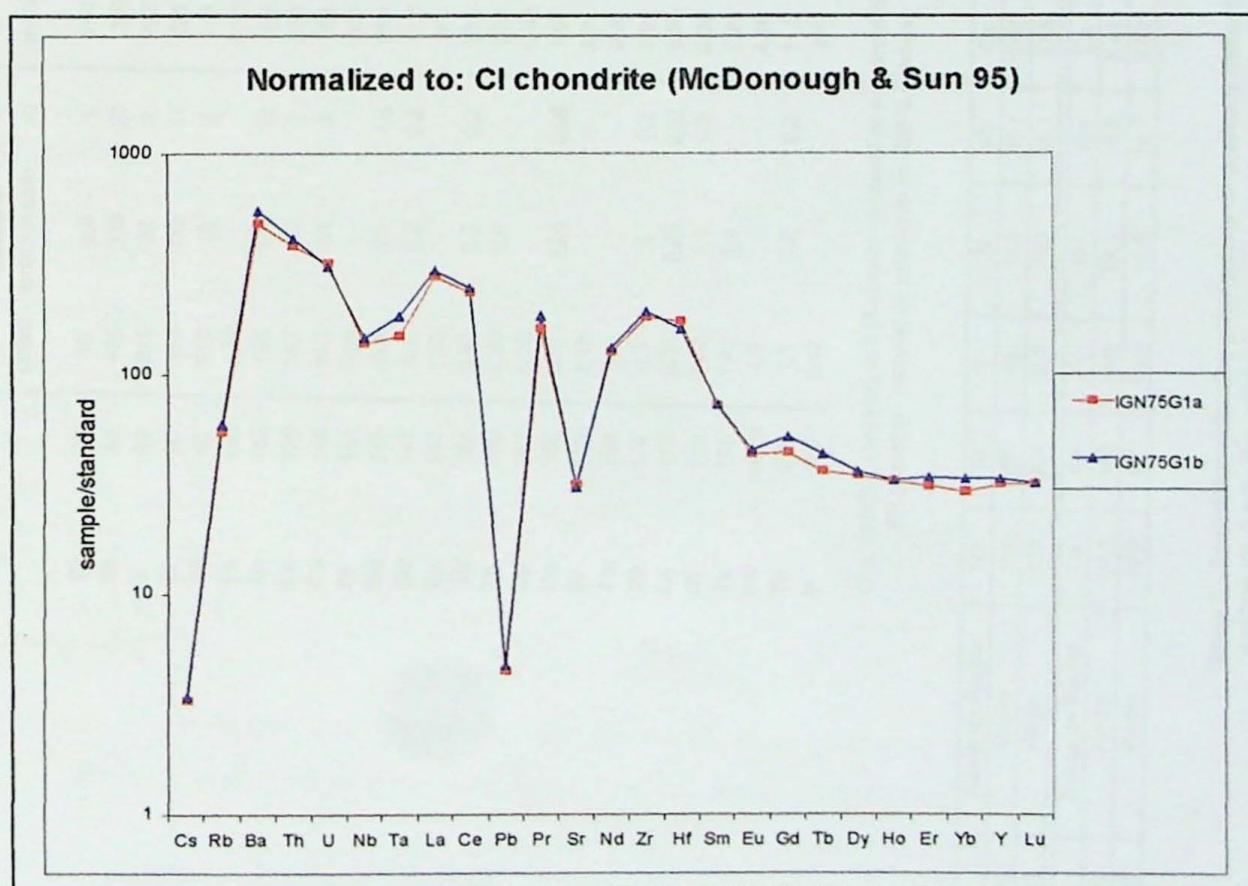


Figura 2 – Comparação das análises de elementos traços por ICP-MS das duplicatas da amostra IGN75G1 (riolito).

	BHVO-2		BR		W2		bco
	obtido	recomendado	obtido	recomendado	obtido	recomendado	sd
Rb	85	10	9,8	1	51,7	47	3
Sr	88	40,2	38,9	23	1337	1320	51
Y	89	26,2	26	2	29,5	30	1,5
Zr	90	159	172	11	256	260	16
Nb	93	17,3	<u>18</u>	<u>2</u>	111	98	6
Cs	133	0,112			0,83	0,8	0,15
Ba	135	136	130	13	982	1050	44
La	139	14,2	15	1	82,5	82	1,5
Ca	140	34,1	38	2	160	151	4
Pr	141	5,08			18,3	17	0,6
Nd	143	25,8	25	1,8	70,6	65	2
Sm	147	6,1	<u>6,2</u>	<u>0,4</u>	11,6	12,2	0,3
Eu	151	1,83			3,54	3,7	0,2
Gd	157	5,56	<u>6,3</u>	<u>0,2</u>	10,2	9,5	0,6
Tb	159	0,89	0,9		1,34	1,25	0,1
Dy	161	5,26			6,39	6,4	0,2
Ho	165	0,97	<u>1,04</u>	<u>0,04</u>	1,04	1,1	0,13
Er	166	2,15			2,61	2,5	0,1
Tm	169	0,3			0,33	0,3	0,04
Yb	173	2,1	<u>2</u>	<u>0,2</u>	2,02	1,8	0,2
Lu	175	0,31	<u>0,28</u>	<u>0,01</u>	0,26	0,25	0,03
Hf	179	4,02	<u>4,1</u>	<u>0,3</u>	5,39	5,6	0,2
Ta	181	1,43	<u>1,4</u>		7,21	6,2	0,7
Pb	média	1,5			4,36	5	2,5
Th	232	1,1	<u>1,2</u>	<u>0,3</u>	11,3	11	1
U	238	0,42			2,6	2,5	0,3

Obs: BHVO-2 (basalto), W2 (diabásio) - material de referência do USGS (EUA)  
 BR (basalto) - material de referência do CRPG (França)

*Duplicatas:*

Amostra	Nome da Rocha	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	Pb	Th	U
IGN 75G1(a)	Riolito	104	209	49	735	32,7	0,63	1189	11,1	11,1	2,34
IGN 75G1(b)	Riolito	137	221	52,3	730	35,1	0,66	1321	11,7	12	2,29
Amostra	Nome da Rocha	La	Ca	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
IGN 75G1(a)	Riolito	66,1	143	14,8	57,1	10,6	2,43	8,62	1,29	8,45	1,76
IGN 75G1(b)	Riolito	69,6	151	16,9	59,9	10,7	2,52	10,2	1,55	8,76	1,78

Tabela II - Parâmetros utilizados para controlo de qualidade das análises do ICP-MS, incluindo limites de detecção e análises de branco.  
 Análises do duplicadas, realizadas a cada 5 amostras, para a referência do procissão. Valores em  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ .

± CLs: limite de confiança de 95%

sd: desvio padrão

sublinhado: valores informativos

O exame dos resultados obtidos para o branco sugerem valores altos para os elementos Ba e Zr. Tal fato, no entanto, reflete apenas o ajuste da curva de calibração do ICPMS, que foi otimizada para teores altos, em vista dos teores observados nas rochas estudadas.

Tendo em vista os altos teores de Ba e Zr e a conveniência de obter resultados pelo mesmo método em todas as amostras, foram utilizados neste trabalho os resultados obtidos para esses elementos por FRX. No entanto, deve ser ressaltado que é necessária a realização das análises deles em ICP-MS, pois no caso do Ba ele corrige a interferência de Eu e o Zr corrige a interferência também de Elementos Terras Raras, além de ser responsável pela checagem da correta dissolução da amostra. Nesse caso comparando os valores de Zr do ICP-MS com os da FRX vemos que ambos são semelhantes e os do ICP-MS mais altos, indicando que houve completa dissolução da amostra.

Concluímos então que existem elementos cujas análises mais confiáveis pertencem a FRX e outros ao ICP-MS. Por esse motivo a Tabela VII e VIII (Capítulo 8. – Química de Rochas) de apresentação dos dados, indica para quais elementos se utilizou FRX e quais ICP-MS. Como foi dito anteriormente essa escolha se deve às qualidades analíticas de cada método. Sendo a FRX melhor no que diz respeito a teores mais elevados, onde a curva de calibração do ICP-MS indica valores de branco altos e o ICP-MS melhor onde os Limites de Detecção da FRX são muito próximos aos teores obtidos. Assim todos os valores usados nesse trabalho são confiáveis e que respeitam parâmetros analíticos.

#### 4.6 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

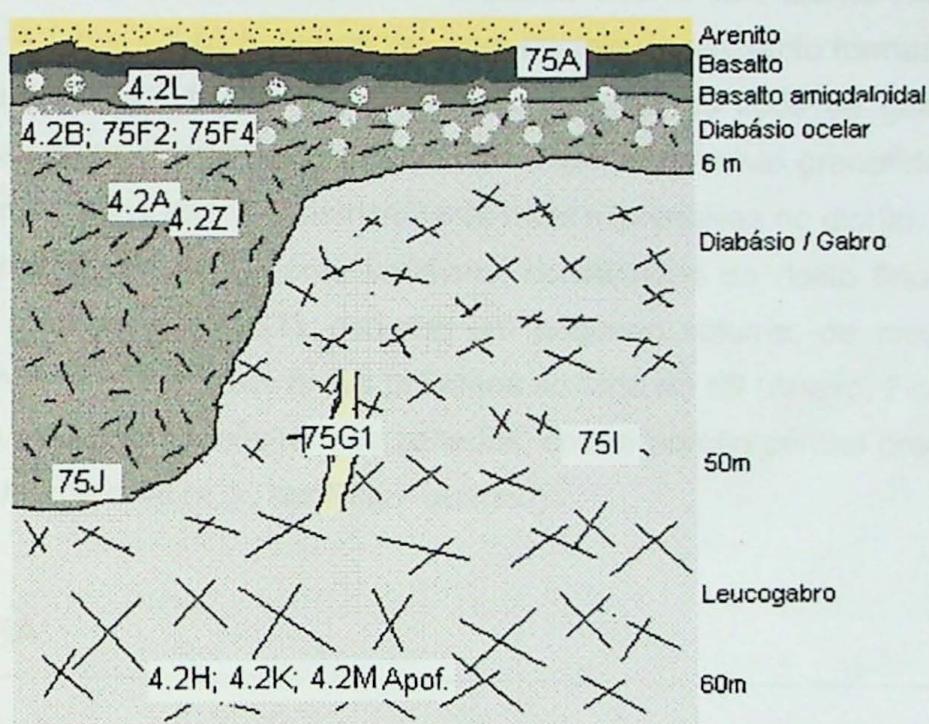
Ativ.\Mês	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.
<b>Estudos Bibliográficos</b>									
<b>Petrografia</b>									
<b>Trabalho de Campo</b>									
<b>Química Da Rocha</b>									
<b>Química Mineral</b>									
<b>Elaboração Monografia</b>									

**Tabela III – Cronograma de atividades desenvolvidas ao longo do ano, na elaboração desta Monografia. Destaca-se a etapa de Trabalho de Campo, que não foi realizada.**

O cronograma inicial sofreu pequenas alterações. Acrescentaram-se etapas de análises Químicas de Rocha Total por ICP-MS, e etapas complementares de Química de Rochas, por Microssonda Eletrônica.

A etapa de Trabalho de Campo, necessária para elaboração de um perfil não esquemático, como o apresentado, da Pedreira Cavinatto, foi prejudicado por um pequeno atraso que ocorreu nas etapas das análises químicas (de rocha e mineral), devido à paralisação de funcionários do Instituto de Geociências, assim paralisando os trabalhos de laboratório. Desta forma, para melhor caracterizar quimicamente o sill, optou-se por não realizar essa etapa, já que não é de extrema necessidade, visto que a Monografia conta com diversas amostras e seções delgadas-polidas, pertencentes à coleção didática da disciplina de Petrologia Ígnea, bem como a descrição da Pedreira Cavinatto consta em caderneta da aluna, quando essa visitou o local em excursão da disciplina.

## 5 EXPOSIÇÃO DA PEDREIRA CAVINATTO



**Figura 3 – Perfil esquemático da Pedreira Cavinatto e localização das amostras IGN.**

A Figura 3 é um perfil esquemático da cava da Pedreira Cavinatto, onde estão representados os principais litotipos e localizados os locais de coleta das principais amostras analisadas.

A porção deste sill alvo do presente estudo se expõe em uma “janela” em meio a rochas sedimentares do Subgrupo Itararé pouco a sul de Limeira (SP), e é explorado em duas pedreiras ativas, para a obtenção de brita. A cava atual da pedreira Cavinatto (Anexo, Figura 4A), onde se encontram as feições de interesse, tem cerca de 70 m de profundidade; expõe uma seção contínua desde o teto da intrusão, intrusivo através de contato subhorizontal bastante irregular em arenitos, até, provavelmente, uma região próxima ao seu núcleo.

No contato superior do sill ocorre uma rocha afanítica, de cor cinza escuro, um basalto, correspondente a margem resfriada do sill, de espessura inferior a 1 m (amostra 75A); pouco abaixo do contato, o basalto passa a apresentar amígdalas (amostra 4.2L). Logo abaixo, a granulação da rocha é de um típico diabásio (~1 mm), ainda amigdaloidal, e também rico, em algumas porções, em ocelos claros subcentimétricos que se distinguem das amígdalas, por sua composição quartzo-feldspática (amostras IGN4.2B, 75F2, 75F4; (Anexo, Figura 4B e C)). Essas estruturas desaparecem logo nos primeiros metros de profundidade do sill, onde o diabásio passa a ocorrer sem ocelos (amostras IGN4.2A e 4.2Z), mais ao fundo termos de granulação mais grossa, gabros (Anexo, Figura 4D), passam a ocorrer (amostra IGN75I e APOF.), em contatos difusos com o diabásio. As amostras IGN75I e 75J, foram coletadas no mesmo nível mostrando bem a variação lateral entre as rochas.

Na porção mais profunda atualmente exposta, ocorre um diorito muito grosso, amostras IGN4.2.H, 4.2.K e 4.2.M, heterogêneo, com cristais de piroxênio formando padrões que semelhantes a “grades” (Anexo, Figura 4E). Em ambos os tipos de gábro ocorrem manchas de cor branca ou cinza-clara, formadas por intercrescimento granofílico (quartzo-feldspato alcalino), mas estas são volumetricamente mais expressivas no diorito.

Veios subverticais, de espessuras variáveis, constituídos de riolito fino com baixo índice de cor (~7; amostra IGN75G1), ocorrem em pequeno volume, de modo esparso, desde as porções mais profundas até níveis próximos ao topo do sill (Anexo, Figura 4F, G e H). Com freqüência esses veios mostram-se zonados, com a porção central preenchida por minerais de origem hidrotermal (e.g., apofilita + quartzo).

## 6 PETROGRAFIA

---

De um modo geral o exame microscópico mostra que todas as rochas do sill foram intensamente afetadas por processos hidrotermais, que provocaram importantes modificações texturais e mineralógicas. Os piroxênios, em particular, foram em muitos casos substituídos por minerais opacos e filossilicatos de cores variadas, e cristais secundários de pirita e zeólitas são abundantes em muitas amostras, inclusive nos riolitos.

A distinção entre os ocelos e as amígdalas presentes no diabásio do topo da intrusão é por vezes difícil no exame microscópico. Em alguns casos, é evidente que o material hidrotermal que preenche as amígdalas (zeólitas, quartzo, carbonato) pode formar bolsões no interior dos ocelos quartzo-feldspáticos, sugerindo tratar-se de uma evolução do mesmo processo.

Nesse capítulo estão descritas as características macroscópicas e microscópicas das rochas. As amostras analisadas estão divididas em 4 grupos principais de rochas: basalto,

diabásio, gабro e riolito. E esses subdivididos em subgrupos com relações texturais e estruturais diversas, para melhor entendimento das feições de interesse.

Seguindo a essa descrição, para melhor complementar a petrografia, está as análises químicas mineral, que foi realizada em 10 seções delgadas-polidas e os dados foram obtidos através de Microssonda Eletrônica. Os minerais analisados nessa fase foram os que fazem parte da composição principal das rochas, o piroxênio e o feldspato. Foram analisados diversos grãos minerais em cada lâmina, e sempre que necessário, quando opticamente o mineral apresentava zoneamento foram feitas análises em seu núcleo, zona intermediária e em sua borda.

## 6.1 BASALTOS

Os basaltos estão presentes na borda do sill, em contato com os arenitos do Subgrupo Itararé, apresentam cor cinza escura e estrutura maciça, com textura fanerítica equigranular muito fina, quase afanítica.

Em análise microscópica a rocha apresenta textura intergranular, por vezes sub-ofítica. O basalto do topo, no contato com os arenitos, não apresenta amígdalas/vesículas. Na amostra coletada pouco abaixo do contato, o basalto apresenta amígdalas/vesículas preenchidas ou não por zeólitas, quartzo, carbonato e clorofaeita, podendo essa também estar presente nas bordas.

Em uma porção da lâmina (IGN75A) há uma ocorrência de forma ocelar (circular), que apresenta a mesma composição da rocha, no entanto com granulação bem mais fina.

Os cristais de plagioclásio, melhor descritos no item 7.2., apresentam-se microscopicamente bastante fraturados, alguns zonados e sem geminações. Suas formas são sub- a euédricas, de hábito tabular e alguns mostram sinais de deformação, como curvamentos. O piroxênio é uma augita, item 7.1., que apresenta cristais de formas prismáticas, sub- a euédricos, além de também apresentar curvamentos.

Muitos cristais de plagioclásio e piroxênio aparecem parcialmente substituídos por clorofaeita, principalmente os de piroxênio são substituídos por minerais opacos, esses últimos que representam grandes proporções nas lâminas podendo ocorrer em até 20% da rocha, sendo essencialmente cristais de pirita e titano-magnetita, identificada principalmente por apresentar lamelas de exsolução de illmenita. Ocorre como mineral acessório, em aproximadamente 1% da rocha, a apatita. Ocorre de forma disseminada e hábito acicular, normalmente inclusas nos demais minerais.

## 6.2 DIABÁSIO

Essa rocha se localiza logo abaixo dos basaltos, e em sua porção superior é bastante rica em ocelos e amígdalas, feições essas que só aparecem nessa região.

A rocha em geral apresenta cor acinzentada com porções brancas arredondadas (quando possui ocelos), e a textura varia de fanerítica fina à média. Os cristais de piroxênio,

plagioclásio e minerais opacos se apresentam com formas prismáticas longas e euédricas. Microscopicamente a textura principal é intergranular, por vezes sub-ofítica.

Essa rocha apresenta muitos ocelos preenchidos por quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino, clorofaeita e minerais opacos, em geral titano-magnetita com ou sem lamelas de exsolução de illmenita, esses minerais podendo caracterizar também as bordas dos ocelos. É evidente a ausência de piroxênio nos ocelos (Anexo, Figura 5A e B). Alguns são discretos, não possuindo bordas, sendo reconhecidos principalmente pela forma quase arredondada e ausência de minerais maficos (Anexo, Figura 5C e D).

Também estão presentes amígdalas preenchidas por minerais hidrotermais como zeólitas, carbonato e quartzo (Anexo, Figura 5E e F). Muitas dessas amígdalas possuem borda de composição quartzo-feldspática, como a observada em ocelos, e essa borda ainda é delimitada por um anel de minerais opacos (Anexo, Figura 5G e H). Essa feição parece indicar que o preenchimento hidrotermal ocorreu dentro de um ocelo, sendo gerado na evolução do mesmo processo.

O plagioclásio (item 7.2.) apresenta cristais em geral zonados e alguns sem geminações evidentes, apresentam bordas de aparência turva. São sub- a euédricos, de hábito tabular. O piroxênio (item 7.1.) pode se apresentar de forma sub- a euédricas, com hábitos prismáticos alongados, e em muitos casos podem estar curvados (Anexo, Figura 5I e J).

Os cristais de plagioclásio e piroxênio sofrem substituição por clorofaeita, o piroxênio altera bastante para minerais opacos (titano-magnetita) que podem atingir até 15% da composição total da rocha, e em alguns casos aparece ferro-hornblenda (análises inéditas da autora) de cor marrom-alaranjada, xenomórfico, em suas bordas. Essa ferro-hornblenda ocorre também associada a clorofaeita, disseminada na rocha.

Pequenas porções de intercrescimento granofílico entre quartzo e feldspato alcalino são observadas, podendo atingir cerca de 5% da composição total da rocha, sendo aproximadamente 3% de quartzo e 2% de feldspato alcalino. Ocorre como mineral acessório na rocha, podendo atingir aproximadamente 3% da composição total, a apatita. Ela se apresenta disseminada e com hábito acicular, alguns cristais podem atingir até 0,7 mm de comprimento nos demais minerais.

### 6.3 GABROS

A rocha apresenta cor cinza escura, estrutura maciça e textura fanerítica média a grossa; microscopicamente a textura principal é intergranular, por vezes sub-ofítica.

Os cristais de plagioclásio (item 7.2.) possuem bordas de aparência turva e formas sub- a euédricas, de hábito tabular. Muitos se apresentam com bordas e zonados (Anexo, Figura 5K e L) e alguns com geminações aparentes.

Nos cristais de piroxênio (item 7.1.) é possível distinguir duas fases: uma no centro, onde o mineral apresenta um relevo mais elevado e está bastante fraturado, e nas bordas, com relevo mais baixo, o contato entre um piroxênio e outro é serrilhado. São cristais de forma alongada e sendo alterados, muitas vezes quase que totalmente por minerais opacos (pirita, illmenita e titano-magnetita) que chegam a representar 15% da composição da rocha, ferro-hornblenda marrom-alaranjado, clorofaeita e outros filossilicatos amarelados (Anexo, Figura 5M e N).

A quantidade de granófiros e textura gráfica, intercrescimento de quartzo e feldspato alcalino, intersticial é bastante elevada em relação aos litotipos anteriores, podendo atingir até 15% do total da rocha, sendo 5% de quartzo e 10% de feldspato alcalino. Os cristais de quartzo em textura mosaico ocorrem também intersticialmente (2%).

#### 6.4 DIORITO

Rocha de cor cinza, com estrutura maciça e textura fanerítica grossa a muito grossa, que foi designado no campo “leucograbro”. Com base nos dados geoquímicos de rocha total, por FRX e ICP-MS, a rocha foi classificada através do software Petrograph, versão 1.0.2., no diagrama TAS para rochas plutônicas (Cox-Bell-Pank, 1979) e foi então designada de diorito. A rocha apresenta cristais centimétricos de piroxênio que podem formar padrões semelhantes a “grades”.

Os cristais de plagioclásios (item 7.2.) são normalmente com bordas e zonados e alguns com geminação aparente, muitos alterados (seritização) ou com bordas turvas. São cristais de forma tabulares e podem se apresentar fraturados (Anexo, Figura 5O e P).

