

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MINERALOGIA E PETROLOGIA DE XENÓLITOS  
MANTÉLICOS DAS REGIÕES DE UBATUBA (SP) E  
MONTE CARMELO (MG): EVIDÊNCIAS DE FUSÃO  
PARCIAL E METASSOMATISMO NO MANTO SUPERIOR  
DO SUDESTE DO BRASIL**

Vidyã Vieira de Almeida

Orientador: Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

SÃO PAULO  
2009

## Resumo

Estudos mineralógicos e petrológicos foram realizados em amostras de xenólitos do manto inclusos em dique de kaersutita lamprófito de Ubatuba (SP) (Província Ígnea da Serra do Mar) e no Kimberlito Limeira 1 (Monte Carmelo, MG; Província Alcalina do Alto Paranaíba) utilizando petrografia e geoquímica de elementos maiores e traços em minerais por microsonda eletrônica e LA-ICPMS.

Os espinélio lherzolitos de Ubatuba, para os quais foram estimadas temperaturas de equilíbrio entre 750 e 950°C, representam um manto fértil, afetado por proporções variáveis, mas sempre moderadas de empobrecimento. Evidências de dois tipos de metassomatismo mantélico foram observadas em amostras distintas. Cristais de clinopiroxênio das amostras com evidências de empobrecimento prévio mais acentuado (maior Mg# de olivina e piroxênios, menor Al e Na em piroxênios, pouco espinélio) mostram enriquecimento caracterizado por alta razão LILE/HFSE, atribuído a fluidos/fundidos provenientes de zonas de subducção. Em amostra de wehrlito pobre em espinélio, por outro lado, observa-se enriquecimento de LILE e HFSE no clinopiroxênio, sugestivo de interação com fluidos/fundidos alcalinos.

Os xenólitos do manto do Kimberlito Limeira 1 representam lherzolitos e dunitos, com maior variedade mineralógica e textural, para os quais foram estimadas temperaturas de equilíbrio entre 760 e 820°C. Evidências de metassomatismo modal mantélico são identificadas pela presença frequente de bolsões com concentração de minerais secundários, com notável enriquecimento de LILE e HFSE, em alguns casos com fases exóticas exclusivamente relacionadas a metassomatismo no manto superior. As assinaturas químicas das fases secundárias são semelhantes às presentes na suíte MARID e em peridotitos venulados metassomatizados de xenólitos de kimberlitos da África do Sul. Evidências petrográficas e químicas de descompressão (sugerindo a presença pretérita de granada) foram observadas em uma amostra afetada por enriquecimento com alta razão LILE/HFSE.

As diferentes evidências de processos de empobrecimento e metassomatismo observadas entre os dois grupos de xenólitos estudados (Ubatuba e Monte Carmelo), são indicativas da variabilidade lateral do manto superior de fácies espinélio do sudeste brasileiro, refletindo os processos geológicos (tectônicos e magmáticos) distintos vivenciados pelas duas regiões.

## Abstract

Mineralogical and petrological studies were conducted in mantle xenoliths included in a kaersutite lamprophyre dyke from Ubatuba (SP) (Serra do Mar Igneous Province), and in the Limeira 1 Kimberlite (Monte Carmelo, MG; Alto Paranaíba Alkalic Province), using petrography and major and trace element geochemistry in minerals by electron microprobe and LA-ICPMS.

The Ubatuba spinel lherzolites, with equilibrium temperatures ranging from 750 to 950°C, represent a fertile mantle affected by variable but moderate depletion. Evidence of two types of mantle metasomatism were detected in different samples. Clinopyroxene crystals of the samples with evidence of stronger previous depletion (olivine and pyroxenes with higher Mg#, pyroxenes with lower Al and Na, few proportion of spinel) show enrichment with high LILE/HFSE, attributed to fluids/melts derived from subduction zone. On the other hand, a spinel-poor wehrlite shows a clinopyroxene with both LILE and HFSE enrichment, suggestive of interaction with alkaline fluids/melts.

The Limeira 1 mantle xenoliths correspond to lherzolites and dunites showing more textural and mineralogical variety and equilibrium temperatures ranging from 760 to 820°C. Modal metasomatism was identified by the presence of abundant pockets with concentration of LILE and HFSE-rich secondary minerals, including in some cases, exotic phases typical of upper mantle metasomatism. The chemical signature of the metasomatic minerals is similar to those found in MARID and in veined metasomatic peridotites from South Africa kimberlite xenoliths. Petrographic and chemical evidences of decompression (suggesting the former presence of garnet) were observed in a sample affected by enrichment with high LILE/HFSE.

