

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**EVOLUÇÃO MAGMÁTICA DO SILL DE LIMEIRA:
PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA**

Camila Antenor Faria

Orientador: Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

São Paulo

2008

Resumo

O Sill de Limeira possui variação composicional ampla e aparentemente contínua, no intervalo entre basalto nas bordas de resfriamento e quartzo monzodiorito grosso na parte mais central exposta até agora nas pedreiras onde é explorado. Abaixo da borda basáltica do topo encontra-se uma camada bastante rica em amígdalas, preenchidas por minerais de origem hidrotermal, seguida pela ocorrência de ocelos de composição quartzo monzonítica. Por toda extensão do sill ocorrem veios riolíticos (em menor proporção, quartzo monzoníticos), de direção preferencial perpendicular às bordas de resfriamento.

As rochas são compostas essencialmente por plagioclásio, clinopiroxênio (augita ± pigeonita) e/ou anfibólio, Ti-magnetita, illmenita, além de quartzo e feldspato alcalino (nos termos mais diferenciados). Os minerais acessórios são apatita, filossilicatos, zircão, badeleíta, esfalerita, pirita e allanita; minerais de alteração hidrotermal são zeólitas, calcita, apofilita. Augita tem composição variada entre Fs~20, nas rochas mais primitivas e Fs40 nas mais diferenciadas (quartzo monzodiorito até riolito). O plagioclásio varia desde labradorita até oligoclásio, com predomínio de andesina An50-30 nas rochas mais abundantes.

A química de rocha total revela um “*trend*” de diferenciação contínuo de composições entre o basalto de borda (~48% SiO₂) e o quartzo monzodiorito (~61% SiO₂); um hiato entre quartzo monzodiorito e riolito é identificado no intervalo 61-69% SiO₂, no entanto quartzo monzonitos com 63-64% SiO₂ aparecem como corpos de pequeno volume (veios e ocelos). O teor de Ca, Mg, Ti e Fe mostra tendência contínua de queda com a diferenciação, enquanto K tem aumento contínuo e Na e Al mantêm-se quase constantes, alcançando seu valor máximo no quartzo monzonito. Ba, Rb e Zr mostram comportamento incompatível, enquanto Co, Cr e Sr são tipicamente compatíveis. Os padrões de ETR são fracionados (La_N/Yb_N~12), e mostram enriquecimento até o quartzo monzodiorito; em rochas mais diferenciadas passa a haver algum empobrecimento, principalmente dos ETR médios, refletindo a extração de clinopiroxênio..

A diferenciação do Sill de Limeira parece refletir processos de cristalização fracionada, que fornece resultados consistentes em balanços de massa, tanto nos estágios iniciais, como na geração dos líquidos residuais diferenciados (quartzo monzonito e riolito), onde deve ter ocorrido por “filter pressing”.

Em um modelo em que a cristalização ocorre a partir das bordas do corpo, com líquidos residuais sendo gerados nas frentes de solidificação, os ocelos foram possivelmente originados pela migração desses líquidos. Em um estágio posterior de evolução da câmara, os líquidos residuais expulsos dessas frentes teriam percolado fraturas em porções já solidificadas, formando os veios riolíticos.

Abstract

The Limeira Sill exhibits a wide and continuous compositional variation, between basalt at the chilled margins and coarse-grained quartz monzodiorite in the innermost part currently exposed in the quarried where it is exploited. Below the top basalt border there is a layer rich in amygdales filled by hydrothermal minerals, followed downwards by the appearance of quartz monzonitic ocelli. Throughout the sill occur rhyolitic (less often quartz monzonitic) veins oriented preferentially normal to the chilled margins.

The rocks are composed mostly of plagioclase, clinopyroxene (augite \pm pigeonite) and/or amphibole, Ti-magnetite, ilmenite, plus quartz and alkali feldspar (in the more differentiated rocks). Accessory minerals include apatite, filossilicates, zircon, baddeleyite, sphalerite, pyrite and allanite; hydrothermal minerals are zeolites, calcite and apophyllite. Augite compositions vary from Fs~20 in the more primitive rocks to Fs40 in the more differentiated (quartz monzodiorite to rhyolite). Plagioclase varies from labradorite to oligoclase, with predominance of andesine An50-30 in the more abundant rocks.