Nos dioritos também é possível distinguir nos cristais de piroxênio (item 7.1.) partes do núcleo de alto relevo e bordas de relevo mais baixo, porém em bem menor quantidade que a rocha anterior. São cristais de forma alongada e sendo substituídos, muitas vezes quase que totalmente por minerais opacos (pirita, illmenita e titano-magnetita), atingem 5% da composição total da rocha, e ainda clorita ou ferro-hornblenda.

Intersticialmente ocorrem muitos granófiros (intercrescimento de feldspato alcalino e quartzo) até 35% da rocha, sendo 20% de quartzo e 15% de feldspato alcalino, o quartzo também ocorre granular em textura do tipo mosaico (3%). Intercrescimento de piroxênio e plagioclásio também está presente em diversas porções da rocha (Anexo, Figura 5Q).

No gabro e principalmente no diorito ocorre a apatita como mineral acessório. No entanto, diferentemente das rochas anteriores, o mineral se apresenta em cristais bem formados, aciculares e prismáticos, em sua maioria euédricos e subédricos, indicando que em algum momento a apatita passou a cristalizar precocemente na rocha.

## 6.5 RIOLITOS

São rochas de cor bege, acinzentada, estrutura maciça e textura fina a muito fina equigranular. Microscopicamente a textura é granular hipidiomórfica (Anexo, Figura 5R). Ocorrem ao longo do sill na forma de veios com espessuras variadas.

O plagioclásio (item 7.2.) euédrico é de forma tabular, apresenta bordas de aparência turva. Os dois feldspatos são facilmente identificáveis em lâmina, devido sua coloração, onde o plagioclásio se apresenta límpido e incolor, já o feldspato alcalino é turvo e de uma tonalidade marrom (Anexo, Figura 5S). Intersticialmente ocorrem granófiros até 30% da composição da rocha e quartzo granular em textura mosaico (10%).

O piroxênio (item 7.1.) está presente em pequenas proporções até aproximadamente 7% da composição total da rocha. Em sua maioria são cristais subédricos a anédricos. Sofre alteração para clorofaeita, filossilicatos amarelados e minerais opacos, que são em geral pirita e titano-magnetita com lamelas de exsolução de illmenita, esse minerais também ocorrem disseminados na rocha até 3% da composição total.

As amostras de riolitos (Anexo, Figura 5T) também apresentam cristais bem formados, euédricos e subédricos de apatita, que podem atingir até 5% da composição total da rocha.

## 6.6 VEIOS HIDROTERMAIS

Como já citado antes, diversos veios de composição riolítica cortam essas rochas, em variados níveis do sill. Esses veios apresentam espessuras também variáveis, desde milímetros a decímetros, nesses veios é ainda possível identificar em sua porção central, veios de preenchimento hidrotermal, bastante ricos em apofilita e quartzo (Anexo, Figura 5U e V). Esses veios também apresentam espessuras variáveis, podendo ser bem finos como no Anexo, Figura 5X e Z, onde aparentemente aproveitou fraturas para se instalar.

Nesses veios, foi identificada a presença do mineral apofilita em associação com o quartzo. Esse mineral, produto típico de hidrotermalismo, foi identificado em campo e sua confirmação foi obtida através da Difração de Raios-X. É incolor, apresentava boa clivagem, relevo moderado e birrefringência baixa, em tons de cinza com tons anômalos em marrom.

# 7 QUÍMICA MINERAL

---

## 7.1 PIROXÊNIOS

Os resultados mais representativos de análises de piroxênios obtidos são apresentados na Tabela IV, onde estão presentes também as fórmulas estruturais calculadas para um total de 4 cátions e 6 oxigênios utilizando o software *Minpet 2.02*; e proporções dos membros-finais Wo, En, Fs, Wef, Jd e Ae.

Table IV - Análises químicas quantitativas e qualitativas de rochas associadas ao Diorítico Cauíneiro (cristais de ilmenita SD)

Observa-se nos piroxênios uma ampla variação composicional, com enriquecimento no piroxênio em FeO conforme ocorre a diferenciação magmática. O que se observa tanto nas análises quanto nos diagramas é o *trend* do piroxênio cálcico, reconhecido em locais como a Intrusão de Skaergaard (Brown, 1957; Brown *et al.* 1963), onde ocorre aumento no teor de FeO, enquanto o teor de Ca se mantém praticamente constante, sofrendo ligeira diminuição no teor para depois tornar a aumentar (cf. diagrama ternário Wo-Fs-En, Figura 11).

Nas amostras de basalto e diabásio os cristais de piroxênio são em sua totalidade augitas de composição En~40, não tendo sido identificado nenhum cristal de pigeonita. Observa-se também na Figura 6 como os cristais de augita nas amostras de diabásio se tornam levemente mais ricos em FeO em relação ao basalto, que é a rocha menos diferenciada.

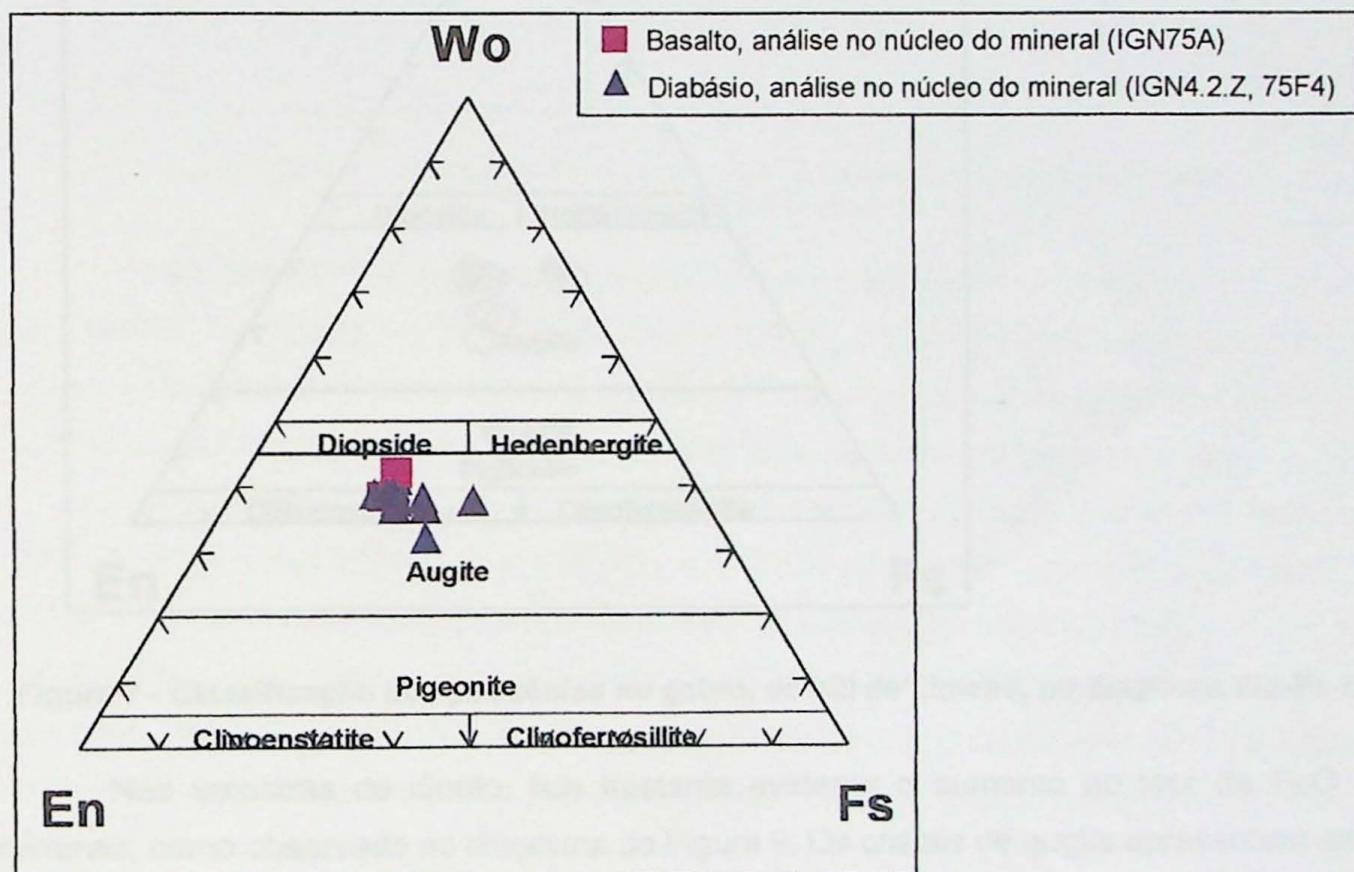


Figura 6 - Classificação dos piroxênios no basalto e diabásio, do sill de Limeira, no diagrama Wo-Fs-En.

Nas amostras de gabbro podemos observar na Figura 7 que existem três tipos de piroxênio: a augita, a augita subcálcica e a pigeonita. O que observamos em relação a pigeonita é que ela ocorre geralmente no núcleo dos cristais, sendo reconhecidos microscopicamente pelo relevo mais elevado (Anexo, Figura 8A). Esses cristais ocorrem parcialmente ou quase totalmente envolvidos por augita e augita subcálcica através de contato serrilhado.

Cristais de augita não ocorrem apenas como bordas, podendo ser cristais inteiros de uma única composição, semelhantes ao diabásio En~40. Os cristais que apresentam os

núcleos de augita são mais cálcicos que as bordas em torno das pigeonitas. Essas augitas subcálcicas (Anexo, Figura 8B e C) são bastante comuns e reconhecidos, por exemplo, no Dique Toninhas em Ubatuba (Gomes & Ruberti 1979). Segundo Secco *et al.* (1988), essa expressiva diminuição do teor de Ca nas augitas define um “quench” trend, onde a augita subcálcica não corresponde a somente uma fase, mas consiste em intercrescimentos de augita e pigeonita, resultando assim em uma composição global com menor teor de Ca (Figura 9). Vemos que também existe também uma augita de que é mais magnesiana e outra mais roca em ferro.

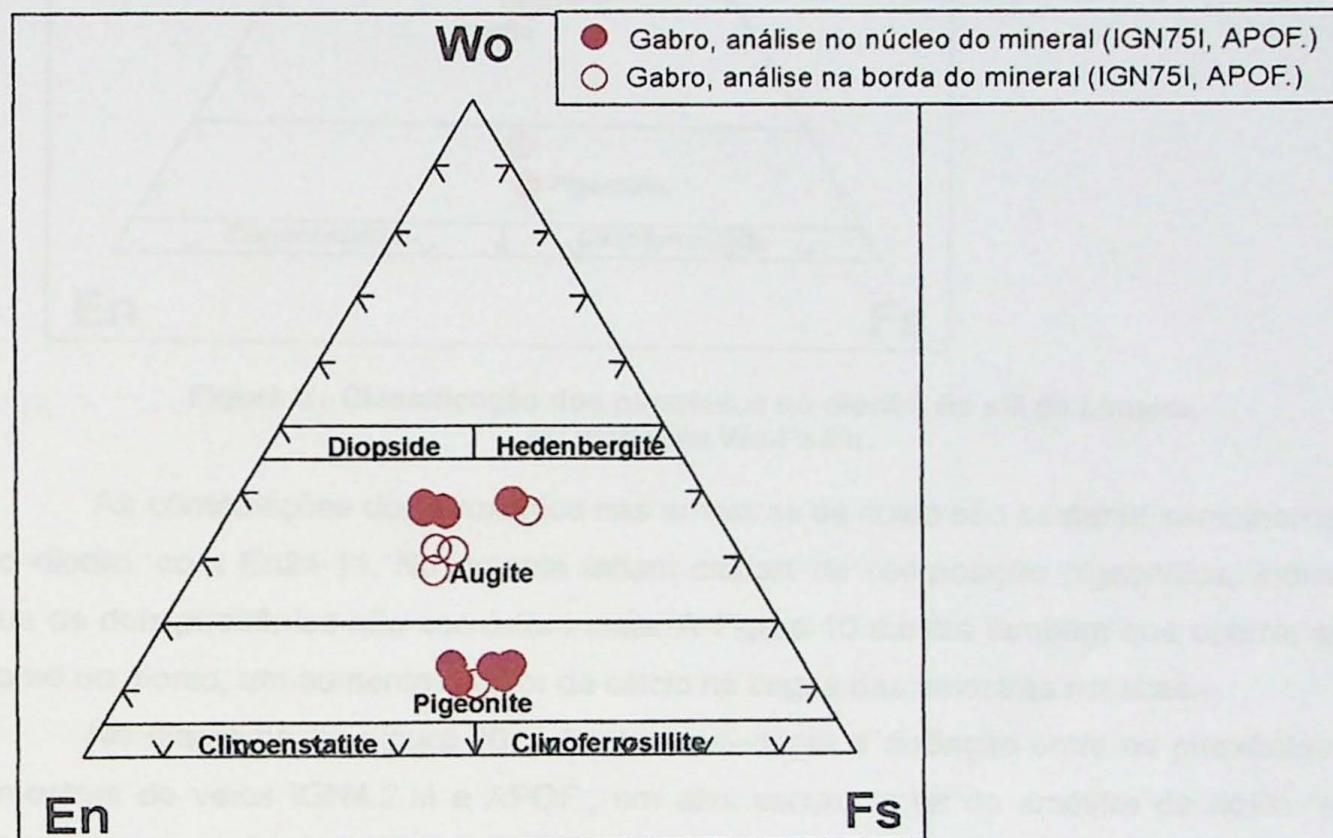
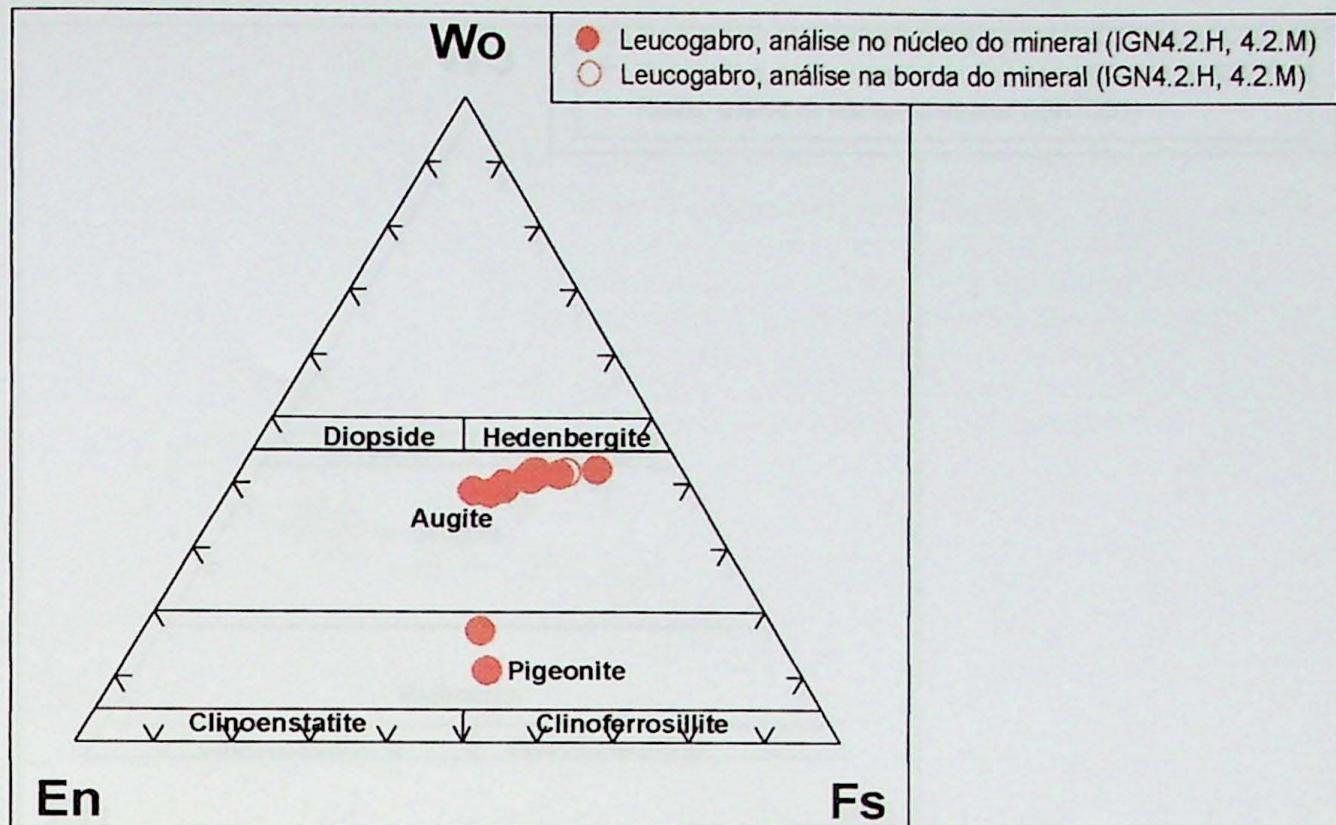


Figura 7 - Classificação dos piroxênios no gabbro, do sill de Limeira, no diagrama Wo-Fs-En.

Nas amostras de diorito, fica bastante evidente o aumento no teor de FeO dos minerais, como observado no diagrama da Figura 9. Os cristais de augita apresentam ampla variação composicional no intervalo En29-11 (Anexo, Figura 8D). Observa-se também que as augitas se tornam levemente mais cálcicas, com teores de Wo semelhantes aos observados nos basaltos.

No diorito também ocorrem cristais de pigeonita como núcleos corroídos por augita nas bordas (Anexo, Figura 8E). No entanto, a quantidade desse mineral é menor que nas amostras de gabbro. Tem sido observado em outras intrusões de caráter toleítico que existe um ponto na diferenciação magmática onde a pigeonita desaparece (citar referência), o que também parece ocorrer no sill de Limeira, e pode responder pelo caráter mais cálcico da augita que cristaliza isolada (e portanto fora do “solvus”) nas rochas mais félsicas.



**Figura 9 - Classificação dos piroxênios no diorito, do sill de Limeira, no diagrama Wo-Fs-En.**

As composições dos piroxênios nas amostras de riolito são bastante semelhantes as do diorito, com En24-11. No entanto faltam cristais de composição pigeonítica, indicando que os dois piroxênios não coexistem mais. A Figura 10 mostra também que ocorre, assim como no diorito, um aumento no teor de cálcio na augita das amostras riolíticas.

No diagrama da Figura 10, é bastante evidente a distinção entre os piroxênios das amostras de veios IGN4.2.M e APOF., em azul escuro, e os da amostra de riolito “pura” IGN75G1, em azul claro. Vemos que nas amostras de veios (IGN4.2.H, APOF.) os piroxênios apresentam composição mais rica em FeO, indicando uma maior diferenciação. Existem portanto diferenças de composição entre os veios riolíticos e a composição dos piroxênios indicam que os mais diferenciados são aqueles que apresentam espessura mais fina e se associam a veios hidrotermais.

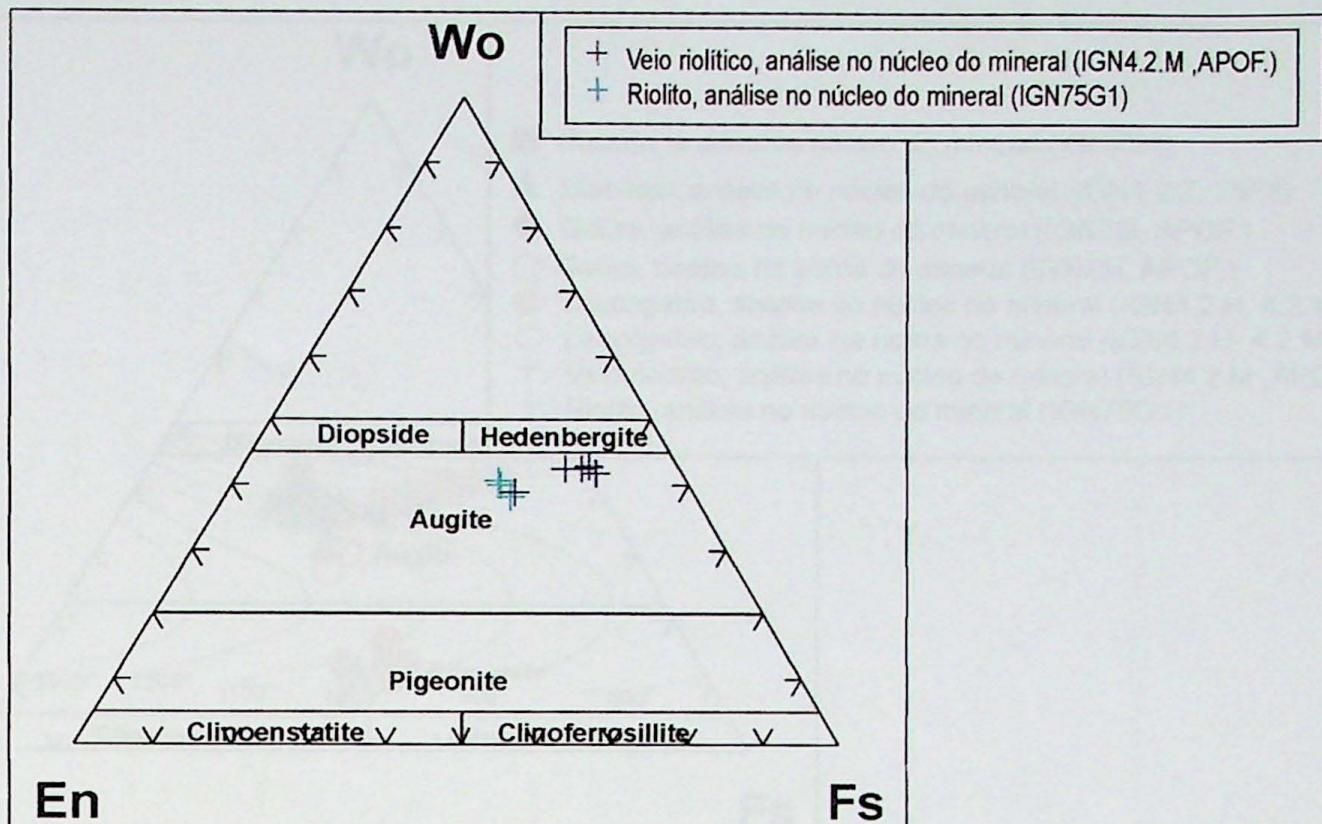
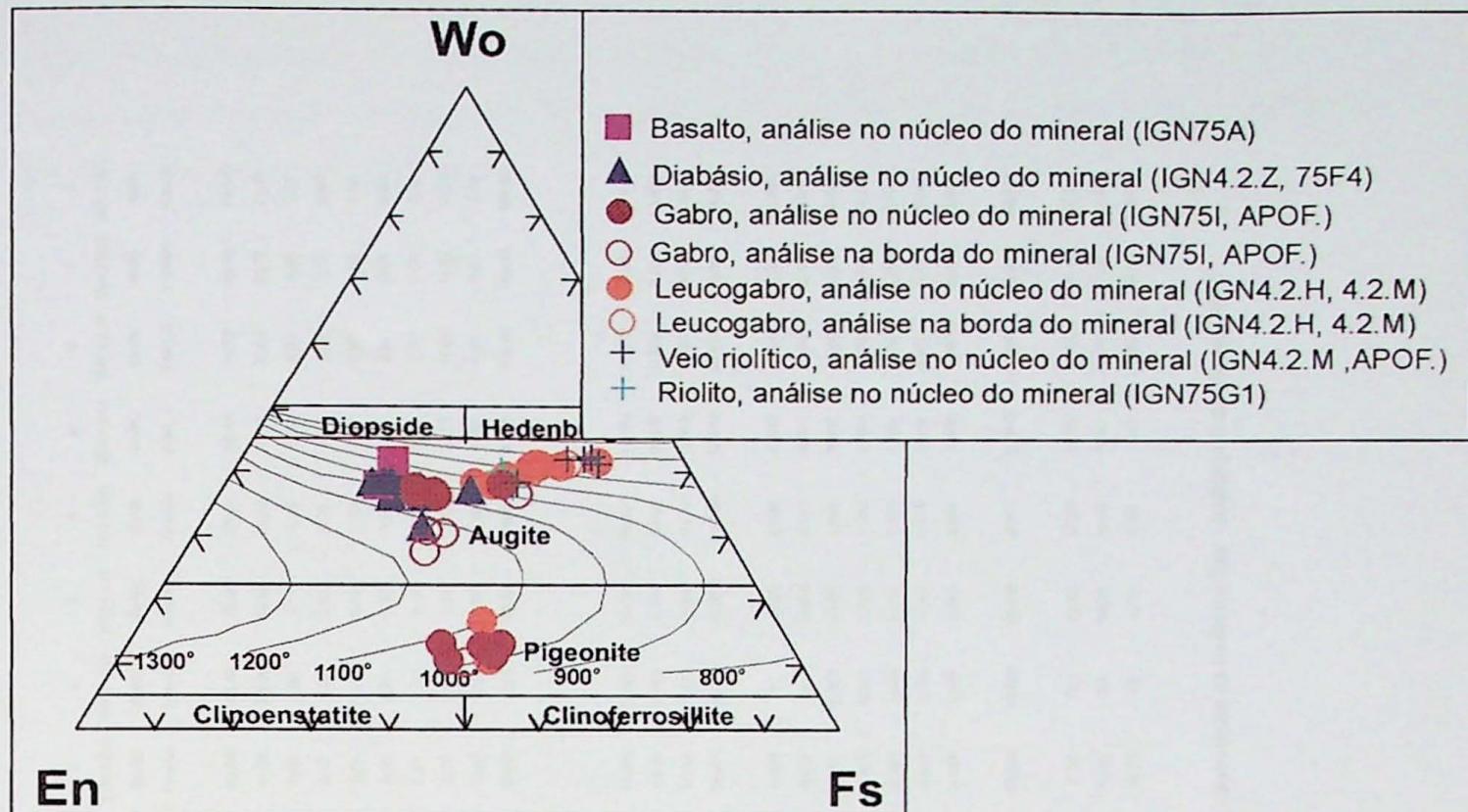