The different evidences of depletion and enrichment processes observed in the two groups of xenoliths (Ubatuba and Monte Carmelo) indicate a lateral variability of the spinel-facies upper mantle in southeast Brazil, which may reflect the distinct tectonic and magmatic processes that affected these two regions.

## Agradecimentos

O desenvolvimento e a conclusão deste trabalho foram possíveis graças ao auxílio de várias pessoas às quais expresso meu profundo agradecimento.

Ao Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi, pela orientação, apoio, compreensão e estímulo durante todas as fases do trabalho.

Ao Prof. Dr. Darcy Pedro Svisero, colaborador do projeto, que cedeu parte de suas amostras de xenólitos do Kimberlito Limeira 1 e também contribuiu com sugestões e discussões sobre o tema.

Os dados de elementos traços em minerais por LA-ICPMS foram obtidos no Laboratório de Química do IGc-USP com a colaboração e auxílio de Sandra Andrade, Margareth Sugano Navarro e da Dra. Lucelene Martins. Análises químicas em minerais por Microsonda Eletrônica tiveram auxílio de Marcos Mansueto, enquanto análises e imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura tiveram o apoio de Isaac Jamil Sayeg.

Ao pessoal da pós-graduação do IGc-USP, Liza, Adriana, Lucelene, Luana, Leandro, Vivian, Gabriel, Rogério, Félix, Carlos, Renato, Bruna, Felipe, Maurício, Rafael, Vinícius, John e Marta.

Agradeço a Luiz Antônio Chierigati e José Carlos Garcia da CPRM-Serviço Geológico do Brasil (Sureg-SP) pelo período parcial utilizado na dissertação, e os colegas de CPRM: Luiz Gustavo, Sérgio, Fabrizzio, Elizete, Viviane, Mônica, Márcio, Eduardo Longo, Eduardo Jorge, Vilmario, Andréa, Dinorá, Arivane e José da Costa.

Ao geólogo Vicente Sérgio da Costa (CPRM-SP), pesquisador de xenólitos do manto, que contribuiu com discussões sobre o tema.

Aos funcionários do IGc-USP, em especial Ana Paula Cabanal, Magali Rizzo, Tadeu, Maria Inês, Angélica, José Paulo, Henrique, Paulo, Luizinho e Cláudio (Laminação).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) agradeço o suporte financeiro referente à bolsa de mestrado (processo 2006/01925-4) e ao projeto de auxílio à pesquisa (processo 2007/00635-5).

À CNPq agradeço o suporte financeiro referente a um período parcial de bolsa de mestrado.

O apoio incondicional dos meus pais, Mirian e Sidney, foi fundamental para o meu ingresso no mestrado e para a realização de todo o trabalho. Também agradeço minha irmã Ananda e meus sogros Lúcia e Jair pelo auxílio em várias etapas.

Ao meu marido, Frederico Meira Faleiros, pelo apoio em tudo, desde a redação do texto, petrografia e discussões sobre os mais diversos assuntos. Um agradecimento especial para o Frederico e nosso querido filho Samuel que nasceu no início do mestrado.

## Índice

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivos e justificativas</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Materiais e métodos</b>	<b>3</b>
1.2.1. Pesquisa bibliográfica	3
1.2.2. Levantamentos de campo e amostragem	4
1.2.3. Análise petrográfica	4
1.2.4. Microscopia eletrônica de varredura	4
1.2.5. Química mineral	4
1.2.6. Análise química de rocha total	7
<b>2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Xenólitos do manto</b>	<b>7</b>
<b>2.2. Registros de xenólitos do manto no Brasil</b>	<b>11</b>
<b>3. XENÓLITOS DO LAMPRÓFIRO DA PRAIA VERMELHA (UBATUBA - SP)</b>	<b>14</b>
<b>3.1. Situação geológica</b>	<b>14</b>
<b>3.2. Petrografia</b>	<b>17</b>
3.2.1. Grupo 1: Espinélio lherzolitos com textura protogranular	18
3.2.2. Grupo 2: Wehrlitos	24
3.2.3. Grupo 3: Fragmentos menores	27
3.2.4. Xenocristais/Fenocristais	28
<b>3.3. Química mineral</b>	<b>29</b>
3.3.1. Olivina	29
3.3.2. Ortopiroxênio	29
3.3.3. Clinopiroxênio	30
3.3.4. Espinélio	33
3.3.5. Análises semi-quantitativas por EDS em fases acessórias	34
<b>3.4. Geoquímica de elementos-traços em minerais</b>	<b>35</b>
3.4.1. Residência dos elementos traços em espinélio peridotitos	35
3.4.2. Análises de elementos-traços por LA-ICPMS	36
<b>3.5. Petrogênese</b>	<b>40</b>
3.5.1. Estimativas de temperatura	40
3.5.2. Modelos de fusão em equilíbrio e fusão fracionada	42
<b>3.6. Discussão</b>	<b>44</b>
<b>4. XENÓLITOS DO KIMBERLITO LIMEIRA 1 (MONTE CARMELO- MG)</b>	<b>47</b>
<b>4.1. Situação geológica</b>	<b>47</b>
<b>4.2. Petrografia</b>	<b>49</b>
4.2.1. Grupo 1: Espinélio peridotitos com textura protogranular	51
4.2.2. Grupo 2: Espinélio-flogopita peridotitos com texturas protogranular e transicional	55