The whole rock chemistry reveals a continuous differentiation trend with compositions between the border basalt (~48 wt% SiO₂) and the quartz monzodiorite (~61 wt% SiO₂); a gap between quartz monzodiorite and rhyolite is identified in the 61-69 wt% SiO₂ interval, but quartz monzonites with 63-64 wt% SiO₂ appear as small-volume veins and ocelli. The Ca, Mg, Ti and Fe contents show a trend of continuous decrease with differentiation, while K shows a continuous increase, and Na and Al are nearly constant, reaching maximum value in the quartz monzonites. Ba, Rb and Zr show incompatible behavior, while Co, Cr and Sr are typically compatible. The REE patterns are fractionated (La_N/Yb_N~12), and show enrichment up to the quartz monzodiorite; in more differentiated rocks they begin to decrease, especially the medium REE, reflecting extraction of clinopyroxene.

The differentiation of the Limeira Sill appears to be a reflection of crystal fractionation, as suggested by consistent results in mass balance calculations, both for the initial stage (basalt to quartz monzodiorite) and for the generation of residual liquids (quartz monzonite and rhyolite), the latter probably involving some sort of filter pressing.

In a model of magma chamber where crystallization occurs at the margins and residual liquids are generated in the solidification fronts, the ocelli appear to be products of upward migration of these liquids. Later in the evolution of the chamber, the residual liquids extracted from these fronts would have percolated fractures in portions already solidified, forming the rhyolitic veins.

Agradecimentos

Agradeço ao meu querido orientador, Valdecir, por todo o apoio, paciência, compreensão e discussões geológicas ao longo desses 5 anos em que elaboramos todo o trabalho dessa dissertação. Agradeço a ele não só por me ensinar e orientar, mas também por ser sempre uma pessoa com quem pude contar nas horas de nervosismo e confusão.

Agradeço ao pessoal dos laboratórios do IGc: Marcos!!! (Microsonda), Paulinho (FRX), Sandra, Ricardo e Margareth (Química), Angélica (Óptica), Samuca!!! (Serra), Zé (LTA). Também as meninas da secretaria do GMG, da seção da pós, as meninas da limpeza, a tia do café (!), pessoal da biblioteca...

Agradeço a algumas pessoas da pós, além da amizade (muito importante para mim), a ajuda direta na elaboração da dissertação: ao Noku pelas discussões geológicas e pessoais, além da etapa de campo; ao Jaú pela ajuda com diagramas e várias discussões, a Rabo d'Galo pela ajuda com coisinhas muito chatas do Word, além de cafés e papos de banco e ao Augusto (esse não é da pós) pela ajuda com as figuras.

Aos companheiros de sala Tati, Cachorra e Marcelo, pelas risadas e momentos de descontração. Também a todo o pessoal da pós e fora dela, que se não ajudou, também não atrapalhou.

Agradeço também alguns amigos que sempre estavam lá na hora em que precisei, seja para uma conversa séria ou diversão: Rabiola, Kacilda, Biva, Maila, Diego, Gu, Wani, Pricy.

Agradeço ao Chachá por todo o companheirismo, amizade e carinho ao longo desses anos, por estar sempre me incentivando, fazendo me sentir melhor e disposto a ajudar mesmo que não desse.

Agradeço ao pessoal da BTX, principalmente ao meu chefe Gustavo, que me apoiou e incentivou no mestrado, mesmo sabendo que ia perder a funcionária temporariamente.

Por último, mas mais importante que tudo, agradeço a minha família por sempre ter me apoiado nas escolhas que fiz e por agüentar o estresse e mau humor, principalmente da reta final do mestrado, com muita paciência e carinho.