Figura 10 - Classificação dos piroxênios no riolito, do sill de Limeira, no diagrama Wo-Fs-En.

No diagrama da Figura 11 estão representadas as isotermas para dois piroxênios coexistentes de Lindsley (1983), bem como todas as análises químicas minerais obtidas.

As temperaturas só podem ser estimadas quando há coprecipitação de augita e pigeonita, o que ocorreu entre  $T \sim 1100^{\circ}\text{C}$  e  $T \sim 1000^{\circ}\text{C}$ , em um intervalo composicional relativamente pequeno (En~46-38). A pigeonita analisada nas amostras de gabbro indica cristalização a  $T \sim 1000^{\circ}\text{C}$ , e coexiste com augitas. As composições augitas tardias do gabbro e diorito, e também das augitas ricas em Fe típicas das rochas mais diferenciadas seriam compatíveis com temperaturas mais baixas, da ordem de  $900^{\circ}\text{C}$ ; no entanto, como não coexistem com pigeonita, o termômetro de Lindsley não pode ser aplicado..

O diagrama integrado mostra bem o “trend” do piroxênio cálcio ao longo de todo o intervalo composicional, com a ligeira queda no teor de Ca, quando ocorre a coexistência de augita e pigeonita (*solvus*), e o fim da cristalização de pigeonita coincidente com o enriquecimento de FeO na augita.



**Figura 11 - Composições dos piroxênios do sill de Limeira, no diagrama Wo-Fs-En, e isoterma. Adaptado de Lindsley, 1983.**

Desta forma observando as composições dos membros finais nas rochas, parece existir uma distinção bimodal: as augitas de basaltos e diabásios possuem composição de En~40, enquanto nas rochas mais diferenciadas (dioritos e riolitos) a composição é En29-11.

Os valores de  $TiO_2$  e  $Al_2O_3$  apresentam valores nos basalto e diabásios entre 0,9 e 2,5 de Ti e entre 1,5 e 4,4 de Al, já no grupo mais diferenciado esses valores são bem menores entre 0,3 e 0,9 de Ti e 0,6 e 1,3 de Al. Essas variações devem ser reflexos da diferença de temperaturas entre as rochas, já que a entrada de Ti e Al nas estruturas do piroxênio são favorecidas por altas temperaturas, como as de cristalização dos diabásios e basaltos.

## 7.2 FELDSPATOS

Os resultados de análises representativas dos feldspatos são apresentados na Tabela V. As fórmulas estruturais foram calculadas para um total de 20 cátions e 32 oxigênios, utilizando o software *Minpet 2.02*; foram também calculadas as proporções dos membros-final Ab, An, Or.

Os plagioclásios apresentam variação composicional muito ampla entre as diferentes amostras e, em alguns casos, em uma mesma amostra.

Nas amostras de basalto e diabásio analisadas, observaram-se composições no intervalo oligoclásio a labradorita: An52-45 no basalto da amostra IGN75A, An59-52 no diabásio da amostra IGN75F4 (as composições mais cárquicas obtidas neste trabalho) e An50-28, um intervalo composicional bastante amplo, para o diabásio da amostra IGN4.2Z.

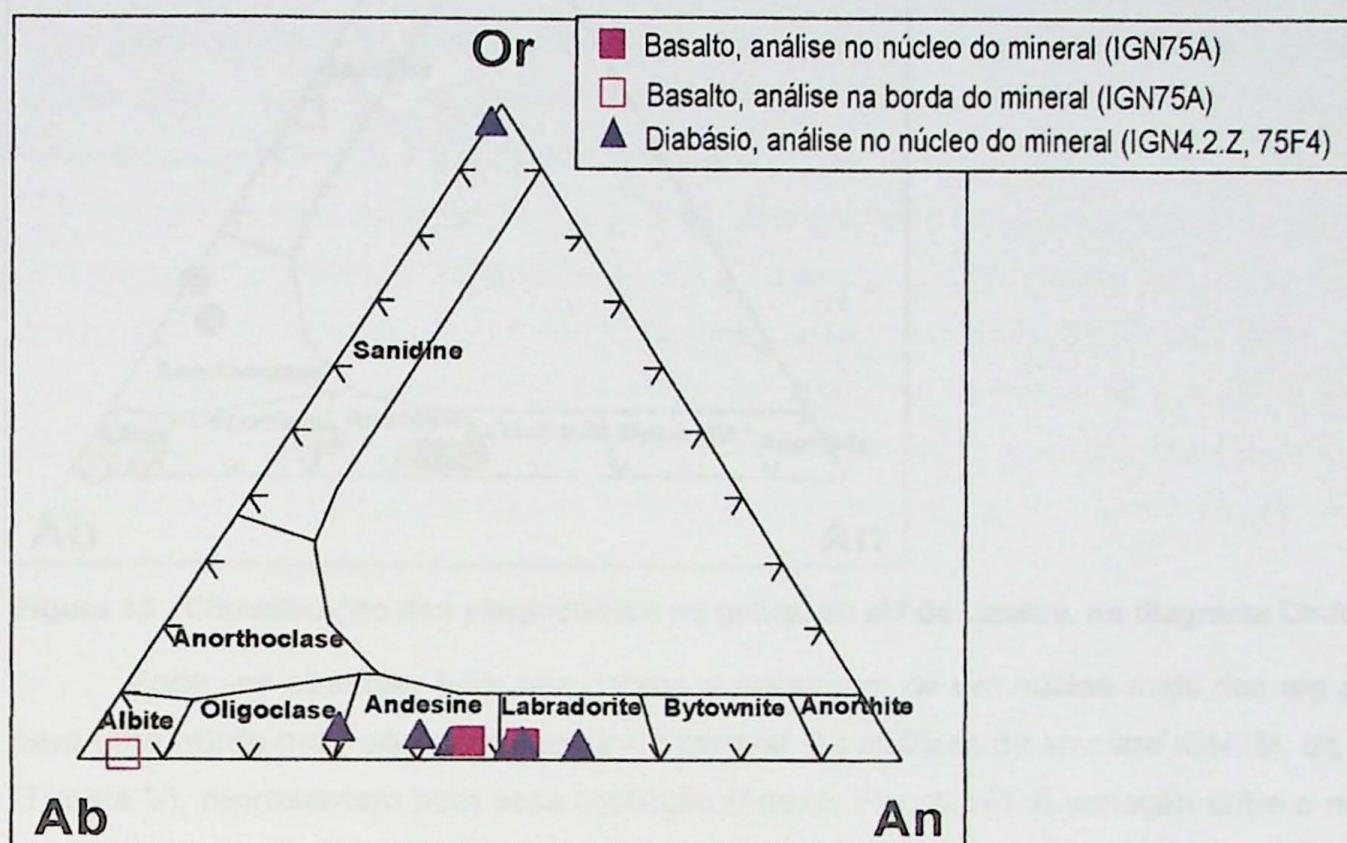
Analisa	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	
Amostra	IGN 75A	IGN 75A	IGN 75A	IGN 75F4	IGN 75F4	IGN 75F4	IGN 42.Z	IGN 75I	IGN 42.H	IGN 75G1	IGN 75G1																										
Rocha	basalto	basalto	basalto	diabásio	diabásio	diabásio	diabásio	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro	gabro								
Localização	2-centro	2-borda	3-oculo_c	1-centro	2-oculo_c	3-centro	3-oculo_c	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda	1-borda									
SiO <sub>2</sub>	55,40	67,32	66,84	65,08	68,83	55,96	65,61	65,18	62,00	58,10	57,68	65,57	66,75	61,02	57,20	56,93	63,98	63,70	58,04	57,91	69,66	66,79	68,15	66,94													
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,71	20,45	20,73	18,74	19,93	27,51	17,80	18,56	23,75	26,26	26,50	18,38	21,30	23,89	26,85	27,03	18,38	22,38	25,43	26,21	19,52	21,03	20,77	21,41													
TiO <sub>2</sub>	0,13	0,00	0,03	0,05	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,08	0,04	0,04	0,08	0,06	0,02	0,26	0,00	0,00	0,04	0,05	0,00	0,04	0,00	0,01													
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,76	0,06	0,35	0,07	0,00	0,50	0,19	0,01	0,33	0,45	0,60	0,11	0,02	0,32	0,56	0,60	0,17	0,30	0,51	0,55	0,00	0,05	0,12	0,00													
MnO	0,00	0,00	0,00	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00													
MgO	0,12	0,04	0,00	0,01	0,02	0,07	0,00	0,00	0,02	0,06	0,11	0,01	0,00	0,02	0,04	0,06	0,00	0,03	0,02	0,04	0,00	0,00	0,01	0,00													
CaO	10,60	1,10	1,63	0,00	0,49	10,13	0,04	0,05	5,88	8,64	9,30	0,00	1,98	5,88	9,30	9,49	0,01	3,79	8,18	8,24	0,02	1,65	0,34	0,53													
Na <sub>2</sub> O	5,22	11,17	10,73	0,25	10,43	4,95	1,68	2,30	7,53	6,30	5,86	0,45	10,59	7,89	6,05	5,77	0,79	6,91	6,38	6,48	10,55	10,62	11,52	11,25													
K <sub>2</sub> O	0,43	0,15	0,21	16,22	0,11	0,45	13,71	13,69	0,96	0,57	0,58	16,08	0,23	0,77	0,49	0,53	15,25	0,39	0,63	0,50	0,03	0,22	0,05	0,08													
Total	100,37	100,28	100,51	100,45	99,82	99,71	99,23	100,84	100,81	100,62	100,78	100,64	100,95	100,27	100,66	100,87	98,58	99,74	99,54	99,97	99,78	100,41	100,98	100,23													

**Fórmula estrutural com base em 20 cátions e 32 O.**

Si	9,976	11,770	11,685	11,963	11,994	10,095	12,100	11,973	10,984	10,382	10,304	12,022	11,619	10,896	10,240	10,182	11,962	11,305	10,488	10,391	12,108	11,673	11,804	11,687												
Al	5,875	4,211	4,268	4,058	4,089	5,845	3,868	4,015	4,955	5,526	5,575	3,968	4,366	5,024	5,661	5,693	4,046	4,678	5,412	5,539	3,995	4,329	4,236	4,402												
Fe <sub>3</sub>	0,103	0,008	0,045	0,009	0,000	0,068	0,026	0,001	0,044	0,060	0,081	0,015	0,003	0,043	0,075	0,081	0,023	0,04	0,069	0,074	0,000	0,007	0,015	0,000												
Soma T	15,954	15,989	15,988	16,030	16,083	16,008	15,992	15,989	15,983	15,979	15,965	16,005	15,998	15,971	15,979	15,991	16,031	16,023	15,974	16,004	16,103	16,099	16,055	16,089												
Ti	0,017	0,000	0,004	0,007	0,000	0,018	0,000	0,000	0,011	0,005	0,006	0,010	0,008	0,003	0,035	0,000	0,005	0,000	0,006	0,000	0,005	0,000	0,005	0,000												
Mn	0,000	0,000	0,008	0,003	0,002	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0	0,003	0,000	0,001	0,003	0,000													
Mg	0,032	0,009	0,000	0,001	0,005	0,020	0,000	0,005	0,016	0,029	0,002	0,000	0,005	0,011	0,016	0,000	0,008	0,005	0,010	0,000	0,000	0,003	0,001													
Ca	2,045	2,206	3,035	0,000	0,002	1,658	0,007	0,010	1,116	1,654	1,760	0,000	0,369	1,125	1,764	1,819	0,001	0,721	1,584	0,004	0,308	0,063	0,100													
Na	1,873	3,787	3,637	0,008	3,522	1,731	0,673	0,819	2,587	2,183	3,030	0,159	3,574	2,732	2,100	2,001	0,266	2,236	2,253	3,556	3,598	3,870	3,808													
K	0,079	0,033	0,047	3,803	0,024	0,102	3,226	3,208	0,217	0,130	0,132	3,761	0,051	0,175	0,112	0,121	3,639	0,088	0,145	0,115	0,006	0,050	0,011	0,017												
Soma M	4,016	4,035	3,993	3,907	3,646	3,831	3,906	4,037	3,928	3,983	3,971	3,930	3,994	4,037	4,007	3,957	3,928	3,983	3,973	3,967	3,964	3,950	3,927													
Soma cátions	19,970	20,024	19,991	19,937	19,720	19,839	19,902	20,026	19,911	19,962	19,935	19,992	20,008	19,986	19,948	19,906	19,947	19,971	19,670	19,973	20,005	20,016														
Ab	46,00	94,10	91,20	2,50	96,80	45,70	17,20	20,30	66,00	55,00	51,50	4,10	89,50	67,80	52,60	50,60	7,30	79,1	56,40	57,00	99,70	91,00	98,10	97,00												
An	51,60	5,10	7,60	0,00	2,50	51,60	0,20	28,50	41,70	45,20	0,00	9,20	27,90	44,60	46,20	0,00	18,6	39,90	40,10	0,10	7,80	1,60	2,50													
Or	2,50	0,80	1,20	97,70	0,70	2,70	82,60	79,50	5,50	3,30	95,90	1,30	4,30	2,80	3,10	92,70	2,3	3,70	2,90	0,20	1,30	0,30	0,40													

Tabela V - Análises químicas representativas por microsonda eletrônica de plagioclásios de diabásios e rochas associadas na Pedreira Cavatão (sul de Limeira, SP).

Além disto, como se pode observar no diagrama da Figura 12, os plagioclásios podem possuir bordas de composição albítica, como na amostra de basalto IGN75I. Os ocelos presentes nas amostras de diabásio também apresentam feldspatos de composições albíticas e de feldspato potássico.



**Figura 12 - Classificação dos plagioclásios no basalto e diabásio, do sill de Limeira, no diagrama Or-Ab-An.**

No gabbro IGN75I os cristais maiores de plagioclásio apresentam núcleos de andesina a labradorita, apresentando pouca variação composicional (An46-43). Os cristais apresentam variações compostionais entre a porção central e as bordas, identificáveis opticamente e confirmados através das análises químicas. Como pode ser observado, no diagrama da Figura 13, as zonas intermediárias dos cristais apresentam composições mais sódicas que o núcleo, e as bordas são ainda muito mais sódicas, como de oligoclásio (An12) ou de composição albítica. Algumas bordas ainda apresentam composições mais alcalinas. Na amostra APOF, a variação composicional do núcleo também é pequena; no entanto a composição é um pouco mais cálcica (An50-46) em relação a IGN75I. As composições obtidas de granófiros são as mais alcalinas do diagrama, sendo de composição de anortoclásio e sanidina.

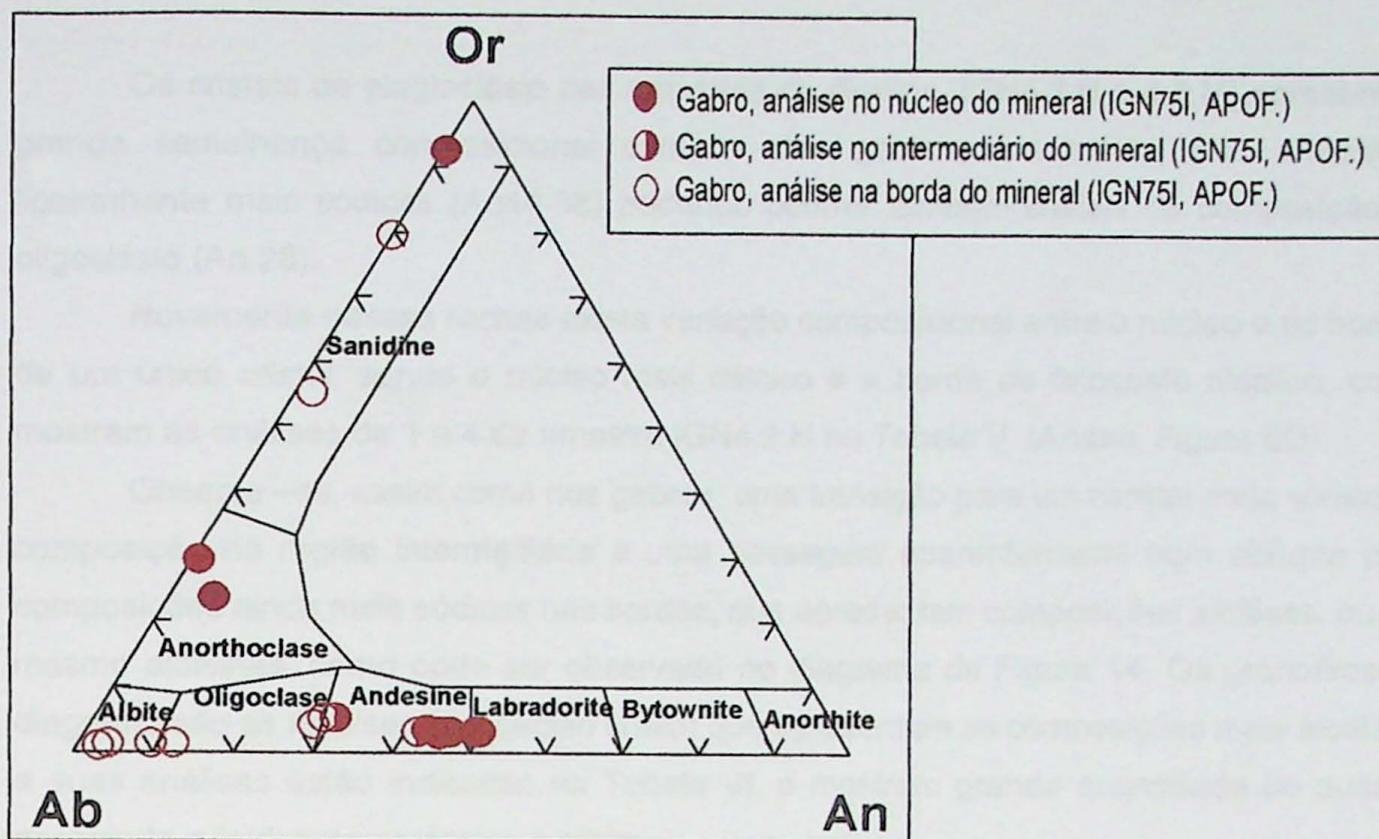


Figura 13 - Classificação dos plagioclásios no gábrico, do sill de Limeira, no diagrama Or-Ab-An.

Pode -se observar bem nos gábricos a passagem de um núcleo mais rico em cálcio para uma borda mais sódica em um único mineral. As análises da amostra IGN75I, de 1 a 4 (Tabela V), representam bem essa transição (Anexo, Figura 8F). A variação entre o núcleo (An~45), pontos intermediários (An~42-28) e a borda (An0,2), é bastante grande para um único cristal.

A Tabela VI, a seguir apresenta os dados obtidos para a análise química de granófiros através da Microssonda Eletrônica, tanto para o gábrico como para o diorito. Os granófiros ocorrem intersticialmente e associados aos cristais de plagioclásio, como vemos no Anexo, Figura 8F e G. As análises mostram grande quantidade de quartzo, intercrescido com albita e feldspato potássico.