4.2.3. Grupo 3: Xenólitos com predominância de fases metassomáticas	67
4.2.4. Macrocristais/Xenocristais	73
<b>4.3. Geoquímica de rocha total</b>	<b>73</b>
<b>4.4. Química Mineral</b>	<b>75</b>
4.4.1. Olivina	75
4.4.2. Ortopiroxênio	75
4.4.3. Clinopiroxênio	77
4.4.4. Espinélio	79
4.4.5. Fases minerais metassomáticas	80
<b>4.5. Análises de elementos traços por LA-ICPMS</b>	<b>93</b>
<b>4.6. Petrogênese</b>	<b>97</b>
4.6.1. Estimativas de temperatura	97
4.6.2. Elementos traços em rocha total vs. elementos traços em clinopiroxênio	98
4.6.3. Modelos de fusão em equilíbrio e fusão fracionada	98
<b>4.7. Discussão</b>	<b>100</b>
<b>5. DISCUSSÃO INTEGRADA E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>103</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>105</b>

## ANEXOS

## Índice de Figuras

### 1. INTRODUÇÃO

Figura 1: Mapas rodoviários com localização das áreas_____	2
--	---

### 2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Figura 2: Diagrama de classificação de Streckeisen (1976) para peridotitos e piroxenitos_____	8
Figura 3: Diagrama de P e T com as fácies plagioclásio, espinélio e granada_____	9
Figura 4: Localização de xenólitos mantélicos na América do Sul_____	12

### 3. XENÓLITOS DO LAMPRÓFIRO DA PRAIA VERMELHA (UBATUBA – SP)

Figura 5: Mapa com a localização do dique de lamprófiro na Praia Vermelha de Ubatuba (SP)_____	15
Figura 6: Feições de campo do dique de lamprófiro da Praia Vermelha (Ubatuba)_____	16
Figura 7: Seção delgada do lamprófiro encaixante_____	16
Figura 8: Diagrama de Streckeisen (1976) com classificação dos xenólitos de Ubatuba_____	18
Figura 9: Fotomontagem da lâmina do xenólito Ln9xm1_____	19
Figura 10: Cristal de clinopiroxênio esverdeado em contato com olivina_____	20
Figura 11: Fotomontagem do xenólito Ln9xm3_____	21
Figura 12: Fotomontagem do xenólito Ln9h_____	22
Figura 13: Borda de reação entre o xenólito Ln9xm3 e o lamprófiro encaixante_____	23
Figura 14: Cristais de ortopiroxênio, clinopiroxênio e olivina associada a material de alteração_____	24
Figura 15: Borda de reação do xenólito Ln9xm2 com o lamprófiro_____	25
Figura 16: Intercrescimento de clinopiroxênio e olivina no xenólito Ln9xm2_____	26
Figura 17: Visão geral do xenólito Ln9g_____	27
Figura 18: Borda de reação rosada em cristal de ortopiroxênio do xenólito Ln9g_____	28
Figura 19: Xenocristais de ortopiroxênio e olivina no lamprófiro_____	28
Figura 20: Diagrama de Morimoto (1988) com classificação dos cristais de ortopiroxênio_____	30
Figura 21: Composições de núcleos de cristais de ortopiroxênio_____	30
Figura 22: Diagrama de Morimoto (1988) com classificação dos cristais de clinopiroxênio_____	32
Figura 23: Composições de núcleos de cristais de clinopiroxênio_____	32
Figura 24: Composições de cristais de espinélio_____	33
Figura 25: Diagrama ternário para cristais de espinélio_____	34
Figura 26: Imagem BSE de sulfeto de Fe e Ni do xenólito Ln9h_____	35
Figura 27: Razões LILE/HFS (La/Nb e La/Zr) dos cristais de clinopiroxênio_____	38
Figura 28: Padrões de elementos terras raras de cristais de clinopiroxênio_____	39
Figura 29: Padrões de elementos incompatíveis de cristais de clinopiroxênio_____	40
Figura 30: Curvas geradas por modelamentos de fusão em equilíbrio e fusão fracionada_____	43
Figura 31: Padrões de elementos incompatíveis previstos por fusão em equilíbrio e fracionada_____	44