Sumário

Resumo	i
Abstract	ii
Agradecimentos	iii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Localização da área	1
2 MATERIAIS E MÉTODOS	3
2.1 Trabalhos de Campo	3
2.2 Análises petrográficas	4
2.3 Análises químicas de minerais	5
2.4 Análises químicas de rocha total	6
2.5 Avaliação da Qualidade Analítica	8
2.5.1 Análises por FRX	8
2.5.2 Análises por ICP-MS	11
2.5.3 Análises por ICP-OES	14
2.5.4 Considerações	15
3 SITUAÇÃO GEOLÓGICA	16
3.1 Bacia do Paraná	16
3.2 Província Magmática Paraná-Etendeka	17
3.3 Corpos intrusivos associados	20
3.4 A ocorrência de Limeira	21
3.5 Geologia	23
4 GEOLOGIA DE DETALHE NO SILL DE LIMEIRA	27
4.1 A exposição da Pedreira Cavinatto	27
4.2 A exposição da Pedreira Basalto 4	29
5 PETROGRAFIA	37
5.1 Basaltos	37

5.2	Diabásio	37
5.3	Monzodiorito	39
5.4	Quartzo monzodiorito	41
5.5	Veios – Riolito, Quartzo Monzonito e Hidrotermais	42
6	QUÍMICA MINERAL	58
6.1	Piroxênios	58
6.2	Feldspatos	62
6.3	Anfibólios	66
6.4	Zeólitas	67
7	GEOQUÍMICA DE ROCHAS	69
7.1	Nomenclatura e Classificação das Rochas do Sill de Limeira	69
7.2	Elementos Maiores e Menores	72
7.3	Elementos Traços	74
7.4	Elementos terras raras	78
7.5	Diagramas multi-elementares normalizados	80
8	PROCESSOS DE DIFERENCIAÇÃO MAGMÁTICA	83
8.1	Processos em sistema aberto: evidências de contaminação e recarga da câmara magmática	83
8.2	Cristalização fracionada	84
8.2.1	Considerações gerais	84
8.2.2	Modelamento geoquímico	84
8.3	A origem dos ocelos e veios: processos alternativos	90
8.3.1	Imiscibilidade líquida	90
8.3.2	Extração de líquidos em tramas cristalinas - “Filter Pressing”	91
9	SÍNTESE E CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
10	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

Lista de Tabelas e Anexos

Tabela 1 – Relação das amostras coletadas na Pedreira Cavinatto em cada etapa de campo	4
Tabela 2 – Relação das amostras coletadas na Pedreira Basalto	4
Tabela 3 - Resultados analíticos obtidos por FRX para os materiais de referência geoquímica internacionais e Limites de Detecção analíticos	9
Tabela 4 - Resultados analíticos obtidos por ICP-MS para os materiais de referência geoquímica internacionais e incertezas recomendadas e obtidas	12
Tabela 5 – Padrões de controle e branco utilizados nas análises de ICP-OES da amostra LCAV01C. Todos os óxidos estão dentro da incerteza calculada	14
Anexo I – Resultados das análises de química mineral por Microsonda Eletrônica (WDS) e cálculo das fórmulas estruturais	
Tabela 6 – Resultados analíticos para piroxênios	
Tabela 7 – Resultados analíticos para feldspatos	
Tabela 8 – Resultados analíticos para anfibólios	
Tabela 9 – Resultados analíticos de Microsonda Eletrônica (WDS) de análises pontuais em zeólitas, suas respectivas unidades atômicas com cálculo da razão $R=Si/Si+Al$	68
Anexo II – Resultados das análises de química de rocha total para elementos maiores e traços	
Tabela 10 – Resultados analíticos para elementos maiores por FRX e ICP-OES	
Tabela 11 – Resultados analíticos para elementos traços por FRX e ICP-OES	
Tabela 12 – Resultados analíticos para elementos traços por ICP-MS	
Tabela 13 – Composições dos minerais utilizadas no cálculo do balanço de massa. Composições da apatita, illmenita e magnetita extraídas de Deer <i>et al.</i> 1992	86
Tabela 14 – Valores de Xi e Kd (Rollinson, 1993) utilizados no cálculo de D	88
Anexo III – Resultados dos cálculos de balanço de massa para os elementos maiores	

Lista de Figuras

- Figura 1 – Trecho de imagem de satélite mostrando a localização espacial das cavas das pedreiras estudadas, Cavinatto e Basalto 4. Fonte: Google Earth, 2008_____2
- Figura 2 – Mapa rodoviário de parte do Estado de São Paulo, mostrando as principais vias de acessos à cidade de Limeira, SP. Fonte: Mapa Rodoviário do Estado de São Paulo, Ministério dos Transportes, Guia Geográfico_____2
- Figura 3 – Diagrama de comparação entre os resultados das duplicatas nas análises de FRX. Observamos que a precisão atestada é de variações máximas da ordem de 1%, o que pode ser observado pela sobreposição das amostras_____10
- Figura 4 – Comparação entre os resultados das duplicatas do basalto amigdaloidal nas análises de FRX. Observamos que o F apresenta precisão menor que a desejada_____10
- Figura 5 – Diagrama de comparação entre os resultados das duplicatas do monzodiorito nas análises de FRX. O Ce e o Nd apresentam precisão menor que a desejada_____11
- Figura 6 – Mapa Geológico da região de Limeira, SP, com principais Unidades aflorantes e localização do sill alvo do atual estudo. Extraído de CPRM – Mapa do Brasil ao Milionésimo_23
- Figura 7 – Perfil esquemático da exposição da Pedreira Cavinatto, com os principais litotipos identificados_____27
- Figura 8 – Espectro da análise de EDS realizado em cristal de chevkinita/perrierita, mineral acessório no riolito_____43
- Figura 9 – Espectro da análise de EDS realizado em cristal de uma provável variação de britolita, mineral acessório no riolito_____44
- Figura 10 – Diagrama Q (Ca+Mg+Fe) vs. J(2Na) para classificação segundo Morimoto *et al.* 1988. Todas as análises realizadas estão no campo Quad, e podem ser classificadas em diagramas Wo-Fs-En_____58
- Figura 11 – Diagrama Wo-Fs-En com a classificação dos clinopiroxênios nos basaltos e diabásios do sill de Limeira (SP). Presença de cristais de augita levemente mais ricos em FeO e CaO nos basaltos, rochas menos diferenciadas_____59
- Figura 12 – Diagrama Wo-Fs-En com a classificação dos clinopiroxênios no monzodiorito do sill de Limeira (SP). Presença de cristais de augita e pigeonita, cujas bordas apresentam composição de augita. Em vermelho a representação da *tie-line* entre os dois clinopiroxênios existentes_____59

Figura 13 – Diagrama Wo-Fs-En com a classificação dos clinopiroxênios no quartzo monzodiorito do sill de Limeira (SP). Grande variação composicional, com aumento evidente nos teores de FeO e aumento mais moderado de CaO. Ainda há presença de cristais de pigeonita, cujas bordas apresentam composição de augita. Em vermelho a representação da *tie-line* entre os dois clinopiroxênios existentes._____ 60

Figura 14 – Diagrama Wo-Fs-En com a classificação dos clinopiroxênios dos veios riolíticos do sill de Limeira (SP). Não há presença de cristais de augita subcálcica e pigeonita, e é evidente a distinção de dois grupos de veios; os mais ricos em FeO ocorrem associados a veios hidrotermais._____ 61

Figura 15 – Diagrama Wo-Fs-En com todas análises plotadas e isoterma, adaptado de Linsley, 1983. A coprecipitação de augita e pigeonita ocorreu entre $T \sim 1100^{\circ}\text{C}$ e $T \sim 1000^{\circ}\text{C}$, em um intervalo composicional relativamente pequeno ($\text{En} \sim 46-38$)._____ 61

Figura 16 – Diagrama Or-Ab-An com a classificação dos feldspatos nos basaltos e diabásios do sill de Limeira (SP). Amplo intervalo de composição, de oligoclásio à labradorita, principalmente nos diabásios. Existência de bordas de composição albítica e cristais de feldspato alcalino.____ 62

Figura 17 – Diagrama Or-Ab-An com a classificação dos feldspatos no monzodiorito do sill de Limeira (SP). Núcleos de cristais de plagioclásio com composição de andesina e labradorita (An_{53-43}). Zonas intermediárias de composições mais sódicas como oligoclásio e bordas albíticas e de feldspato alcalino._____ 63