Análises	5	6	1	5	6
Amostra	IGN 75I	IGN 75I	APOF.	IGN 4.2.H	IGN 4.2.H
Rocha	gábrico	gábrico	gábrico	diorito	diorito
Localização	granófiro	granófiro	granófiro	granófiro	granófiro
SiO <sub>2</sub>	78,22	66,34	83,32	65,97	74,28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,41	16,06	9,69	19,40	14,44
TiO <sub>2</sub>	0,10	0,00	0,00	0,00	0,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,36	0,98	0,03	0,07
MnO	0,00	0,02	0,00	0,00	0,04
MgO	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00
CaO	0,15	0,07	0,60	0,71	0,33
Na <sub>2</sub> O	5,11	0,71	4,01	5,18	4,26
K <sub>2</sub> O	3,29	13,91	2,06	9,04	6,59
Total	100,44	97,63	100,77	110,96	100,06

Tabela VI – Análises químicas por microssonda eletrônica de granófiros em gábricos e diorito na Pedreira Cavinatto (sill de Limeira, SP).

Os cristais de plagioclásio nas amostras de dioritos (IGN4.2.H e 4.2.M) apresentam grande semelhança composicional com os dos gabros; em média, são andesinas ligeiramente mais sódicas (An44-38) podendo ocorrer também cristais de composição de oligoclásio (An 28).

Novamente nessas rochas existe variação composicional entre o núcleo e as bordas de um único cristal, sendo o núcleo mais cálcico e a borda de feldspato alcalino, como mostram as análises de 1 a 4 da amostra IGN4.2.H na Tabela V, (Anexo, Figura 8G).

Observa-se, assim como nos gabros, uma transição para um caráter mais sódico da composição na região intermediária e uma passagem aparentemente bem abrupta para composições ainda mais sódicas nas bordas, que apresentam composições albíticas, ou até mesmo alcalinas, como pode ser observado no diagrama da Figura 14. Os granófiros no diagrama são as análises (em círculo cheio) que apresentam as composições mais alcalinas e suas análises estão indicadas na Tabela VI, e mostram grande quantidade de quartzo associado a feldspato potássico e albita.

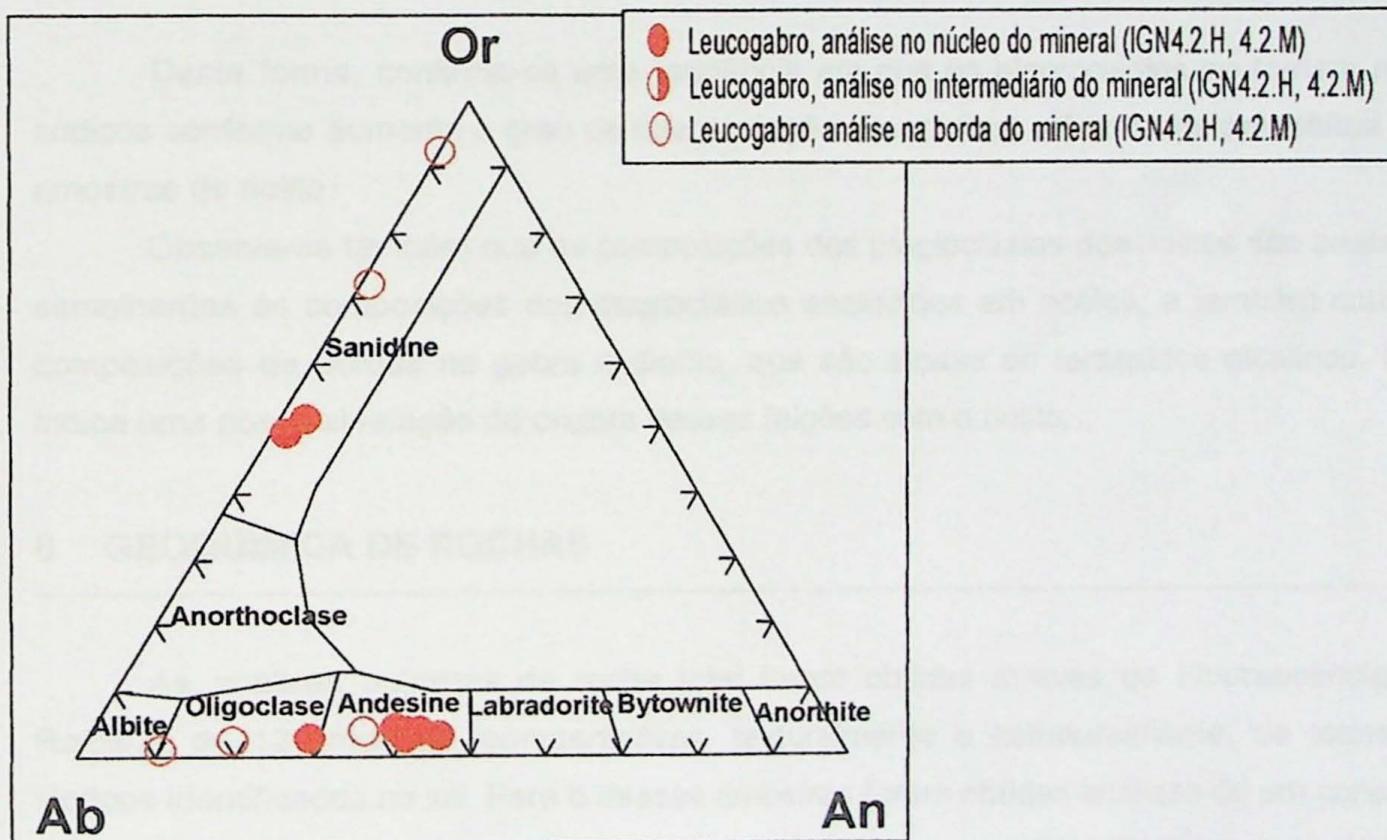


Figura 14 - Classificação dos plagioclásios no diorito, do sill de Limeira, no diagrama Or-Ab-An.

Os cristais de plagioclásio no riolito são em sua totalidade albitas (An 2,5-1,6), que coexistem com anortoclásio e feldspato alcalino (Figura 15).

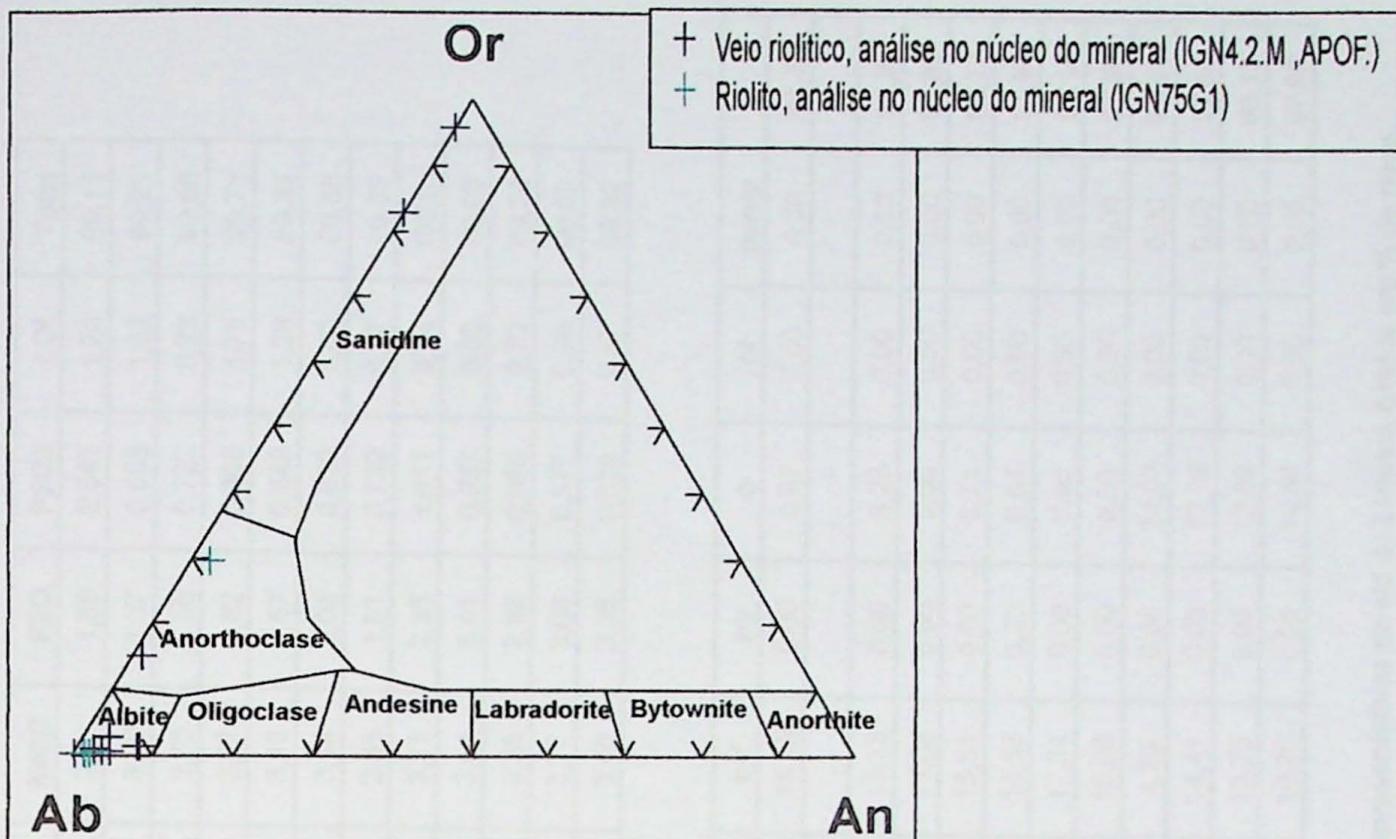


Figura 15 - Classificação dos plagioclásios no riolito, do sill de Limeira, no diagrama Or-Ab-An.

Desta forma, confirma-se uma tendência em que os plagioclásios se tornam mais sódicos conforme aumenta o grau de diferenciação das rochas, até se tornarem albitas nas amostras de riolito.

Observa-se também que as composições dos plagioclásios dos riolitos são bastante semelhantes às composições dos plagioclásios analisados em ocelos, e também com as composições de bordas no gábrico e diorito, que são albitas ou feldspatos alcalinos. Isso indica uma possível relação da origem dessas feições com o riolito.

## 8 GEOQUÍMICA DE ROCHAS

As análises químicas de rocha total foram obtidas através de Fluorescência de Raios-X, de 12 amostras representativas, texturalmente e estruturalmente, de todos os litotipos identificados no sill. Para 6 dessas amostras foram obtidas análises de um conjunto de elementos traços, incluindo os elementos terras-raras, por ICP-MS (Espectrometria de Massa com Plasma Acoplado por Indução). São amostras bem distribuídas por toda a extensão da cava, pra assim detectar de forma completa a variação composicional no local. Os resultados obtidos estão representados na Tabela VII e VIII, bem como as normas CIPW calculadas. Com esses dados foram então gerados diagramas de variação usando sílica como índice de diferenciação, através do software *Petroplot*, em programa *Excel*, para os elementos maiores e traços.

Amostra	Nome da Rocha	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe2O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P2O <sub>5</sub>	LOI	Total
IGN 75A	Basalto fino	48,58	3,833	12,37	15,51	0,235	4,83	7,29	2,96	1,68	0,543	1,28	99,11
IGN 4.2.L	Basalto amigdaloïdal	48,59	3,870	12,16	15,60	0,225	4,28	7,14	3,90	1,37	0,555	1,52	99,21
IGN 4.2.B	Diabásio ocelar	52,98	3,253	12,25	14,60	0,234	3,39	7,39	2,75	1,86	0,722	0,23	99,66
IGN 75F2	Diabásio ocelar	50,86	3,536	11,91	15,02	0,242	3,59	7,51	2,97	1,62	0,698	1,75	99,71
IGN 75F4	Diabásio ocelar	50,17	3,734	12,16	15,28	0,250	3,72	7,35	3,19	1,57	0,649	1,28	99,35
IGN 4.2.A	Diabásio	53,62	2,974	12,49	14,06	0,240	2,92	6,44	3,44	2,04	0,839	0,62	99,68
IGN 75J	Diabásio	52,76	3,290	12,16	14,60	0,238	3,31	7,29	2,85	1,81	0,739	0,47	99,52
IGN 75I	Gabro	54,64	2,505	12,13	14,82	0,244	2,28	6,08	3,11	2,35	1,011	0,84	100,01
IGN 75G1	Riolito	70,67	0,474	13,16	3,72	0,072	0,22	1,03	3,61	5,41	0,057	0,66	99,08
IGN 4.2.H	Diorito	57,72	1,792	12,43	13,87	0,228	1,33	4,86	3,28	2,89	0,666	0,72	99,79
IGN 4.2.K	Diorito	59,75	1,691	12,45	11,89	0,199	1,25	4,20	3,77	3,06	0,577	0,99	99,83
IGN 4.2.M	Diorito	60,63	1,602	12,20	11,47	0,190	1,17	4,34	3,46	3,36	0,529	0,87	99,82

ap	il	or'	ab'	an	mt	di	hy'	hy	q	ol	perov	
IGN 75A	Basalto fino	1,26	7,28	9,93	25,05	15,50	3,37	14,26	18,89	0,00	0,97	0,00
IGN 4.2.L	Basalto amigdaloïdal											
IGN 4.2.B	Diabásio ocelar	1,68	6,18	10,99	23,27	15,59	3,19	13,80	15,33	0,00	8,23	0,00
IGN 75F2	Diabásio ocelar	1,62	6,72	9,57	25,13	14,38	3,27	15,42	15,02	0,00	5,56	0,00
IGN 75F4	Diabásio ocelar	1,51	7,09	9,28	26,99	14,22	3,32	15,13	15,51	0,00	3,71	0,00
IGN 4.2.A	Diabásio	1,95	5,65	12,06	29,11	12,61	3,06	11,75	14,85	0,00	6,84	0,00
IGN 75J	Diabásio	1,72	6,25	10,70	24,12	15,04	3,19	13,83	17,34	0,00	6,96	0,00
IGN 75I	Gabro	2,35	4,76	13,89	26,32	12,20	3,21	9,76	15,88	0,00	9,50	0,00
IGN 75G1	Riolito	0,13	0,90	31,97	30,55	3,73	0,81	0,89	4,20	0,00	24,93	0,00
IGN 4.2.H	Diorito	1,55	3,40	17,08	27,75	10,66	3,02	7,92	14,41	0,00	12,09	0,00
IGN 4.2.K	Diorito	1,34	3,21	18,08	31,90	8,83	2,59	7,15	12,20	0,00	12,82	0,00
IGN 4.2.M	Diorito	1,23	3,04	19,86	29,28	7,83	2,49	8,89	10,70	0,00	14,66	0,00

Tabela VII - Análises químicas, por FRX (Fluorescência de Raios-X) e normas CIPW de amostras representativas do silt de Limeira, óxidos em % de peso.

Amostra	Nome da Rocha	F	S	Cl	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs
IGN 75A	Basalto fino	328	163	<15	30	412	23	32	19	48	129	21	48	411	38.4	228	22.3	3.75
IGN 4.2.L	Basalto amigdaloïdal	367	<100	<15	33	414	14	35	16	49	132	22	33	506	36	229	26	
IGN 4.2.B	Diabásio ocelar	465	186	<15	24	275	<2	21	4	13	136	24	38	459	46	312	29	
IGN 75F2	Diabásio ocelar	<223	<100	<15	29	294	3	22	4	12	139	23	35	514	44	286	31	
IGN 75F4	Diabásio ocelar	365	<100	<15	29	321	2	25	7	29	139	23	33	498	43.1	262	30.2	1.2
IGN 4.2.A	Diabásio	<223	<100	<15	28	189	3	20	<2	8	143	24	46	502	54.6	333	35.1	0.7
IGN 75J	Diabásio	907	138	115	30	273	3	24	3	16	144	24	37	460	45	308	31	
IGN 75I	Gabro	1077	519	<15	23	88	4	18	2	21	158	26	51	451	61.7	373	35.9	0.83
IGN 75G1	Riolito	455	1737	37	6	<3	<2	<3	2	8	60	24	126	227	49	687	32.7	0.63
IGN 4.2.H	Diorito	1206	1271	165	19	12	8	14	2	25	161	27	64	403	68.9	479	47.8	1.06
IGN 4.2.K	Diorito	799	6668	114	18	24	4	11	<2	21	155	27	63	362	63	504	47	
IGN 4.2.M	Diorito	667	2939	<15	14	30	3	7	<2	14	143	25	73	353	63	517	45	

Amostra	Nome da Rocha	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf
IGN 75A	Basalto fino	519	33	71.1	8.78	38.9	8.52	2.7	7.37	1.04	6.54	1.33	3.38	0.44	2.7	0.45	5.58
IGN 4.2.L	Basalto amigdaloïdal	501	30	60		59											
IGN 4.2.B	Diabásio ocelar	554	50	93		50											
IGN 75F2	Diabásio ocelar	528	44	95		52											
IGN 75F4	Diabásio ocelar	514	38.4	83.6	10.9	46.4	9.55	3.02	8.27	1.27	7.28	1.49	3.78	0.51	3.35	0.49	6.29
IGN 4.2.A	Diabásio	628	52	113	14.6	61.6	12.5	3.85	11.5	1.65	9.41	1.91	4.9	0.66	4.25	0.64	8.22
IGN 75J	Diabásio	583	52	76		53											
IGN 75I	Gabro	728	57.5	126	16	72.5	14.4	4.08	11.8	1.8	11.1	2.14	5.45	0.7	4.87	0.75	9.37
IGN 75G1	Riolito	1150	66.1	143	14.8	57.1	10.6	2.43	8.62	1.29	8.45	1.76	4.94	0.71	4.67	0.77	17.9
IGN 4.2.H	Diorito	917	72.4	146	19.2	85.5	17	4.18	12.8	2.03	13.2	2.53	5.86	0.81	5.76	0.94	12.1
IGN 4.2.K	Diorito	1026	71	135		59											
IGN 4.2.M	Diorito	985	72	129		78											

Amostra	Nome da Rocha	Ta	Pb	Th	U
IGN 75A	Basalto fino	0.72	5.11	2.81	0.59
IGN 4.2.L	Basalto amigdaloïdal		<5	11	8
IGN 4.2.B	Diabásio ocelar		<5	14	10
IGN 75F2	Diabásio ocelar		<5	10	10
IGN 75F4	Diabásio ocelar	1.26	4.48	3.57	0.68
IGN 4.2.A	Diabásio	0.93	7.44	4.95	0.96
IGN 75J	Diabásio		10	12	10
IGN 75I	Gabro	1.78	6.79	5.33	1.16
IGN 75G1	Riolito	2.02	11.1	11.1	2.34
IGN 4.2.H	Diorito	1.55	8.71	7.1	1.54
IGN 4.2.K	Diorito		15	10	9
IGN 4.2.M	Diorito		<5	14	9

Tabela VIII - Análises químicas de elementos traços por FRX (Fluorescência de Raios-X) e ICP-MS (Espectrometria de Massas com Plasma Acoplado), de amostras representativas do sítio de Limeira, elementos em ppm.

Resultados indicados em marron são derivados de ICP-MS, os em preto de FRX.

Os elementos maiores mostram um comportamento coerente para todo o conjunto de amostras. Os basaltos apresentam aproximadamente 49% de SiO<sub>2</sub> e o riolito 71% de SiO<sub>2</sub>. Os diabásio e gabros estão com valores intermediários entre esses, chegando nos leucogabros mais profundos a atingir elevada porcentagem de SiO<sub>2</sub> (61%). A presença de quartzo e hiperstênio normativos no basalto da amostra IGN75A são indicativos do caráter toleítico do magma,

Entre os óxidos dos **elementos maiores e menores** (Figura 18), observa-se que o que o aumento no teor de SiO<sub>2</sub> é acompanhado pela diminuição no teor dos elementos constituintes de minerais maficos como CaO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO, MgO. Existe uma diferença na trajetória dos óxidos de TiO<sub>2</sub> e o MgO, onde a diminuição do teor é muito forte até os dioritos, e inflete a partir daí, quando se mostra mais suave.

O K<sub>2</sub>O mostra um aumento contínuo em seu teor, variando entre 1,4 e 5,4%. Os teores de Na<sub>2</sub>O mantêm-se quase constantes, com sugestão de um pequeno aumento, variando em torno de 3%, assim como os teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que variam em torno de 12%, mostrando um aumento maior na amostra de riolito (IGN75G1).

Um comportamento interessante é observado para P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, cuja trajetória é de um aumento no teor no início e diminuição no final, indicando um ponto de saturação a aproximadamente 55% de sílica. A partir desse momento é observada em lâminas, como já descrito, que a cristalização da apatita é precoce, confirmando a saturação.

**Os elementos traços** estão apresentados na Figura 19, também em diagramas de variação usando SiO<sub>2</sub> como índice de diferenciação. É possível distinguir elementos com comportamento incompatível, com destaque para o Ba, cujo teor aumenta com o fracionamento de 500 a 1150 ppm, e também Ce, La, Rb e Zr.

Comportamento compatível é mostrado por Sr, Co e Cr que sofrem diminuição de teor de 514 a 227, 35 a <3 e de 23 a <2 ppm, respectivamente. Já o V é um elemento que sofre uma diminuição brusca no teor, passando de 414 nos basaltos a <3 no riolito.

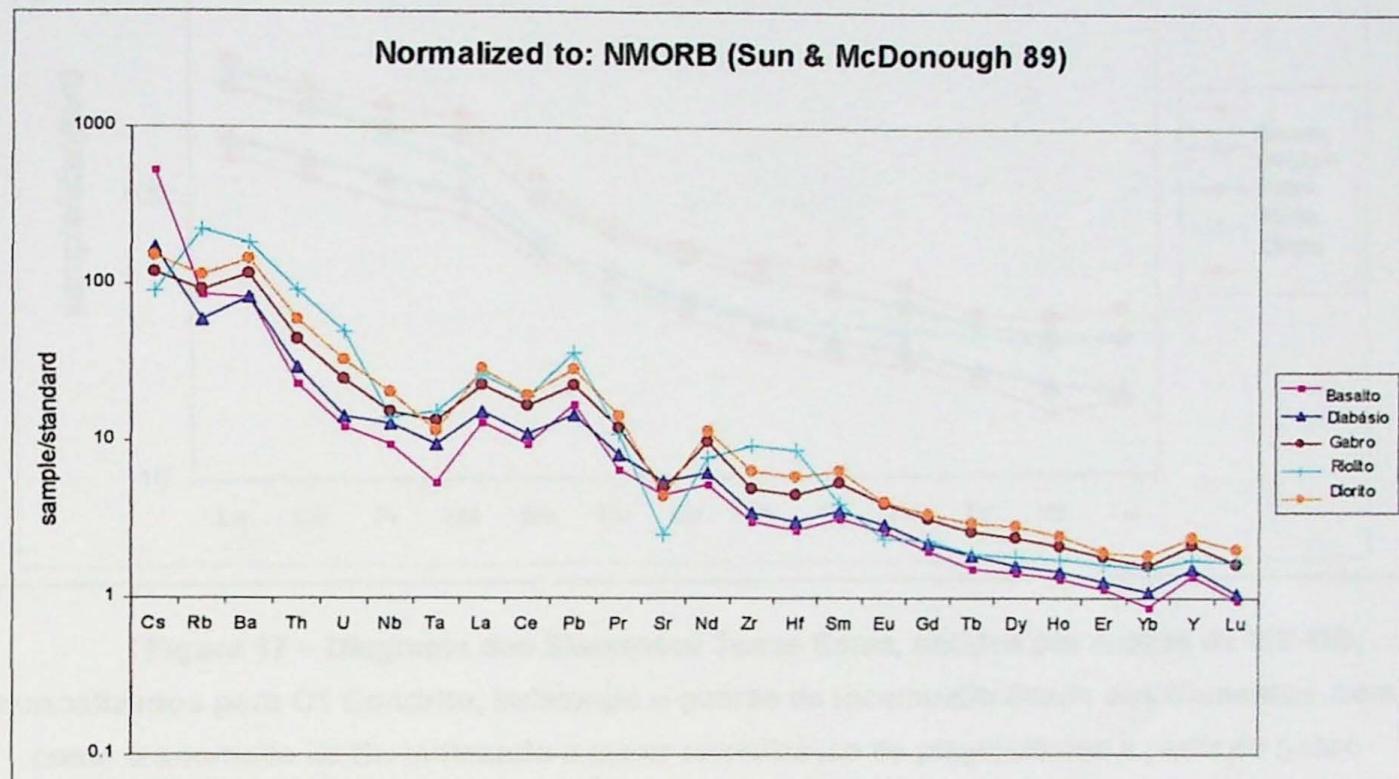
Outros elementos revelam comportamento mais complexo, como no caso do S, Zn e Nb. Todos eles mostram um máximo de teor nos dioritos, o que é mais pronunciado no caso do Nb e S. O Zn no início sofre um aumento suave no teor, atingindo logo um valor máximo, diminuindo então drasticamente o teor no riolito, comportamento semelhante ao Nb.

O elemento S tem comportamento peculiar, se mantendo em torno de 100 ppm nas amostras menos diferenciadas, sofrendo um aumento brusco para ~7000 ppm nos dioritos, e diminuição para ~1700 ppm na amostra de riolito.

Na Figura 16, estão apresentados os dados dos elementos traços para as amostras mais representativas do conjunto, normalizadas para NMORB, se utilizando não apenas dos dados de FRX, como também de dados obtidos através da análise por ICP-MS.

Como já observado anteriormente o Sr apresenta um comportamento compatível já desde o diabásio, amostra IGN75F4, o que ocorre devido ao maior fracionamento de

plagioclásio nas rochas mais diferenciadas. O Zr, Hf, U e Th são elementos que apresentam o comportamento incompatível até o final. O Nb apresenta padrão semelhante aos dos elementos terras raras, relacionados a seguir, onde apresenta comportamento compatível na passagem para o riolito, como já relatado antes. O teor anômalo de Césio (Cs) na amostra de basalto (IGN75A) provavelmente é devido a alguma contaminação, já que esse é um elemento bastante móvel.



**Figura 16 – Diagrama para os elementos traços, obtidos através de FRX e ICP-MS, observa-se o comportamento compatível já desde o diabásio (amostra IGN75F4) de Sr, devido a cristalização de plagioclásio. Bem como de Zr, Hf, U e Th que apresentam comportamento incompatível. Nb apresenta comportamento compatível no riolito (amostra IGN75G1).**

Os elementos terras raras foram normalizados pelo Condrito C1, e a forma do padrão de ETR, medido por La/Yb, nos basaltos é baixo, de aproximadamente 12%. (Figura 17). Apresentam de modo geral um comportamento incompatível para todos os litotipos. No entanto no riolito, amostra IGN75G1, observa-se um comportamento contrário ao que ocorre até os dioritos, principalmente no que diz respeito aos elementos terras raras médios, isso deve refletir principalmente o fracionamento de piroxênio.

O elemento Európio (Eu) apresenta uma anomalia, principalmente no riolito, onde sofre uma queda brusca de teor, o que ocorre devido ao grande fracionamento de plagioclásio em maior quantidade nessa rocha. Esse comportamento também é observado de forma mais sutil já no diorito (amostra IGN4.2.H) quando a linha dele toca a linha abaixo, correspondente ao gabbro (amostra IGN75I), indicando que o fracionamento de plagioclásio já gera uma pequena anomalia de Eu desde o gabbro.

Normalized to: CI chondrite (McDonough & Sun 95)

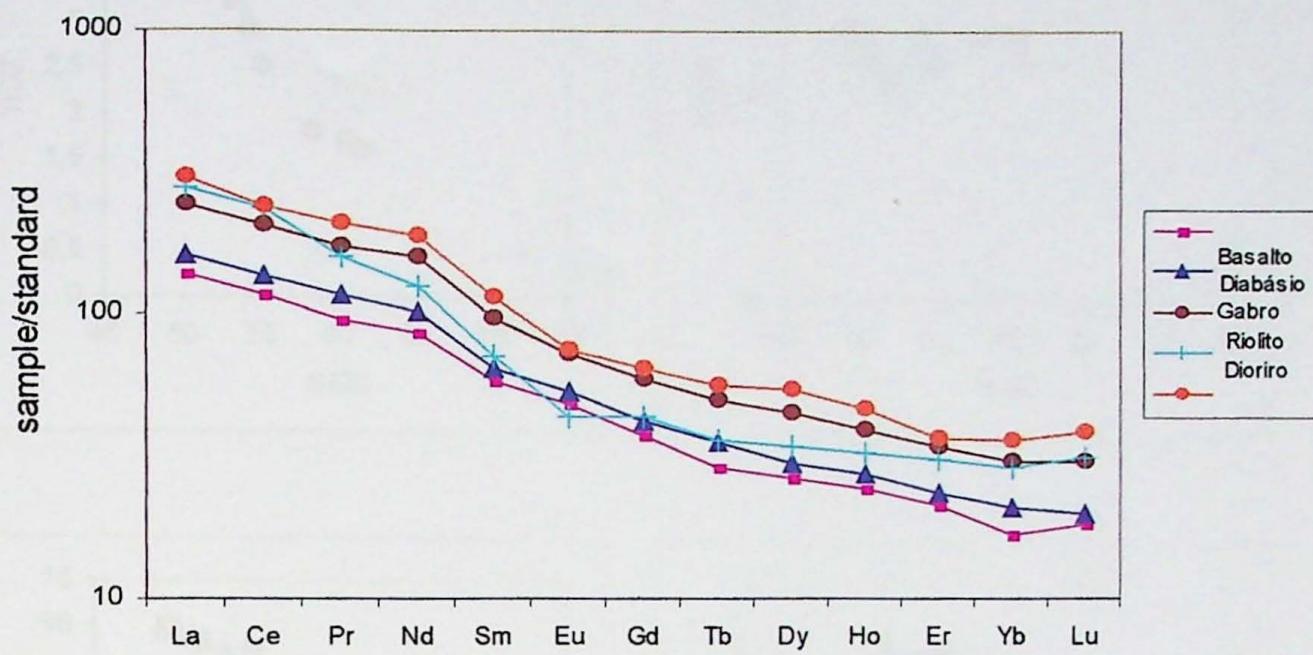
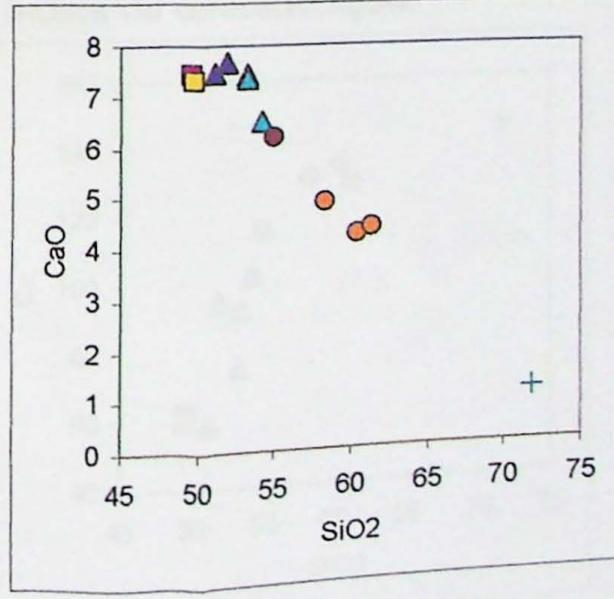
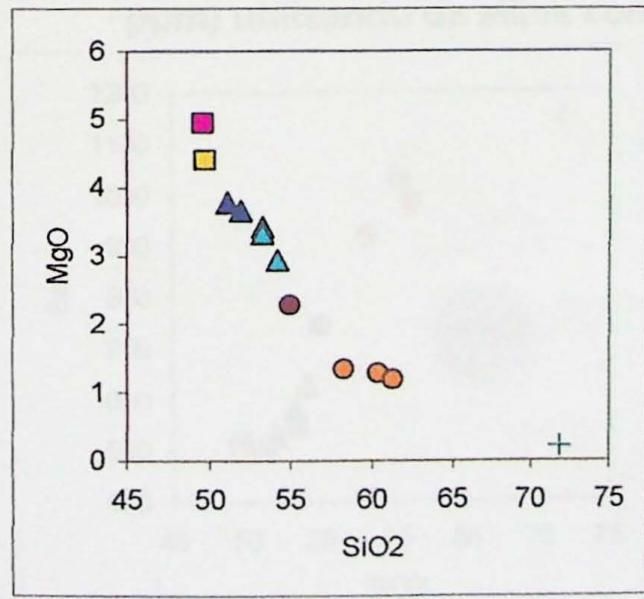
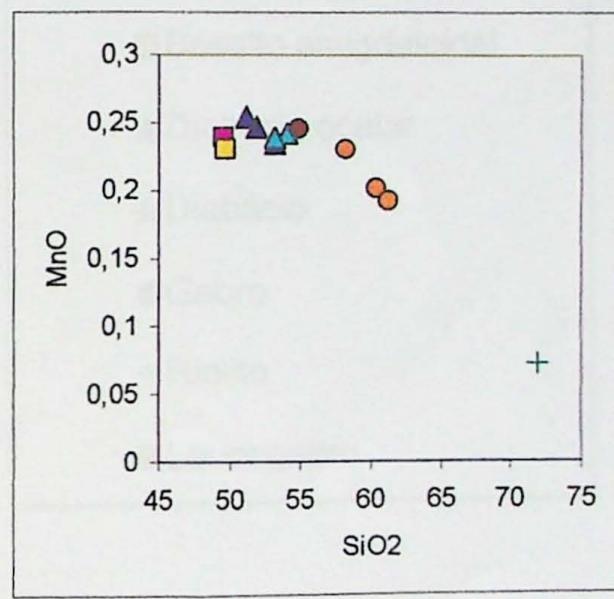
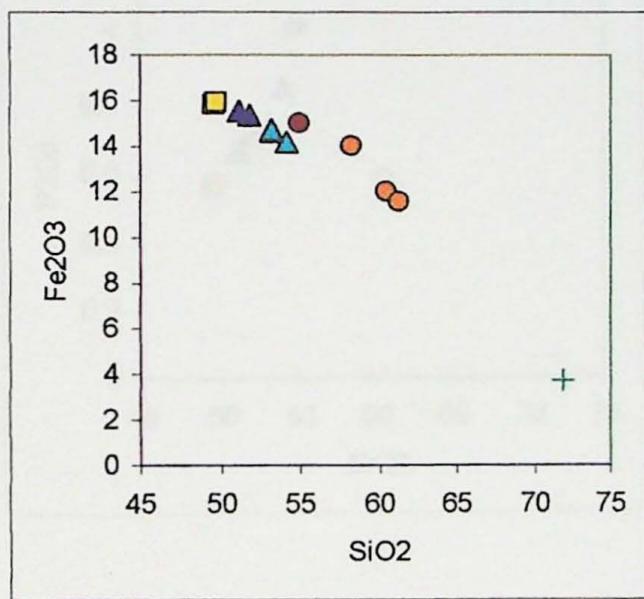
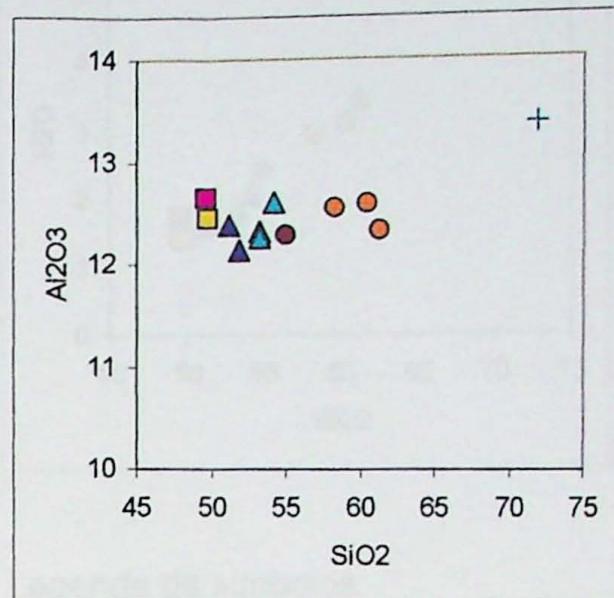
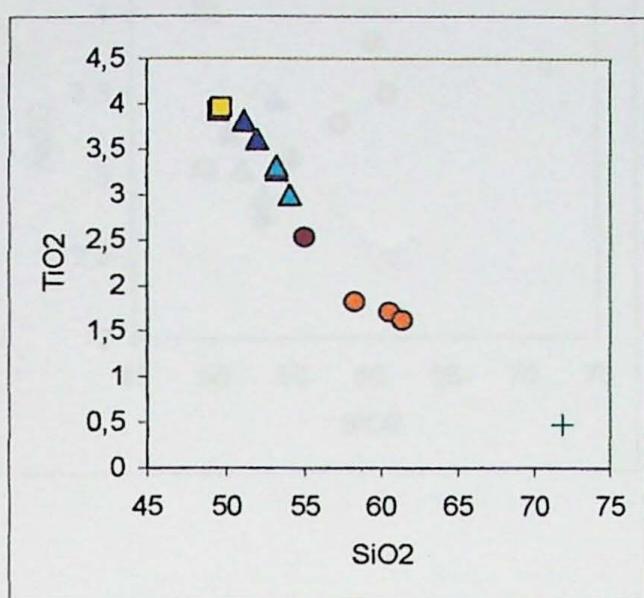
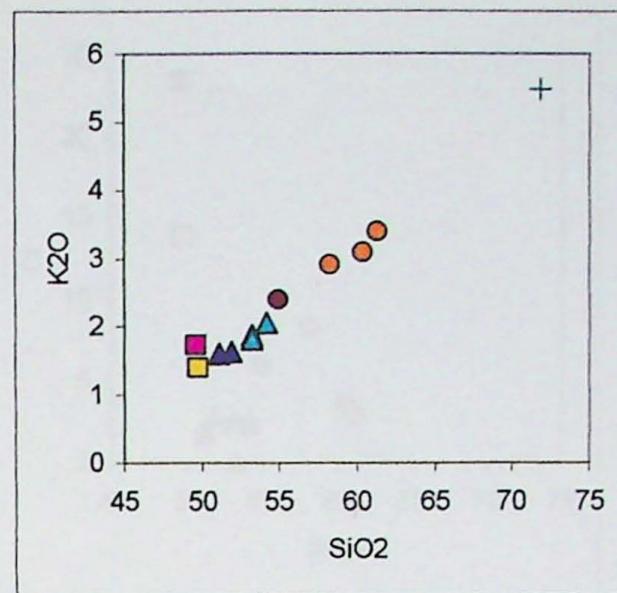
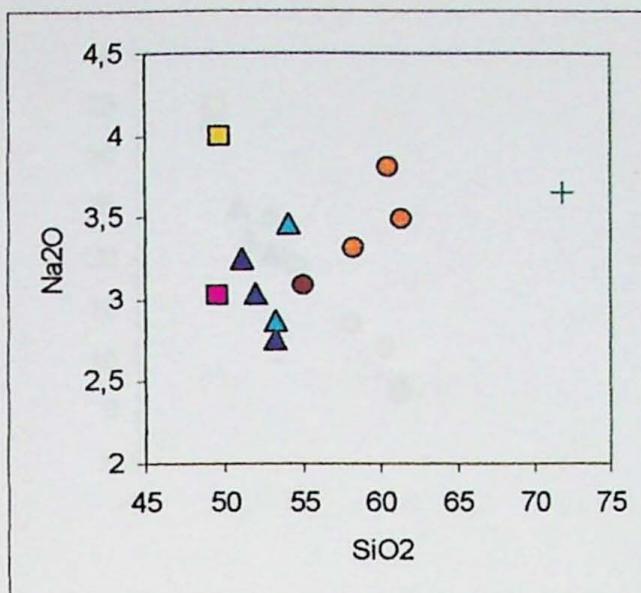


Figura 17 – Diagrama dos Elementos Terras Raras, obtidos por análise de ICP-MS, normalizados para C1 Condrito, indicando o padrão de incompatibilidade dos elementos, bem como a anomalia de Eu indicando a maior cristalização de plagioclásios a partir do gabbro (amostra IGN75I).

**Figura 18 - Diagramas de variação para os óxidos dos elementos maiores (em %) utilizando da sílica como índice de diferenciação.**





Legenda de símbolos:

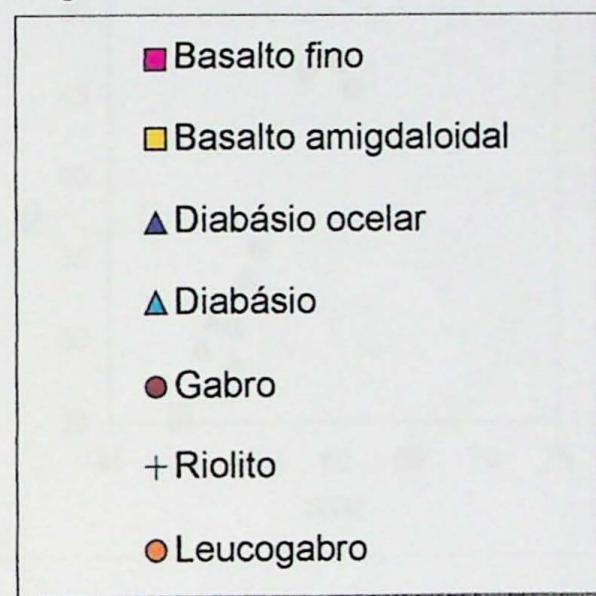
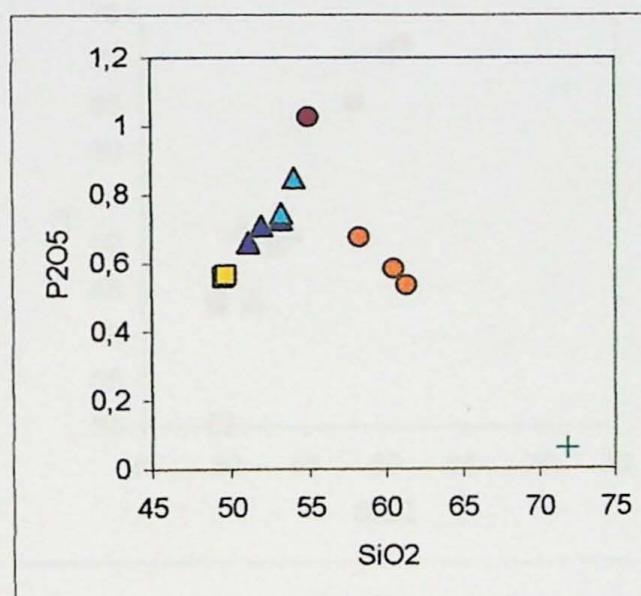
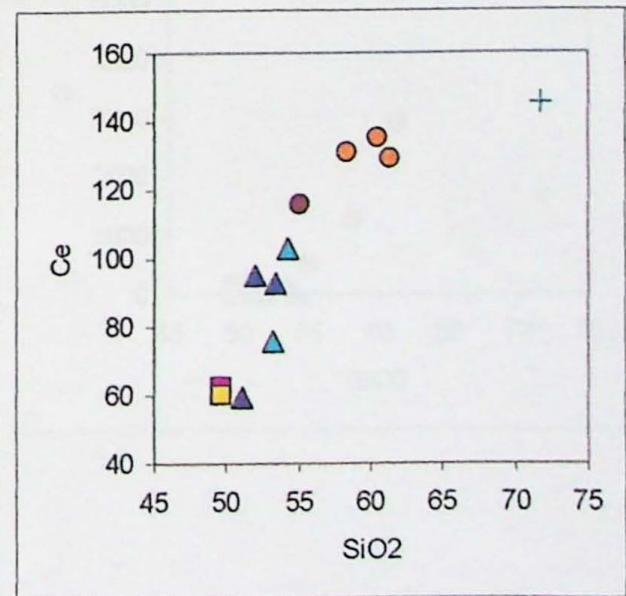
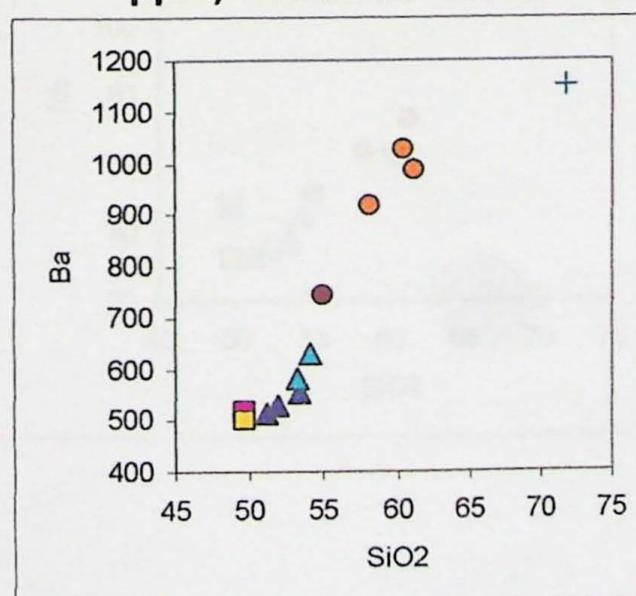
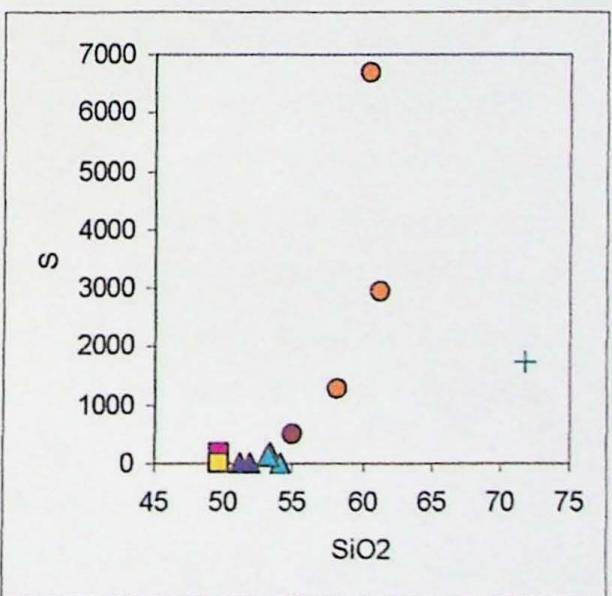
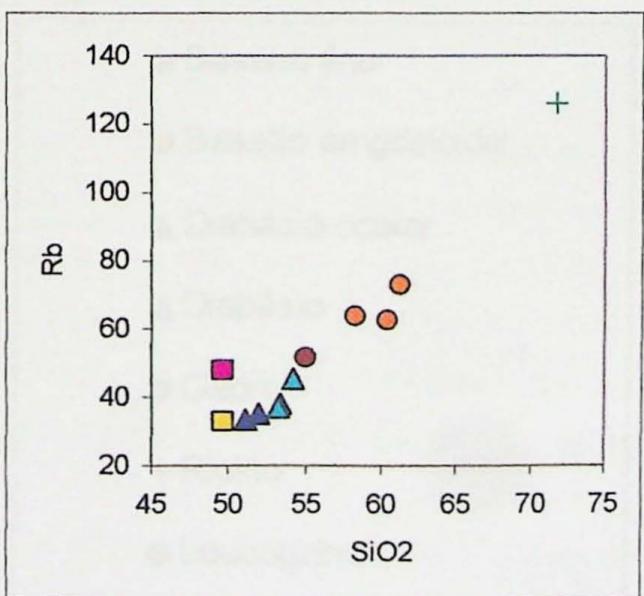
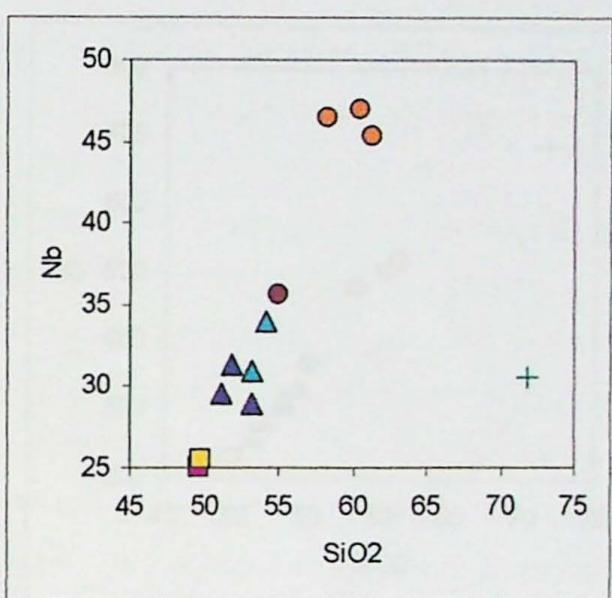
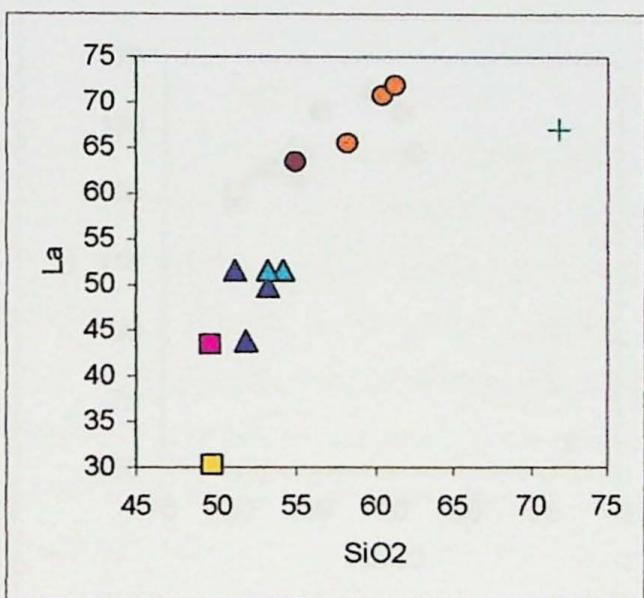
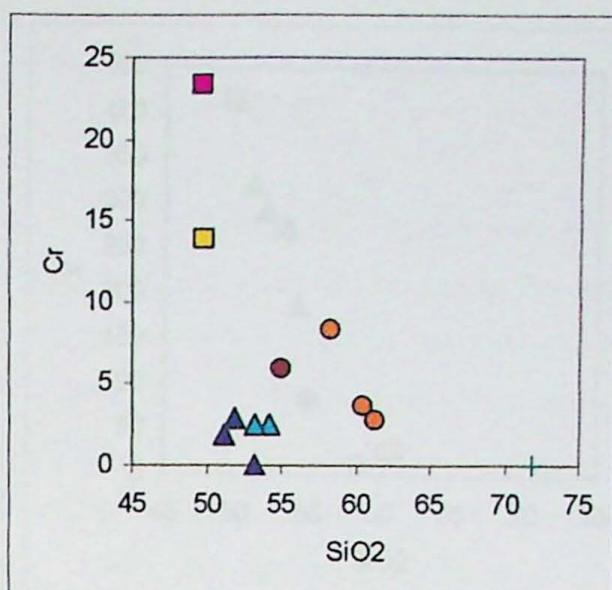
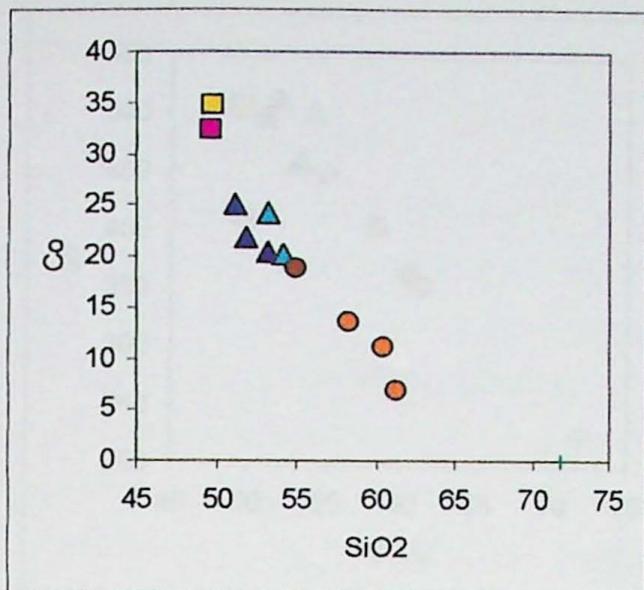
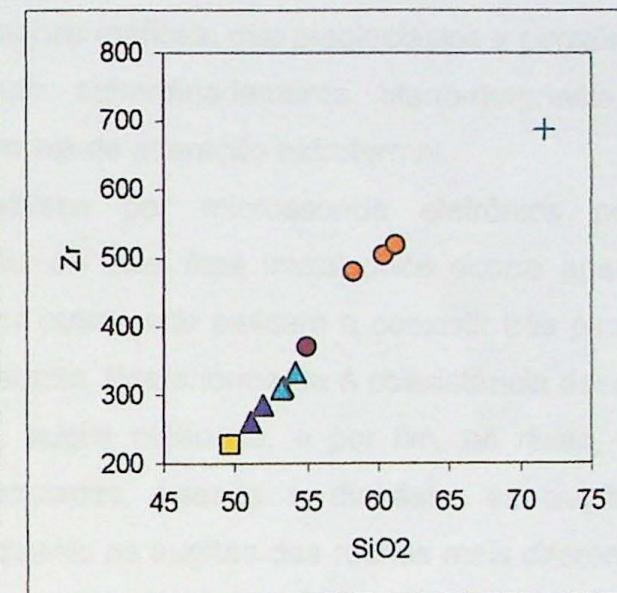
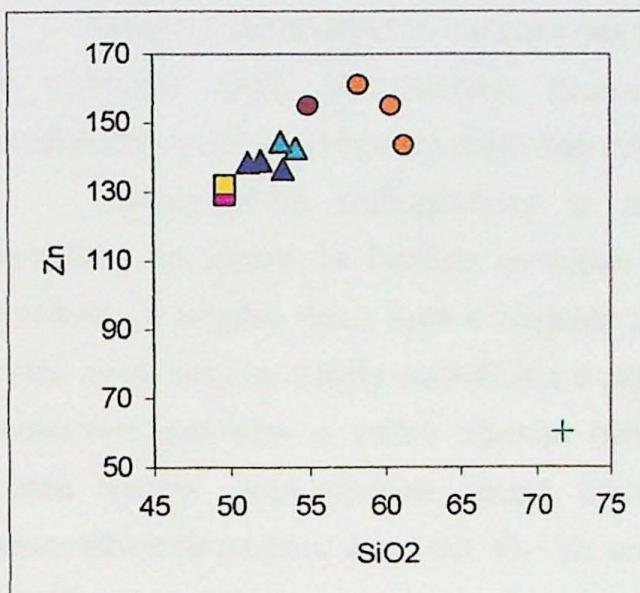
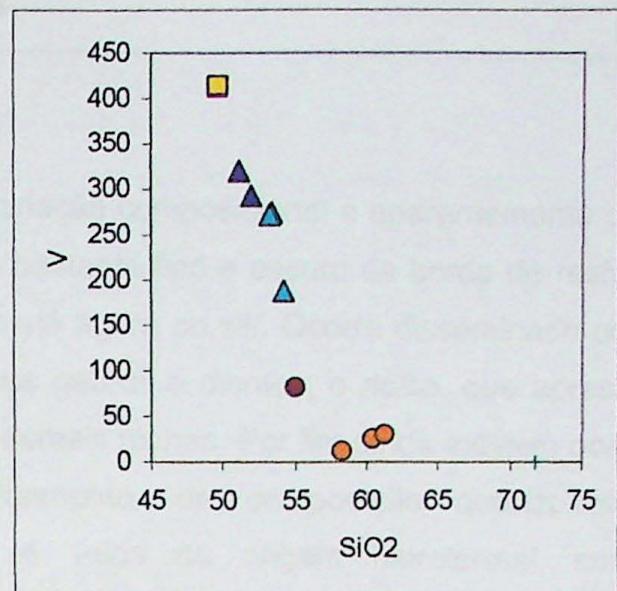
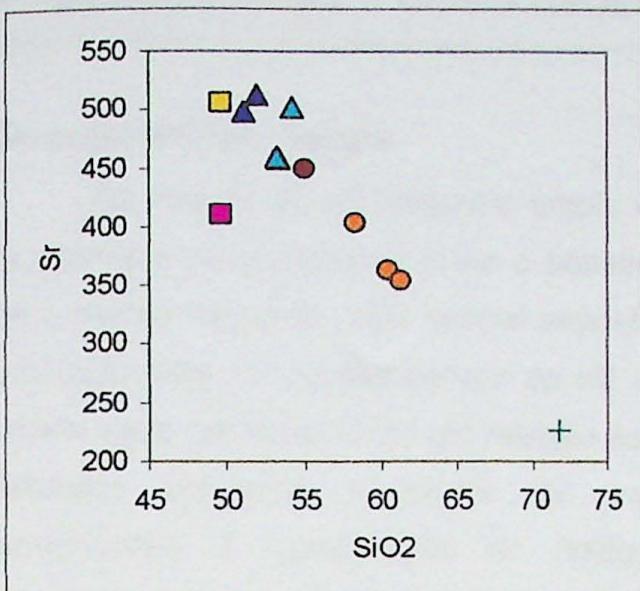


Figura 19 - Diagramas de variação para os óxidos dos elementos traço (em ppm) utilizando da sílica como índice de diferenciação.







### Legenda de símbolos:

- Basalto fino
  - Basalto amgdaloidal
  - ▲ Diabásio ocelar
  - ▲ Diabásio
  - Gabbro
  - + Riolito
  - Leucogabbro

### Características Gerais

As rochas do sill possuem ampla variação composicional e aparentemente contínua, no intervalo composicional entre o basalto bastante fino e escuro da borda de resfriamento até o diorito na parte mais central exposta até agora no sill. Ocorre disseminado por veios, principalmente na porção central do sill, nos gabros e dioritos, o riolito, que apresenta um grande salto composicional em relação às demais rochas. Por fim ainda existem ocelos, nos diabásios próximos à borda de resfriamento, de composição quartzo-feldspática semelhantes à composição do riolito, e veios de origem hidrotermal, compostos principalmente por zeólitas, apofilita e quartzo, que podem preencher porções centrais de veios de riolito e amígdalas próximas à superfície.

Dados microscópicos indicam nas rochas maficas, que plagioclásios e piroxênios são os minerais mais abundantes, ocorrendo subordinadamente titano-magnetita, ferro-hornblenda, quartzo e apatita além dos minerais de alteração hidrotermal.

Observações petrográficas e análises por microssonda eletrônica permitem identificar ao longo da história evolutiva do sill uma fase inicial onde ocorre apenas um piroxênio, a augita, essa fase é seguida por outra onde passam a coexistir três piroxênios, sendo eles: augita, augita subcálcica e pigeonita. Posteriormente à coexistência desses três piroxênios, passam a existir apenas dois, augita pigeonita, e por fim, no riolito, apenas ocorre augita. Nas rochas pouco diferenciadas, basalto e diabásio, as augitas são razoavelmente pobres em FeO,  $Fs \sim 20$ , enquanto as augitas das rochas mais diferenciadas, o diorito e o riolito, apresentam maiores teores de FeO,  $Fs \sim 40$ . Esse aumento progressivo no teor de ferro conforme a diferenciação, seguindo o "trend" do piroxênio de Skærgaard, é compatível com a seqüência normal de cristalização dos piroxênios em ambiente plutônico.

O gáboo é uma rocha de transição, e apresenta características bastante importantes para a interpretação da diferenciação magmática. É sempre essa rocha que apresenta teores intermediários e faz ligação entre os grupos menos e mais diferenciados. O gáboo é a rocha que apresenta os três piroxênios, sendo a augita o mais abundante; muitos cristais possuem o núcleo de pigeonita e bordas de augita, podendo essa ser subcálcica. Núcleos de pigeonita e bordas augíticas ocorrem também em cristais no diorito, no entanto com menor freqüência que no gáboo.

Chama a atenção que a pigeonita no núcleo de cristais só aparece no gáboo e diorito, nessa segunda rocha em menor quantidade, passando em um ponto a não cristalizar mais. Esse ponto de desaparecimento da pigeonita é conhecido como o limite do campo de dois piroxênios, que é comum em intrusões toleíticas (Gomes & Ruberti, 1979).

Nas amostras de gáboo ocorre pigeonita coexistindo com augita, na isotermia de  $T \sim 1000^{\circ}\text{C}$  (Lindsley, 1983). A pigeonita, no entanto apresenta bordas corroídas por augita

com maior teor de FeO, indicando desequilíbrio químico. O diorito também apresenta essa feição de desequilíbrio, embora não tenha sido identificada a augita de alta temperatura.

O plagioclásio mais abundante em todas as rochas, com exceção do riolito, é a andesina An50-30. No entanto, existem variações: labradorita ocorre no basalto e diabásio, e andesina sódica e oligoclásio são típicos do diorito. A rocha mais diferenciada do sill, o riolito, apresenta plagioclásios de composição albítica que coexistem com feldspato potássico. As composições dos plagioclásios dos ocelos são as mesmas dos que ocorrem em riolitos, o que é bastante sugestivo de serem originados por um mesmo processo.

Há uma grande variação composicional entre o núcleo e borda do plagioclásio em um mesmo cristal: variação essa que é normal e contínua, onde conforme as análises se aproximam da borda, ficam cada vez mais sódicas, até ~An30. Essa variação é seguida de um súbito aparecimento de sobrecrescimento de albita ou feldspato potássico nas bordas. As composições sódicas e alcalinas das bordas são semelhantes às que ocorrem no riolito.

Feldspatos alcalinos ocorrem também nos gabros e dioritos, principalmente como bordas de cristais de plagioclásio ou em intercrescimentos com quartzo em textura granofírica, que ocorre intersticialmente nessas mesmas rochas.

A química de rocha total mostra que ocorre com a diferenciação, um grande salto composicional entre o diorito e o riolito, principalmente no teor de sílica. Esse teor, que varia entre o basalto e o diorito de ~49% a ~59%, salta para ~71% no riolito. Óxidos como o  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $MgO$  e  $CaO$  apresentam tendência contínua de queda no teor, fato esperado devido a extração de plagioclásios, piroxênios e óxido de Fe-Ti.

Padrões de elementos traços indicam o mesmo que dos óxidos maiores e menores, com elementos de comportamento incompatível: Ba, Ce, Rb e Zr, e de comportamento compatível como o Sr e Co.

O Sr apresenta um comportamento compatível, refletindo o fracionamento de plagioclásio, que parece maior nas rochas mais diferenciadas. Os elementos terras raras médios, que têm coeficiente de partição elevado em piroxênios, sofrem uma queda no teor, principalmente no riolito, refletindo o fracionamento desse mineral. A anomalia de Eu indica desde o gáboro um maior fracionamento de plagioclásio, mineral no qual ele entra na estrutura, essa anomalia é ainda maior no riolito, rocha mais diferenciada.

O  $P_2O_5$  é um óxido que apresenta um padrão de comportamento incompatível até se tornar compatível no diorito; a inflexão, mostrada em diagramas de variação, reflete bem a mudança de comportamento dos elementos que ocorre entre as rochas menos e mais diferenciadas. Indicam também o salto composicional entre as rochas e o riolito, principalmente os elementos La e Nb que apresentam comportamentos semelhantes, com inflexões do diorito para o riolito, já o Zn sobre inflexão do gáboro para o diorito.

## Processos de Diferenciação Magmática

O processo de diferenciação mais comumente observado em corpos intrusivos maficos é a cristalização fracionada. No sill de Limeira, esse processo pode explicar a variação composicional desde o basalto de borda até o diorito. As evidências obtidas neste trabalho incluem as variações da geoquímica de rocha e dos minerais.

O plagioclásio, por exemplo, varia desde labradorita, no basalto e diabásio, a oligoclásio, no diorito. Os piroxênios sofrem aumento quase que contínuo no teor de ferro. O comportamento observado na química de rochas onde elementos, como por exemplo:  $TiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $Sr$  e  $Co$  são compatíveis durante a cristalização; indicam nos gráficos variações contínuas e consistentes com o fracionamento de plagioclásios, piroxênios e óxido de Fe-Ti. O padrão de elementos terras raras é também bom indicativo de que o processo de cristalização fracionada pode explicar bem as variações compostionais, ao menos até certo ponto, mais precisamente até o diorito.

Algumas feições observadas no sill de Limeira não parecem ser resultado de cristalização fracionada, e sugerem desequilíbrio químico. Em amostras de gabbro e diorito as pigeonitas estão sendo corroídas por augitas nas bordas e os plagioclásios mostram variações abruptas entre o núcleo e borda. As bordas são freqüentemente de composição albita ou feldspato alcalino e estão sempre associados com granófiros intersticiais, indicando que provavelmente há uma relação entre ambos. Ainda ocorrem no diabásio os ocelos, feições sugestivas de processos de imiscibilidade líquida.

O processo de imiscibilidade líquida, segundo Philpotts (1982) é um fenômeno mais comum do que normalmente admitido, e ocorre com freqüência em rochas de magmas toleíticos. Ocorre em estágios tardios do fracionamento, quando passam a ocorrer dois magmas de composições diferentes e imiscíveis entre si.

Esse processo pode explicar a ocorrência de ocelos, bem como a presença de granófiros intersticiais que aparentemente possuem relação de corrosão com as bordas dos plagioclásios. No entanto o que poderia ser responsável pelo salto na composição entre o diorito e o riolito?

No sill, ao menos na área exposta, não ocorre nenhum outro litotipo que possa se tornar uma ligação entre as duas rochas. O mesmo autor (Philpotts, 1982), sugere o fracionamento em magmas toleíticos pode alcançar um ponto durante em que o magma é muito rico em sílica e ferro. A partir desse ponto, ocorre a segregação do magma. Esse então se separa em dois líquidos residuais, um "rico em sílica" e ou outro "rico em ferro". Um mecanismo desse tipo poderia explicar o porquê do salto composicional entre o diorito e o riolito.

Evidências de desmistura são observadas no diorito, esse que texturalmente apresenta porções ricas em composição quartzo-feldspática, e outras em que há predomínio de minerais maficos, feição que poderia ilustrar a segregação do magma. Há ainda indícios

de que houve um aumento no teor de ferro em todas as rochas. Aparentemente após a cristalização dos piroxênios, ocorre uma substituição deles por titano-magnetita, mineral rico em ferro, além de ocorrer alteração dos mesmos também para anfibólio, no caso uma ferro-hornblenda.

O final da evolução magmática do sill de Limeira gerou os ocelos e veios de composição riolítica. Por terem composição semelhante, é possível que sua gênese esteja relacionada.

Por outro lado, uma possível origem dos ocelos é que esses sejam derivados de imiscibilidade no diabásio, rocha em que são abundantes, e não gerados a partir do riolito. Essa hipótese não pode ser de todo descartada, pois a relação entre os ocelos e o riolito é baseada em análises químicas de plagioclásio, já que a composição dos ocelos é quartzo-feldspática, ou seja, o piroxênio está ausente. Desta forma a evolução e associação dos ocelos com o riolito, é feita apenas através desse mineral, que no caso de ambos são principalmente albitas e feldspato potássico, o que pode indicar que os ocelos realmente derivaram do riolito.

Caso exista um vínculo entre veios e ocelos, é provável que os ocelos tenham sido gerados antes aos veios. Nesse caso, eles poderiam ter ascendido como "gotas" em um magma ainda não cristalizado, até o encontro da borda resfriada, hipótese levantada em trabalhos de campo pelo Prof. Silvio Vlach. Já o material que preenche os veios poderia corresponder à geração de riolito posterior à consolidação do magma na parte superior da câmara, e por isso corta as rochas presentes na porção central do sill, o gábrico e diorito.

Aparentemente ocorre pelas rochas do sill, o que pode ser uma alteração pervasiva, ou seja, esse líquido parece penetrar localmente nas rochas ao seu redor, feição essa sugerida por petrografia, aonde o veio de riolito aparenta reagir com a rocha gábróide. Esse tipo de reação é sugerido pelas características ópticas e químicas dos piroxênios e também dos plagioclásios que indicam desequilíbrio, como as bordas sobrecrecidas por albita e feldspato potássico associados aos intercrescimentos de feldspato alcalino e/ou albita com quartzo.

Posterior à geração dos veios riolíticos e ocelos ocorre um processo de alteração hidrotermal, que preenche núcleos de veios tardios de riolito e amígdalas no basalto. Alguns ocelos apresentam preenchimento por minerais hidrotermais, assim como a parte central de veios, indicando que o processo hidrotermal, pode ter ocorrido logo após ou até mesmo concomitantemente à cristalização dos riolitos.

## 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Alves F.R., Janasi V.A., Ruberti E., Rojas G.E. 2002. Processos de fracionamento magmático “in situ” em sill de diabásio na região de Campinas-Jaguariúna (SP). *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 41, 2002, João Pessoa (PB). Anais... João Pessoa: Sociedade Brasileira de Geologia, 2002, p.586.*
- Bellieni G., Comin-Chiaromonti P., Marques L.S., Melfi A.J., Nardy A.J.R., Papatrechas C., Piccirillo E.M., Roisenberg A., Stolfa D., 1986. Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná Plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationships. *Journal of Petrology, 27(4): 915-944.*
- Brown G.M. 1957. Pyroxenes from the early and middle stages of fractionation of the Skaergaard Intrusion, east Greenland. *Mineralogical Magazine, 31: 511-543.*
- Brown G.M., Vincent, A. E. 1963. Pyroxenes from later stages of fractionation of the Skaergaard Intrusion, east Greenland. *Journal of Petrology, 4: 175-197.*
- Carvalho S.G., Nardy A.J.R., Oliveira de M.A.F., Soares P.C., Zanardo A., Antônio M.C. 1988. Aspectos geológicos e litoquímicos dos sills Borda de Mata e Limeira Cosmópolis (SP): Resultados preliminares. *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35, 1988, Belém (PA). Anais... Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988, v.3. p.1281.*
- Comin-Chiaromonti P., Belliene G., Piccirillo E.M., Melfi A.J., 1988. Classification and petrography of continental stratoid volcanics and related intrusives from the Paraná Basin (Brasil). *In: Piccirillo E.M., Melfi A.J. (eds) The mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects. São Paulo: USP- IAG, 1988. cap.3, p.47-72.*
- Comin-Chiaromonti P., Cundari A., Piccirillo E.M., Gomes C.B., Castorina F., Censi P., de Mim A., Marzoli A., Speziale S., Velázquez V.F., 1997. Potassic and sodic igneous rocks from Eastern Paraguay: their origin from the lithospheric mantle and genetic relationshios with associated Paraná flood tholeiites. *Journal of Petrology, 38(4):495-528.*
- Cordani U.G.; Vandoros, 1967. Basaltic rocks of the Paraná basin. *Problems in Brazilian Gondwana Geology, Paraná, pp.207-223.*

Cox K.J., Bell J.D., Pankhurst R.J., 1979. *The interpretation of igneous rocks*. Allen and Unwin, London, 450 p.

Dantas F.A., Janasi V.A., Ruberti E.. Rochas Vulcânicas Ácidas cretáceas da Bacia do Paraná, região de Pirajú-Ourinhos (SP): petrografia, química mineral e química de rochas. In: Simpósio de Geologia do Sudeste, 8, 2003, São Pedro (SP). Boletim de Resumos... São Pedro: Sociedade Brasileira de Geologia, 2003, p. 70.

Ernesto M.; Raposo M.I.; Marques L.S.; Renne P.R.; Diogo L.A.; de Mim A., 1999. Paleomagnetism, geochemistry and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the North-eastern Paraná Magmatic Province: tectonic implications. *Journal of Geodynamics*, **28**: 321-340.

Ewart A., Milner S.C., Armstrong R.A., Duncan A.R., 1998. Etendeka volcanism of the Gogoboseb Mountains and Messum Igneous Complex, Namibia. Part I: geochemical evidence of Early Cretaceous Tristan plume melts and the role of crustal contamination in the Paraná-Etendeka CFB. *Journal of Petrology*, **39**(2): 191-225.

Garland F., Hawkesworth C.J., Mantovani M.S.M. 1995. Description and petrogenesis of the Paraná rhyolites, southern Brazil. *Journal of Petrology*, **36** (5): 1193-1227.

Gibson S.A., Thompson R.N., Leonardos O.H., Dickin A..P., Mitchell J.G., 1999. The limited extent of plume-lithosphere interactions during continental flood-basalt genesis: geochemical evidence from Cretaceous magmatism in southern Brazil. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **137**:147-169.

Gomes C.B., Ruberti, E. 1979. Mineralogia do Dique de Toninhas, Ubatuba, litoral norte do estado de São Paulo: piroxênios. *Boletim Mineralógico*, Recife **6**: 55-66.

Gomes C.B., Berenholc M. 1980. Some geochemical features of the Toninhas Dike, Ubatuba, State of São Paulo, Brazil. *An. Acad. Brasil. Ciênc.*, **52**(2): 339-346.

Kirstein L.A., Peate D.W., Hawkesworth C.J., Turner S.P., Harris C., Mantovani S. M. 2000. Early Cretaceous basaltic and rhyolitic magmatism in Southern Uruguay associated with the opening of the South Atlantic. *Journal of Petrology*, **41**(9): 1413-1438.

Lindsley D., 1983. Pyroxene thermometry. *American Mineralogist*, **68**:477-493.

Luchetti A.C.F., Machado F.B., Nardy A.J.R, Squisato E., Oliveira M.A.F., 2005, Litoestratigrafia e litogeoquímica das rochas vulcânicas ácidas associadas ao vulcanismo Serra Geral. *III Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados*, Cabo Frio, RJ.

Marques L.S., Ernesto M., 2004. O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. In: *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, Manteso-Neto et al. (org.), São Paulo, Beca, 647 p.

Milani E.J., 2004. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, Manteso-Neto et al. (org.), São Paulo, Beca, 647 p.

Monteiro R.L. 1986. *Aspectos geológicos, mineralógicos, petrológicos e geoquímicos de um corpo basáltico localizado no Município de Tanquinho, SP*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, USP, 158p.

Nardy A.J.R. 1988. *Geologia e paleomagnetismo das rochas vulcânicas na região centro-sul do estado do Paraná: Formação Serra Geral*. Dissertação de Mestrado, Instituto Astronômico e Geofísico, USP, 186 pp.

Nardy A.J.R., Oliveira M.A.F, Betancourt R.H.S., Verdugo D.R.H., Machado F.B. 2002. Geologia e estratigrafia da Formação Serra Geral. SP, Unesp, Geociências, 21 n.1/2: 15-32.

Nardy A.J.R, Machado F.B., Oliveira M.A.F., Melo R.P., Vigário H.P., Luchetti A.C.F. 2003. Geologia e aspectos petrográficos preliminares das rochas intrusivas mesozóicas da borda leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo. In: Simpósio de Geologia do Sudeste, 8, 2003, São Pedro (SP). *Boletim de Resumos... São Pedro: Sociedade Brasileira de Geologia*, 2003, p. 66.

Oliveira E.P., Sato L., Gomes L.C.C., Martins G. Large scale magmatic banding in mesozoic basic sill of the Paraná Basin, Campinas, São Paulo State, Brazil. *Boletim IG-USP, Série Científica*, 29:220.

Peate D.W., Hawkesworth J.C., Mantovani M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magmas types and their spatial distribution. *Bull. Volcanol.* 55:119-139.

Peate D.W., Hawkesworth J.C., Mantovani M.S.M., Rogers N.W., Turner S.P., 1999. Petrogenesis and stratigraphy of the high-Ti/Y Urubici magma type in the Paraná flood basalt province and implications for the nature of 'Dupal'-type mantle in the South Atlantic region. *Journal of Petrology*. 40:451-473.

Philpotts A.R. 1982. Compositions of Immiscible Liquids in Volcanic Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80:201-218.

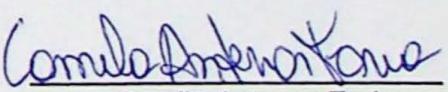
Philpotts A.R., 1990. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology*. 3ed, New Jersey, Prentice Hall. 498p.

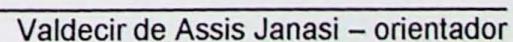
Raposo M.I.B. 1987. *Evolução magmática e petrológica das rochas vulcânicas ácidas mesozóicas da região de Piraju-Ourinhos (SP e PR)*. Dissertação de Mestrado. Instituto Astronômico e Geofísico, USP, 159 pp.

Secco L., Carbonin S., Dal Negro A., Mellini M., Piccirillo E.M., 1988. Crystal chemistry of pyroxenes from basalts and rhyodacites of the Paraná Basin (Brazil). In: Piccirillo E.M., Melfi A.J. (eds) *The mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo: USP- IAG, 1988. cap.4, p.93-106.

Stewart K.; Turner S.; Kelley S.; Hawkesworth C.; Kirstein L.; Mantovani M., 1996. 3-D,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology in the Paraná continental flood basalt province. *Earth and Planetary Science Letters*, 143: 95-109.

Wernick E.; Landim P.M.B., 1966. Nota sobre um diabásio amigdaloidal em Rio Claro (SP). *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 15: 61-66.

  
Camila Antenor Faria  
De acordo,

  
Valdecir de Assis Janasi – orientador



**Figura 4 – Fotografias de campo de rochas do sill de Limeira**



**A**



**B**



**C**



**D**



**E**



**F**



**G**



**H**

#### **Legenda Figura 4:**

**Figura 4A** – Vista geral da cava da Pedreira Cavinatto, local de exposição do sill alvo da pesquisa e de coletas de amostras. Limeira, SP.

**Figura 4B** – Diabásio de textura fanerítica fina-média, estrutura maciça, de cor acinzentada, apresentando porções ricas em composição quartzo-feldspática em textura ocelar, amostra IGN4.2.B.

**Figura 4C** – Diabásio de textura fanerítica fina-média, estrutura maciça, de cor acinzentada, apresentando porções ricas em composição quartzo-feldspática em textura ocelar, amostra IGN75F4.

**Figura 4D** – Gabro de textura fanerítica grossa, estrutura maciça, de cor acinzentada, cortado por veio centimétrico de riolito de textura fanerítica fina, de estrutura maciça e cor cinza claro.

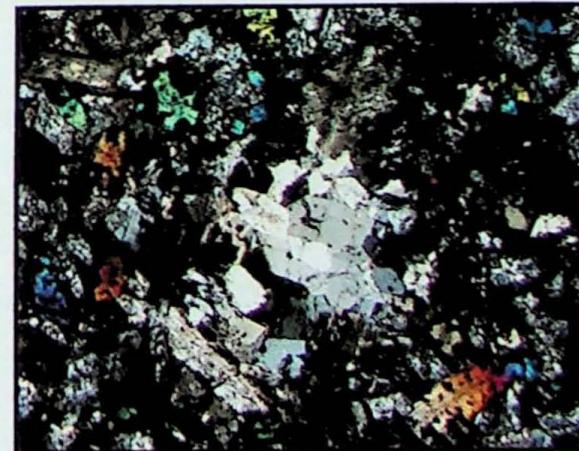
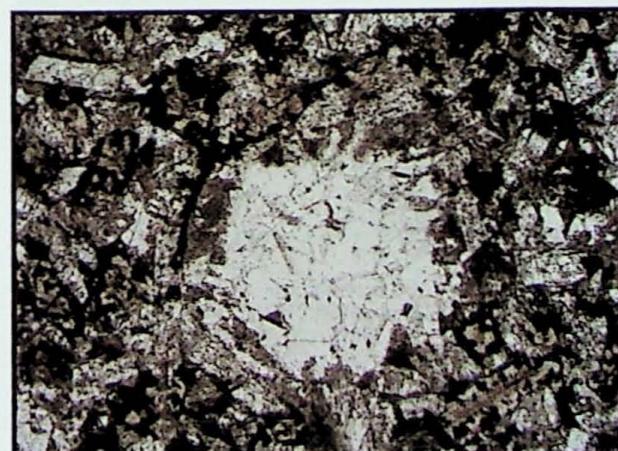
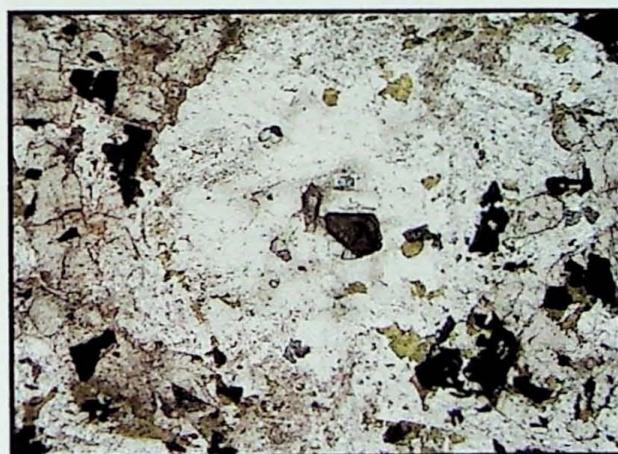
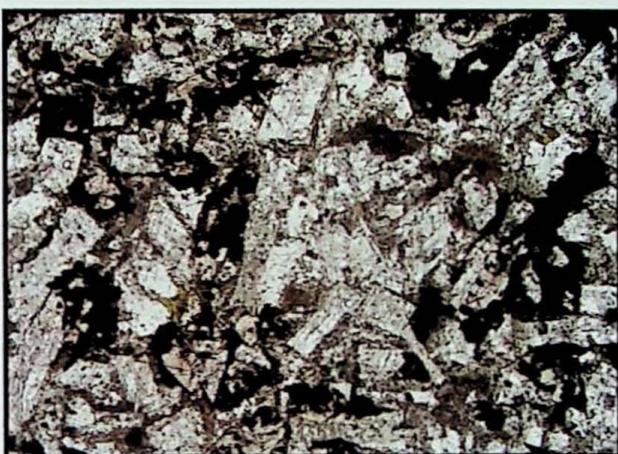
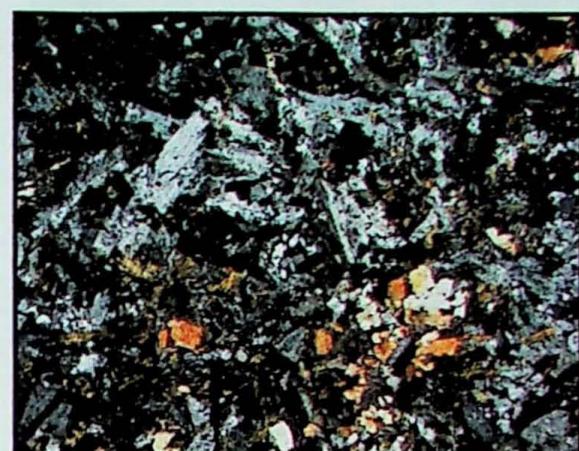
**Figura 4E** – Diorito de textura fanerítica muito grossa, estrutura maciça, cor cinza, apresentando cristais de piroxênio em padrão semelhante a “grades”, amostra IGN4.2.H.

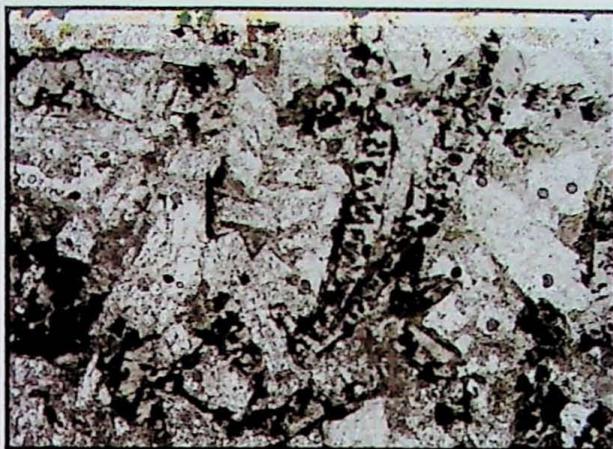
**Figura 4F** – Diabásio de textura fanerítica fina-média, estrutura maciça, de cor acinzentada, cortada por veio decimétrico de riolito de textura fanerítica fina, de estrutura maciça e cor cinza claro.

**Figura 4G** – Diorito de textura fanerítica muito grossa, estrutura maciça, cor cinza, apresentando cristais de piroxênio em padrão semelhante a “grades”, cortado por veio fino (centimétrico) de riolito de textura fanerítica fina, de estrutura maciça e cor cinza claro, amostra IGN4.2.M.

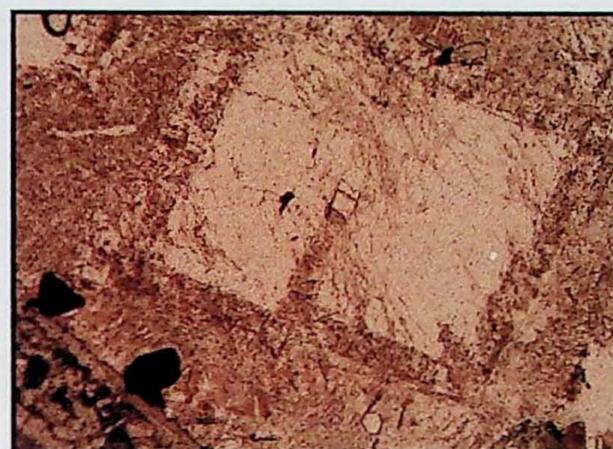
**Figura 4H** – Diorito de textura fanerítica muito grossa, estrutura maciça, cor cinza, apresentando cristais de piroxênio em padrão semelhante a “grades”, cortado por veio fino (centimétrico) de riolito de textura fanerítica fina, de estrutura maciça e cor cinza claro.