#### 4. XENÓLITOS DO KIMBERLITO LIMEIRA 1 (MONTE CARMELO-MG)

Figura 32: Localização geográfica do Kimberlito Limeira 1	48
Figura 33: Exemplos de xenólitos estudados do Kimberlito Limeira 1	50
Figura 34: Diagrama de Streckeisen (1976) com a classificação dos xenólitos do Kimberlito Limeira 1	51
Figura 35: Fotomontagem do xenólito Klxm1	52
Figura 36: Cristal de ortopiroxênio com borda de alteração cor marrom acinzentada	53
Figura 37: Cristais de clinopiroxênio com concentração de trilhas de inclusões fluidas	54
Figura 38: Detalhe na banda com ortopiroxênio, clinopiroxênio e espinélio	54
Figura 39: Fotomontagem do xenólito Klxm2	56
Figura 40: Neoblastos em microfraturas e no limite dos cristais de olivina	57
Figura 41: Clivagem proeminente e dobrada em cristal de olivina	57
Figura 42: Borda de alteração de cristal de ortopiroxênio com cristais fibrosos	58
Figura 43: Cristal de ortopiroxênio com inclusões de flogopita e clinopiroxênio	58
Figura 44: Contato irregular entre ortopiroxênio e clinopiroxênio	59
Figura 45: Bolsão zonado com clinopiroxênio, flogopita e minerais opacos	60
Figura 46: Cristal de flogopita dobrado	61
Figura 47: Cristal de flogopita no contato com o kimberlito	61
Figura 48: Relação entre clinopiroxênio, ortopiroxênio e olivina	62
Figura 49: Ortopiroxênio em contato com olivina	63
Figura 50: Relação entre olivina, clinopiroxênio e flogopita mais tardia	63
Figura 51: Fotomicrografia do xenólito Klxm4	64
Figura 52: Fotomontagem do xenólito Klxm6	65
Figura 53: Cristais de olivina com contatos poligonizados	66
Figura 54: Cristal poiquilítico de flogopita	66
Figura 55: Fotomontagem do xenólito Klxm3	68
Figura 56: Imagem BSE da massa policristalina de minerais opacos	69
Figura 57: Indicação das inclusões vermiformes de calcita	69
Figura 58: Inclusões de cristal euédrico, esverdeado em carbonato	70
Figura 59: Inclusões em carbonato	70
Figura 60: Inclusões e zoneamento em flogopita	71
Figura 61: Cristais de clinopiroxênio em contato interlobado	72
Figura 62: Cristal de olivina sem inclusões	72
Figura 63: Cristais de olivina no kimberlito	73
Figura 64: Padrões de elementos terras raras de análises de rocha total dos xenólitos e do Kimberlito Limeira 1	74
Figura 65: Padrões de elementos incompatíveis dos xenólitos e do Kimberlito Limeira 1	75
Figura 66: Diagrama de Morimoto (1988) com classificação dos cristais de ortopiroxênio	76
Figura 67: Composições de núcleos de cristais de ortopiroxênio	76
Figura 68: Diagrama de Morimoto (1988) com classificação dos cristais de clinopiroxênio	78
Figura 69: Composições de núcleos de cristais de clinopiroxênio	78
Figura 70: Composições de cristais de espinélio	79
Figura 71: Diagrama ternário para cristais de espinélio	80
Figura 72: Diagrama com membros finais de micas trioctaédricas	81
Figura 73: Diagrama $FeO \times Al_2O_3$ com campos composicionais de micas	82
Figura 74: Detalhe de cristal de ilmenita com lamelas de cromita	83
Figura 75: Imagens BSE e de microscópio de luz transmitida mostrando cristal de cromita mantelado por mathiasita	85
Figura 76: Imagem no microscópio de luz transmitida e imagem BSE com relação entre cromita, Ilmenita e mathiasita	86
Figura 77: $K(A) \times Fe(M)$ de cristais de mathiasita	87