Figura 18 – Pontos de análise WDS da Microsonda Eletrônica no monzodiorito, em cristal de andesina (An_{45}), com porções intermediárias de maior teor sódico e borda de feldspato potássico ($\text{An}_{0,2}$). Amostra IGN75I, polarizadores cruzados, lado maior 3,25 mm._____ 63

Figura 19 – Diagrama Or-Ab-An com a classificação dos feldspatos no quartzo monzodiorito do sill de Limeira (SP). Núcleos de cristais de plagioclásio com composição de andesina (An_{45-38}). Zonas intermediárias de composições mais sódicas e bordas albíticas e alcalinas._____ 64

Figura 20 – Pontos de análise WDS da Microsonda Eletrônica no quartzo monzodiorito em cristal de andesina (An_{40}), com porções intermediárias de maior teor sódico (An_{35-28}) e borda de composição ainda mais sódica (An_{19}). Amostra IGN4.2.H, polarizadores cruzados, lado maior 3,25 mm._____ 64

Figura 21 – Diagrama Or-Ab-An com a classificação dos feldspatos nos riolitos, ocelos e porções granofíricas do sill de Limeira (SP). Cristais de composição albítica (An_{4-1}) e alcalinas 65

Figura 22 – Diagrama Or-Ab-An de classificação dos feldspatos das rochas presentes no sill de Limeira (SP). Abundância de cristais de labradorita e andesina, e aumento no teor de NaO com

a diferenciação. Composições sódico-potássicas predominam em riolitos (termos mais diferenciados), assim como em porções granofíricas e bordas de cristais de plagioclásio do monzodiorito e quartzo monzodiorito	66
Figura 23 – Diagrama de classificação dos anfibólios, segundo Leake <i>et al.</i> 1997, das rochas do sill de Limeira. Predomínio de ferro-hornblenda (#Mg 03-05) e alguma ferro-edenita	67
Figura 24 – Diagrama extraído de Apps & Chipera, 2001, para classificação de zeólitas	67
Figura 25 – Diagramas de classificação de rochas plutônicas de Middlemost (1994) e Cox <i>et al.</i> , (1979), respectivamente, com análises químicas de rochas do sill de Limeira	69
Figura 26 – Diagrama de classificação de rochas vulcânicas de Le Bas <i>et al.</i> , 1994 com análises químicas de rochas do sill de Limeira	69
Figura 27 – Diagramas de classificação segundo Frost <i>et al.</i> 2001. As rochas do sill encontram-se no campo de rochas metaluminosas e ricas em ferro	71
Figura 28 – Diagrama AFM (Frost <i>et al.</i> 1979) com as rochas do sill no campo da série toleítica com amostras se riolito próximas e paralelas ao eixo álcalis-ferro	71
Figura 29 - Diagramas de variação para os óxidos dos elementos maiores (em %) por FRX, e ICP-OES (amostra ocelo) utilizando da sílica como índice de diferenciação	72-73
Figura 30 – Diagramas de #Mg e #Fe versus SiO ₂ . Rochas mais diferenciadas (quartzo monzonito, riolito e ocelos) mais pobres em Mg e mais ricas em Fe. Amostra dos ocelos não segue o trend principal	74
Figura 31 – Diagramas de variação de Nb-Y com SiO ₂ como índice de diferenciação. À esquerda diagramas gerados a partir dos dados de FRX e a direita por ICP-MS. Notar que os resultados obtidos por ambos os métodos são bastante semelhantes	75
Figura 32 - Diagramas de variação para os elementos traços (em ppm) segundo dados obtidos por FRX e ICP-OES (amostra ocelo) utilizando da sílica como índice de diferenciação	76-77
Figura 33 - Diagramas de variação para os elementos traços (em ppm) segundo dados obtidos por ICP-MS e ICP-OES (amostra ocelo) utilizando da sílica como índice de diferenciação	77-78
Figura 34 – Diagrama de Elementos Terras Raras, normalizado pelo C1 Condrito (McDonough & Sun, 1995), indicando comportamento incompatível ao longo da evolução composicional até o quartzo monzodiorito	79

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