**Figura 5 – Fotomicrografias de lâminas de rochas do sill de Limeira**

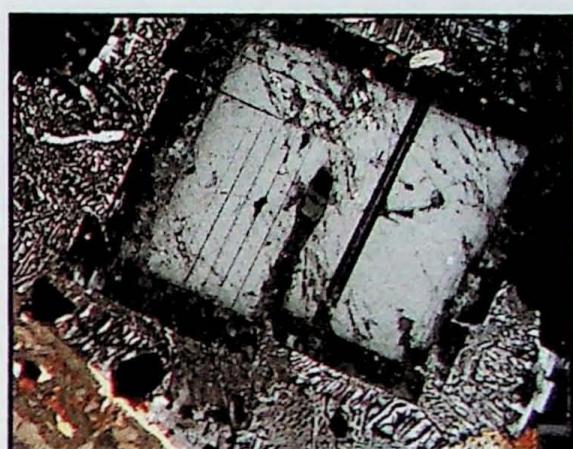




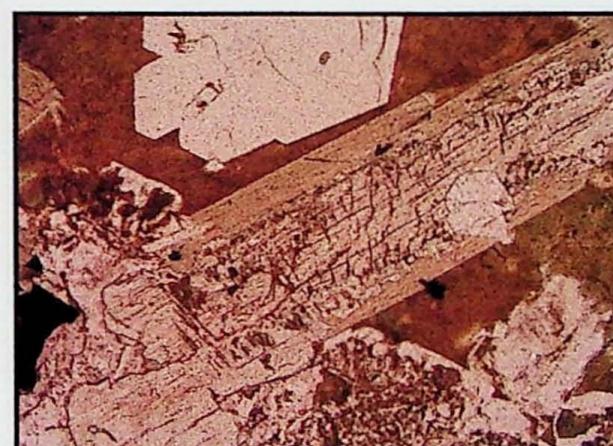
J



K



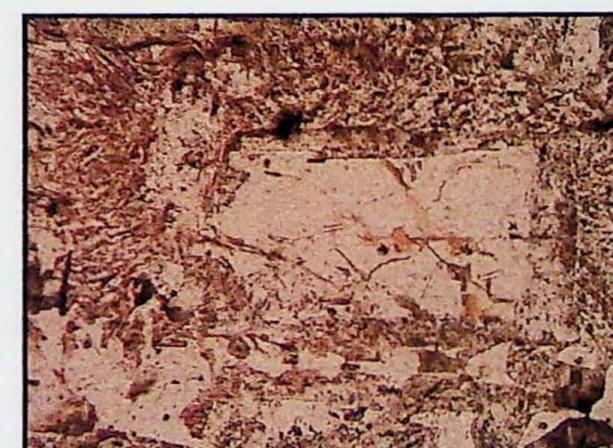
L



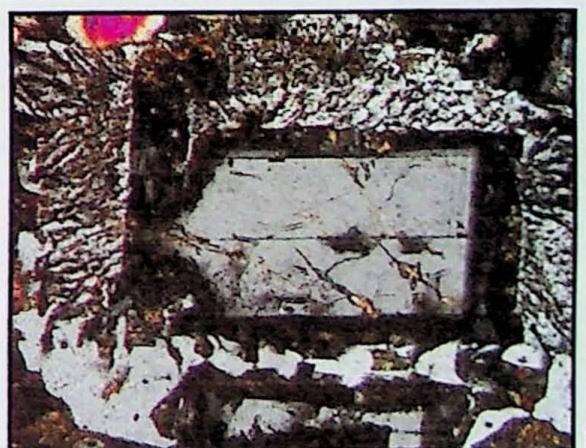
M



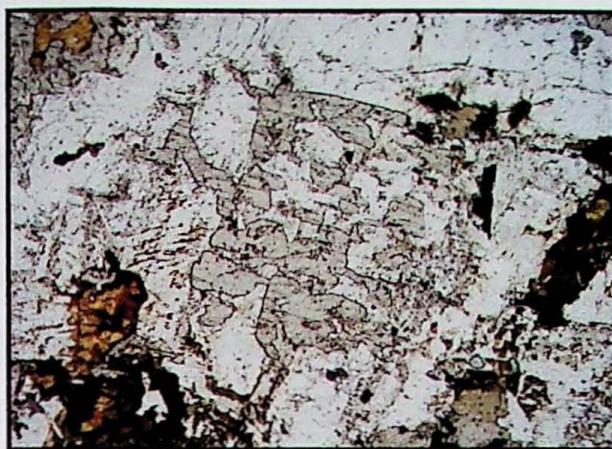
N



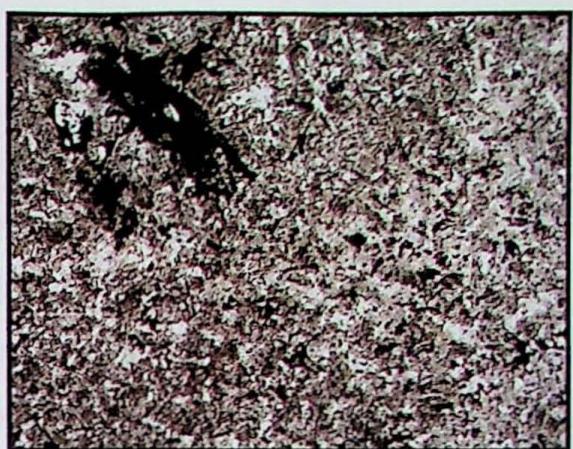
O



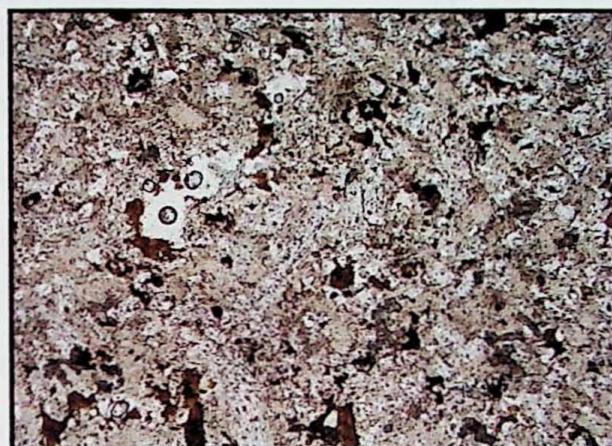
P



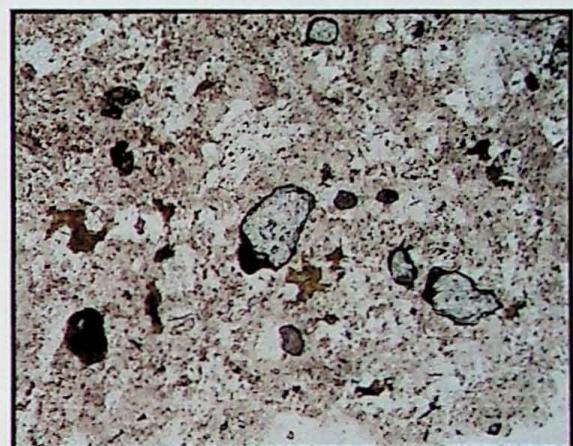
Q



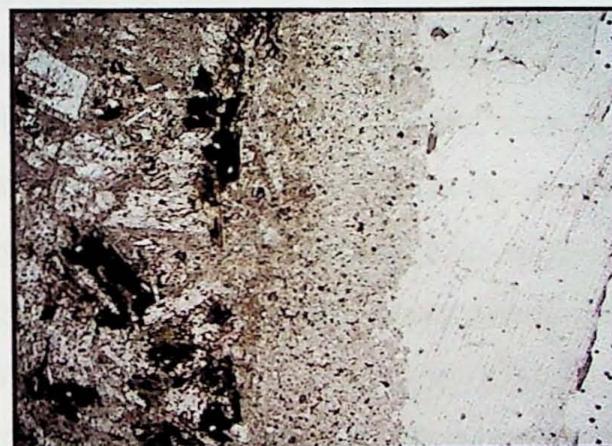
R



S



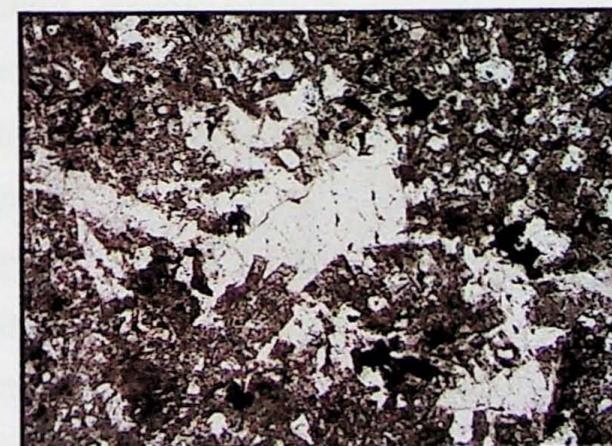
T



U



V



X



Z

## Legenda Figura 5:

**Figura 5A** – Ocelo de composição quartzo-feldspática, com borda rica em minerais opacos, em diabásio de granulação fina-média, textura intergranular às vezes sub-ofítica. Polarizador inferior, amostra IGN75F4. Tamanho do lado maior 10,2  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5B** – Ocelo de composição quartzo-feldspática, com borda rica em minerais opacos, em diabásio de granulação fina-média, textura intergranular às vezes sub-ofítica. Observa-se com os polarizadores cruzados a presença de piroxênio (augita, birrefringência amarelo-laranja) no diabásio e sua ausência no ocelo Polarizadores cruzados, amostra IGN75F4. Tamanho do lado maior 10,2  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5C** – Ocelo discreto, identificável pela ausência de minerais maficos, em diabásio de granulação fina-média, textura intergranular às vezes sub-ofítica. Polarizador inferior, amostra IGN4.2.Z. Tamanho do lado maior 5,1  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5D** – Ocelo discreto, identificável pela ausência de minerais maficos, em diabásio de granulação fina-média, textura intergranular às vezes sub-ofítica. Polarizador inferior, amostra IGN4.2.Z. Tamanho do lado maior 6,4  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5E** – Diabásio de granulação fina-média, textura intergranular às vezes sub-ofítica, com amígdala preenchida por zeólicas e quartzo. Polarizadores paralelos, amostra IGN75F4. Tamanho do lado maior 3,2  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5F** – Diabásio de granulação fina-média, textura intergranular às vezes sub-ofítica, com amígdala preenchida por zeólicas e quartzo. Polarizadores cruzados, amostra IGN75F4. Tamanho do lado maior 3,2  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5G** – Diabásio de granulação média, textura intergranular às vezes sub-ofítica, apresentando amígdala preenchida por zeólicas e quartzo. Na borda da amígdala ocorre uma composição quartzo-feldspática aparentemente delimitada por minerais opacos. Polarizador inferior, amostra IGN4.2.Z. Tamanho do lado maior 6,4  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5H** – Diabásio de granulação média, textura intergranular às vezes sub-ofítica, apresentando amígdala preenchida por zeólicas e quartzo. Na borda da amígdala ocorre uma composição quartzo-feldspática aparentemente delimitada por minerais opacos, é possível distinguir a ausência de piroxênios (augita) na borda da amígdala. Polarizadores cruzados, amostra IGN4.2.Z. Tamanho do lado maior 6,4  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5I** – Diabásio de granulação média, textura intergranular às vezes sub-ofítica, apresentando cristais de piroxênio (augita) curvados e bastante alterados para

minerais opacos. Polarizador inferior, amostra IGN4.2.Z. Tamanho do lado maior 5,1  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5J** – Diabásio de granulação média, textura intergranular às vezes subofítica, apresentando cristais de piroxênio (augita) curvados e bastante alterados para minerais opacos. Polarizadores cruzados, amostra IGN4.2.Z. Tamanho do lado maior 5,1  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5K** – Cristal de plagioclásio euédrico, com bordas de feldspato alcalino e granófiros intersticiais em gábro de granulação grossa, textura intergranular às vezes subofítica. Polarizador inferior, amostra IGN75I. Tamanho do lado maior 2,00  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5L** – Cristal de plagioclásio euédrico, com bordas de feldspato alcalino e granófiros intersticiais em gábro de granulação grossa, textura intergranular às vezes subofítica. Polarizadores cruzados, amostra IGN75I. Tamanho do lado maior 2,00  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5M** – Cristal com núcleo de pigeonita e borda de augita, com alteração nas bordas para anfibólito e filossilicato de cor marrom, em gábro de granulação grossa, textura intergranular às vezes subofítica. Polarizador inferior, amostra IGN75I. Tamanho do lado maior 1,3  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5N** – Cristal com núcleo de pigeonita e borda de augita, com alteração nas bordas para anfibólito e filossilicato de cor marrom, em gábro de granulação grossa, textura intergranular às vezes subofítica. Polarizadores cruzados, amostra IGN75I. Tamanho do lado maior 1,3  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5O** – Cristal de plagioclásio fraturado, com bordas de feldspato alcalino e granófiros intersticiais em diorito de granulação muito grossa, textura intergranular às vezes subofítica. Polarizador inferior, amostra IGN4.2.H. Tamanho do lado maior 0,65  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5P** – Cristal de plagioclásio fraturado, com bordas de feldspato alcalino e granófiros intersticiais em diorito de granulação muito grossa, textura intergranular às vezes subofítica. Polarizadores cruzados, amostra IGN4.2.H. Tamanho do lado maior 0,65  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5Q** – Cristais anédricos de piroxênio (augita) intercrescidos com plagioclásio (An~40) em diorito de granulação muito grossa, textura intergranular às vezes subofítica. Polarizador inferior, amostra IGN4.2.H. Tamanho do lado maior 3,2  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5R** – Riolito de granulação fina, textura granular hipidiomórfica. Polarizador inferior, amostra IGN75G1. Tamanho do lado maior 1,04  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5S** – Riolito de granulação fina, textura granular hipidiomórfica, com cristais albitas (An~2) de núcleos incolores e límpidos, com bordas turvas de feldspato alcalino. Polarizador inferior, amostra IGN75G1. Tamanho do lado maior 3,2  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5T** – Riolito de granulação fina, textura granular hipidiomórfica, onde se observa o crescimento de cristais de apatita precoce, indicando no riolito a compatibilidade de P. Polarizador inferior, amostra IGN75G1. Tamanho do lado maior 1,62  $\mu\text{m}$ .

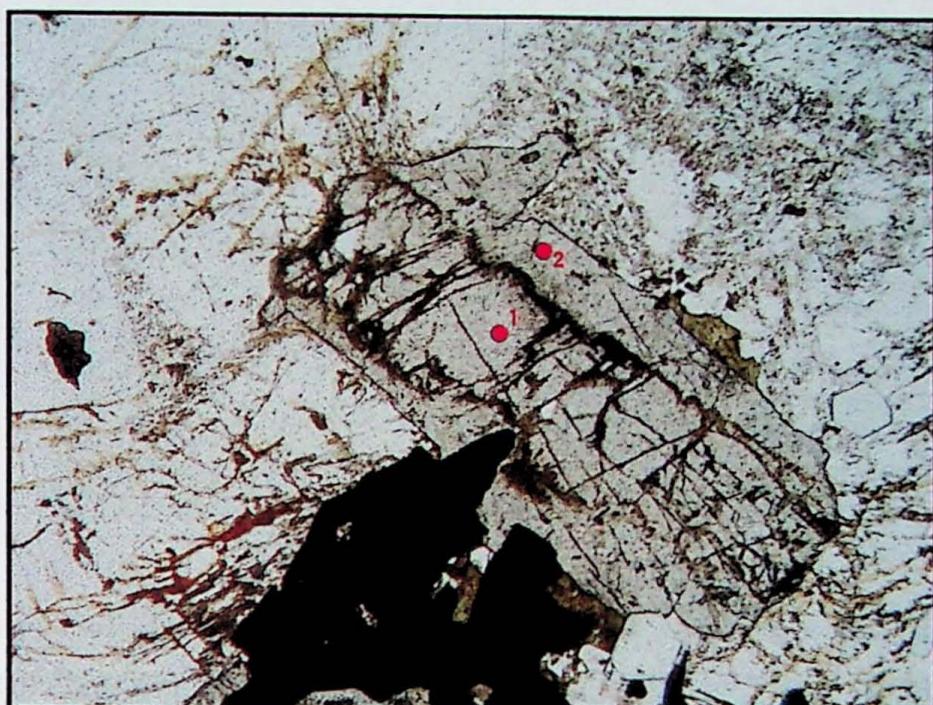
**Figura 5U** – Diorito de granulação muito grossa, textura intergranular às vezes subofítica, com veio hidrotermal de apofilita em veio riolítico no gábrico. Polarizador inferior. Tamanho do lado maior 10,48  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5V** – Veio hidrotermal de apofilita em veio riolítico no gábrico. Polarizadores cruzados. Tamanho do lado maior 10,48  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5X** – Veio hidrotermal preenchido por apofilita e quartzo no diorito. Polarizador inferior, amostra 4.2.M. Tamanho do lado maior 5,24  $\mu\text{m}$ .

**Figura 5Z** – Veio hidrotermal preenchido por apofilita e quartzo no diorito. Polarizadores cruzados, amostra 4.2.M. Tamanho do lado maior 5,24  $\mu\text{m}$ .

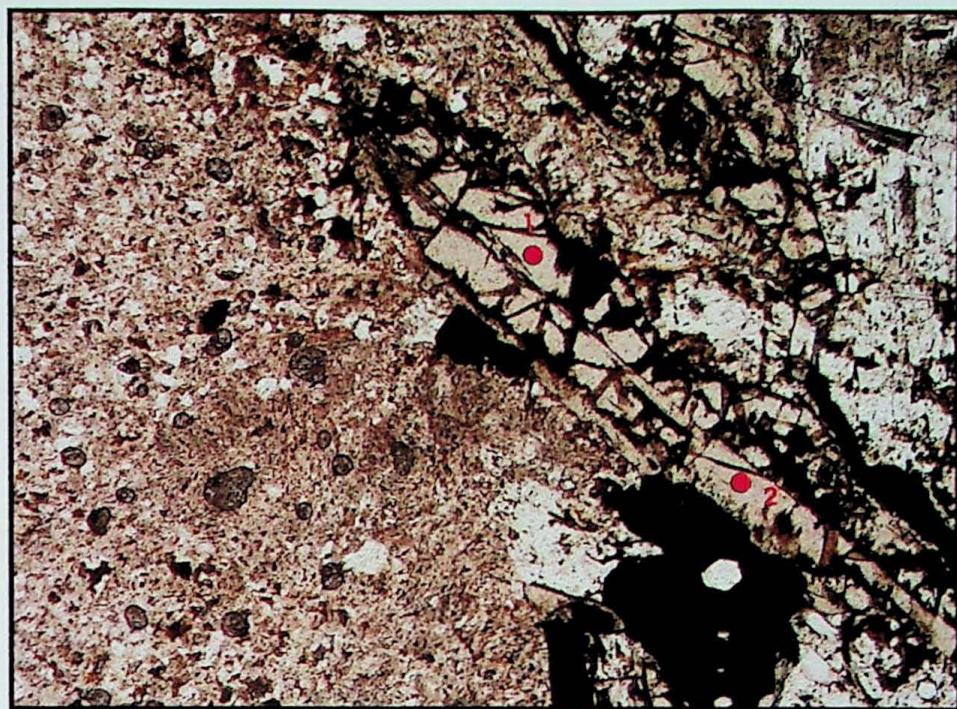
**Figura 8 – Fotomicrografias mostrando a posição de pontos de análise por microssonda eletrônica em rochas do sill de Limeira**



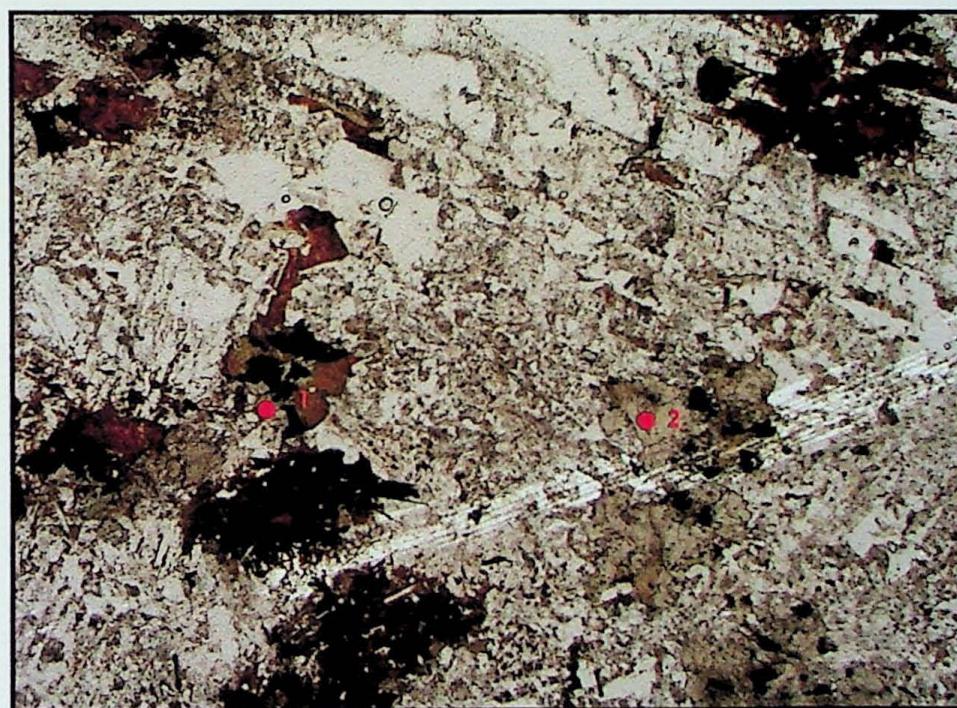
**Figura 8A** – Localização dos pontos de análises em cristal de piroxênio com núcleo de pigeonita corroídos por augita na borda. Em gabbro de granulação grossa, textura intergranular às vezes subofítica. Tabela IV, análises 1 e 2, amostra IGN75I. Polarizador inferior, tamanho do lado maior 1,62 µm.



**Figura 8B** – Localização dos pontos de análises em cristal de piroxênio com núcleo de pigeonita corroídos por augita de composição subcálcica na borda. Observa-se também alteração da augita por ferro-hornblenda. Em gabbro de granulação grossa, textura intergranular às vezes subofítica. Tabela IV, análises 6 e 7, amostra APOF.. Polarizador inferior, tamanho do lado maior 2,6 µm.



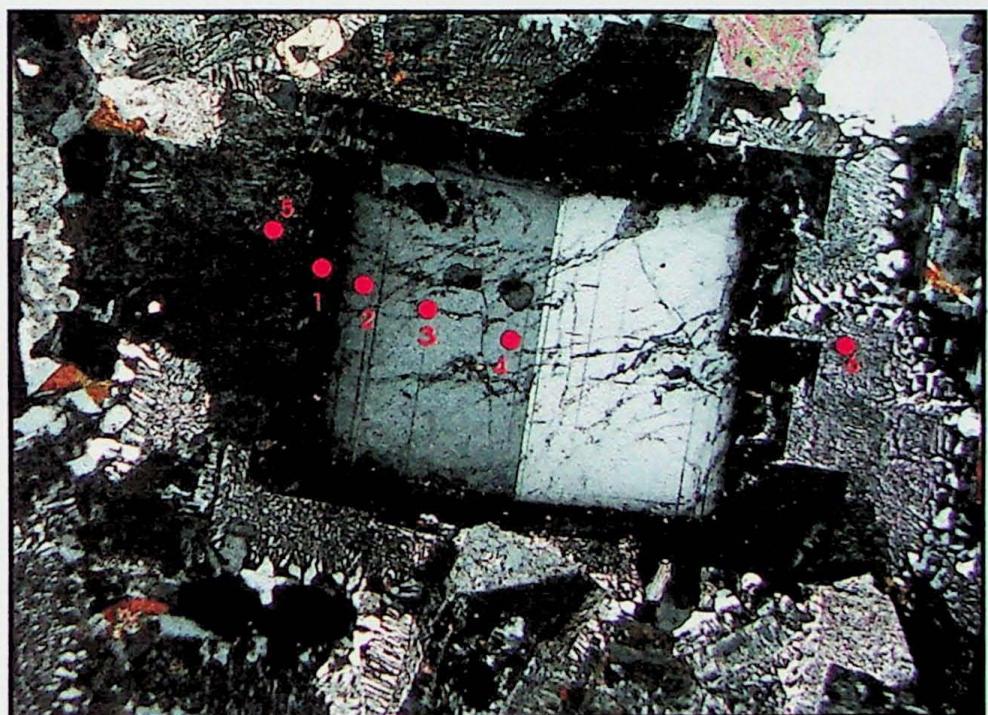
**Figura 8C** – Localização dos pontos de análises em cristal de piroxênio com núcleo de pigeonita corroídos por augita de composição subcálcica na borda. No gabbro de granulação grossa, textura intergranular às vezes subofítica. Tabela IV, análises 8 e 9, amostra APOF.. Polarizador inferior, tamanho do lado maior 2,6  $\mu\text{m}$ .



**Figura 8D** - Localização dos pontos de análises em cristais de augita. Em diorito de granulação muito grossa, textura intergranular às vezes subofítica. Tabela IV, análises 1 e 3, amostra IGN4.2.H. Polarizador inferior, tamanho do lado maior 2,6  $\mu\text{m}$ .

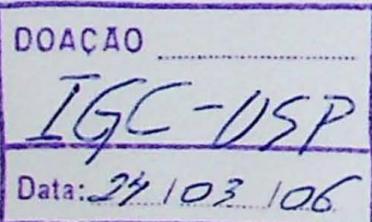


**Figura 8E** – Localização dos pontos de análises em cristal de piroxênio com núcleo de pigeonita corroídos por augita na borda. Em diorito de granulação muito grossa, textura intergranular às vezes subofítica. Tabela IV, análises 5 e 6, amostra IGN4.2.M. Polarizador inferior, tamanho do lado maior 2,6  $\mu\text{m}$ .



**Figura 8F** – Localização dos pontos de análises em cristal de plagioclásio zonado, e granófiros, indicando a variação composicional entre o núcleo e borda. No gabbro de granulação grossa, textura intergranular às vezes subofítica. Tabela V, análises 1 e 4, amostra IGN75I e Tabela VI, análises 5 e 6. Polarizadores cruzados, tamanho do lado maior 3,2  $\mu\text{m}$ .

Hidra 88 - Localização das bocas de fogo no interior da praia de  
Praia das Laranjeiras, Rio de Janeiro. Em dia de mar calmo, com poucas ondas, é possí-  
vel avistar as bocas de fogo. As bocas de fogo são compostas por duas tubulações  
de ferro fundido, com 15 cm de diâmetro e 1,5 m de altura, que juntas formam um  
cômodo abrigado para os canhões. As bocas de fogo são compostas por duas tubulações  
de ferro fundido, com 15 cm de diâmetro e 1,5 m de altura, que juntas formam um  
cômodo abrigado para os canhões.





**Figura 8G** – Localização dos pontos de análises em cristal de plagioclásio zonado, e granófiros, indicando a variação composicional entre o núcleo e borda. No diorito de granulação muito grossa, textura intergranular às vezes subofitica. Tabela V, análises 1 e 4, amostra IGN4.2.H e Tabela VI, análises 5 e 6. Polarizadores cruzados, tamanho do lado maior 2,6  $\mu\text{m}$ .