Figura 78: Diagrama ternário com análises de mathiasita obtidas neste trabalho_____	88
Figura 79: Dados composicionais de mathiasita do xenólito Klxm2 projetados no diagrama de Haggerty (1995)_____	88
Figura 80: Imagem no microscópio de luz transmitida e BSE de cristal de ilmenita e lamelas de priderita_____	90
Figura 81: Imagem no microscópio de luz transmitida e BSE de priderita manteada por ilmenita_____	91
Figura 82:Relação inversamente proporcional entre Ti (M) e Fe (M)_____	92
Figura 83: Dados composicionais de priderita do xenólito Klxm3 projetados no diagrama de Haggerty (1995)_____	92
Figura 84: Razões LILE/HFS dos cristais de clinopiroxênio_____	95
Figura 85: Padrões de elementos terras raras de cristais de clinopiroxênio_____	96
Figura 86: Padrões de elementos incompatíveis de cristais de clinopiroxênio_____	97
Figura 87: Curvas geradas por modelamentos de fusão em equilíbrio e fracionada_____	99
Figura 88: Padrões de elementos incompatíveis previstos por fusão em equilíbrio e fracionada_____	100

### Índice de Tabelas

Tabela 1: Padrões químicos utilizados nas análises químicas por microsonda eletrônica_____	5
Tabela 2: Limites de detecção médios e desvio padrão de análises por LA-ICPMS_____	7
Tabela 3: Caracterização geral dos xenólitos maiores de Ubatuba_____	17
Tabela 4: Temperaturas estimadas para xenólitos de Ubatuba_____	41
Tabela 5: Quadro comparativo com as características gerais dos xenólitos de Ubatuba_____	46
Tabela 6: Caracterização geral dos xenólitos de Monte Carmelo_____	50
Tabela 7: Temperaturas estimadas para xenólitos de Monte Carmelo_____	98
Tabela 8: Quadro comparativo com as características gerais dos xenólitos do Kimberlito Limeira 1_____	102

## 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da composição e estrutura do manto superior é tema fundamental para diversas áreas das geociências, com implicações diretas para a geração de magmas de qualquer natureza, sejam eles graníticos, basálticos ou alcalinos. Mesmo no caso do magmatismo granítico, volumetricamente mais abundante na crosta continental, e onde a contribuição da reciclagem de material crustal é geralmente importante, um componente derivado do manto tem sido identificado na significativa maioria dos casos (e.g. Barbarin, 1999; Patiño-Douce, 1999).

Embora contribuições provenientes da petrologia ígnea (a partir da geoquímica e das estimativas das condições de geração dos magmas de derivação mantélica) e da geofísica (através de métodos sísmicos, gravimétricos, magneto-telúricos e outros) ofereçam suporte fundamental para o conhecimento da estrutura da litosfera e astenosfera terrestres, a caracterização do manto superior continental de uma determinada região é criticamente dependente da amostragem direta, apenas possível com o estudo de xenólitos trazidos por certos tipos de magma de ascensão rápida (e.g., kimberlitos, lamproítos, lamprófiros e basaltos alcalinos).

Desde os anos 1970 o estudo de xenólitos mantélicos tem trazido importantes contribuições para os modelos de evolução do manto, permitindo estimativas diretas de sua composição mineralógica, química e isotópica e de sua variabilidade vertical (pela estimativa da composição, profundidade e temperatura de cristalização de diferentes xenólitos) e lateral (pela comparação entre xenólitos amostrados em diferentes locais). Grande parte dos progressos alcançados desde então estão reunidos nas monografias específicas de Nixon (1980, 1987), Dawson (1980) e Pearson *et al.* (2003) bem como em inúmeros artigos distribuídos na literatura geológica recente.

São poucos os registros de ocorrências conhecidas de xenólitos do manto no sudeste brasileiro, o que constitui um sério limitante para modelos petrológicos e geofísicos nessa vasta região. Assim é que o papel do manto litosférico ou astenosférico na geração do magmatismo basáltico (e.g. Hawkesworth *et al.*, 1988; Peate & Hawkesworth, 1996), alcalino (Comin-Chiaromonte *et al.*, 1997) e granítico (e.g. Janasi *et al.*, 1993; Wernick & Menezes, 2001) é tema amplamente debatido, mas que claramente demanda o conhecimento direto desses reservatórios.

O presente estudo propõe contribuir para o conhecimento do manto superior do sudeste brasileiro através do estudo petrográfico e geoquímico de detalhe de xenólitos do manto que ocorrem em intrusões subvulcânicas de duas regiões distintas: (a) Kimberlito Limeira 1, localizado 26 km a norte da cidade de Monte Carmelo (MG) e 25 km a sudoeste de

## 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:

