UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Coeficientes de partição de elementos traços entre minerais máficos (clinopiroxênio e olivina) e líquidos ultrabásicos alcalinos (basanitos e tefritos): estudo de diques relacionados ao magmatismo cretáceo no sudeste da Plataforma Brasileira

Mariana Robertti Ambrosio

Orientador: Prof. Dr. Rogério Guitarrari Azzone

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

São Paulo
2015

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Coeficientes de partição de elementos traços entre minerais máficos (clinopiroxênio e olivina) e líquidos ultrabásicos alcalinos (basanitos e tefritos): estudo de diques relacionados ao magmatismo cretáceo no sudeste da Plataforma Brasileira

Mariana Robertti Ambrosio

Orientador: Prof. Rogério Guitarrari Azzone

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

São Paulo
2015

Dedico

Aos meus pais Sônia e Vicente

A minha irmã Stella

Ao meu avô Rolando

Por todo apoio e momentos de alegrias neste período de pós-graduação.

Dedico

ao meu orientador Rogério

Pelo grande incentivo ao desenvolvimento da minha formação acadêmica.

Agradecimentos

Ao meu orientador Rogério por ter me dado a oportunidade de aprender, pelos longos períodos de dedicação, apoio, paciência, compreensão, conversas esclarecedoras, compartilhamento de experiências e amizade. Agradeço também por ter sugerido o tema com que trabalhei durante o mestrado que foi bastante desafiador e respondeu as minhas expectativas.

À FAPESP por ter acreditado no meu projeto e por fornecer subsídios para o desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Excelso Ruberti por apoiar a minha pesquisa e integrar o meu trabalho de mestrado ao projeto *A Província Magmática Paraná-Etendeka no Brasil: relações temporais e petrológicas entre o magmatismo toleítico e alcalino e suas implicações geodinâmicas*

Ao professor Gaston por me atender pacientemente nas minhas visitas repentinas a sua sala para esclarecimento de dúvidas.

Aos professores Adriana, Eliane, Lucelene, Daniel, Fábio, Gergely, Renato, Silvio pela boa recepção e por fazerem a minha passagem pelo Instituto de Geociências da USP mais agradável.

Aos jovens da sala (B9) Caio, Felix, Laísa, Pedro (também), Rafaela e Vanessa pelos momentos de descontração e amizade.

Aos meus amigos Alexander, Andrés, Ângela, Astrid, Aurora, Camilo, Claudia, Daniel(s), Diego (s), Edilce, Eliana, Emmanuel, Eva (Evinha), Fernanda, Giovanna, Maria Isabel, Natali, Priscila, Renato, Santiago(s), Soraia, Tábata, Vanessa (novamente), Vinícius, Victor e outros alunos do bloco B pelo companheirismo e por trazerem mais alegria a minha vida acadêmica!

Ao Marcos Kaiser, irmão da Evinha, por me auxiliar no *abstract*.

Aos meus amigos da Turma 55 do curso de Geologia por ter me recebido tão respeitosamente em seu grupo durante a minha frequência em algumas disciplinas da graduação.

Aos meus amigos da graduação Vilma e Victor Hugo pelo companheirismo e conversas.

Aos alunos de iniciação e TF do professor Rogério, principalmente, Saulinho e Marco pela amizade e ajuda.

Aos técnicos Audrey, Marcos, Marinês, Sandra, Vinícius e Ricardo pelo apoio e por terem me recebido muito bem nos dias em que trabalhei no laboratório.

Aos técnicos Paulo e José Paulo por me receberem no laboratório durante a escrita da minha dissertação e por favorecerem o ambiente para a realização do meu trabalho (com direito a música suave de fundo) e pelos incentivos.

Ao técnico Isaac pela atenção, motivação e amizade.

Aos funcionários do Instituto de Geociências da USP pelos serviços prestados e ajuda.

Ao Instituto de Química da USP pela base de conhecimento que obtive durante a graduação que me auxiliam e auxiliarão na busca dos meus objetivos acadêmicos por todo sempre.

Aos meus pais Sônia, Vicente, a minha irmã Stella e ao meu avô Rolando por fazerem esta caminhada muito mais leve e prazerosa. Muito obrigada pelo amor e convivência.

Aos meus avós Iracema, Laura e João pelos exemplos de determinação e perdão que levarei para qualquer lugar onde eu estiver.

Ao meu querido amigo Luis pelo companheirismo durante a graduação, pelo grande apoio a minha decisão de ingressar ao programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências.

A minha amiga Patrícia (mesmo no outro hemisfério) e sua família pela motivação pela vida acadêmica, conversas e atenção.

A minha querida amiga Juliana, parceira de laboratório no período de graduação no Instituto de Química, pelos pensamentos positivos e apoio.

A minha amiga Aparecida pelos conselhos e pelo ombro amigo nos momentos difíceis.

.A todas as pessoas (amigos e familiares) que me incentivaram e se interessaram pela minha pesquisa.

A vida por oferecer a mim todos os momentos de alegrias, descobertas e pelos tropeços também. Por colocar no meu caminho, durante o meu mestrado, pessoas especiais e pelas oportunidades que me impulsionaram a me tornar uma pessoa um pouco melhor.

Muito obrigada!

Resumo

Os coeficientes de partição de elementos traços entre minerais máficos (clinopiroxênio e olivina) e matrizes assumidas como representativas dos fundidos magmáticos foram obtidos a partir de diques alcalinos ultrabásicos relacionados ao magmatismo cretáceo no sudeste da Plataforma Brasileira. Os quatro diques estudados, relacionados às Províncias alcalinas do Arco de Ponta Grossa (DAPGG) e Serra do Mar (DSMU, DSMPN e DSMB), são corpos porfíricos de matriz fina a muito fina, melanocráticos, dos quais os três primeiros são caracterizados como lamprófiros (monchiquito ou camptonito) e o último como um olivina basalto. Os litotipos são potássicos a ultrapotássicos e classificados como tefritos e basanitos; os respectivos líquidos da última etapa de diferenciação magmática (matrizes de granulação fina a muito fina) também são classificados como tefritos e basanito. Estas rochas são enriquecidas em elementos incompatíveis, com teores de elementos terras-raras (ETR) leves e pesados apresentando valores em torno de 10 a 100 vezes maiores em relação ao reservatório condritico, respectivamente; as concentrações mais elevadas são encontradas no dique da Província do Arco de Ponta Grossa (DAPGG). Os métodos experimentais para a obtenção da composição considerada representativa do líquido (fundido magmático) foram caracterizadas por meio de diferentes metodologias. A análise direta de matrizes por microsonda eletrônica (ME) e por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado e com amostrador por ablação a *laser* (LA-ICP-MS), empregando-se diâmetro de feixe em torno de 100 μm para ambos os casos, tornou-se atrativa para aquelas mais finas e homogêneas (obtidas nas regiões de bordas de DAPGG e DSMU). Também foram realizadas análises globais por fluorescência de raios X e ICP-MS de material matricial separado manualmente a partir de amostras fragmentadas e excluindo-se (com auxílio de lupa binocular) as populações de mega- e macrocristais. Tais análises foram consideradas para as amostras em que tamanho e forma de macrocristais se sobressaíam em relação à matriz (DSMPN, amostras de borda e região intermediária de DAPGG). A escolha de amostras de borda de DSMB como representativa do líquido do dique foi uma alternativa encontrada a limitada disponibilidade de material, facilitada pelo zonamento mineralógico do corpo. No geral, as composições das matrizes se diferenciam das respectivas composições globais das amostras por uma maior abundância em minerais félsicos normativos, especialmente *ortoclásio*, *albita* e *anortita*, e pelo empobrecimento dos minerais máficos normativos *olivina* e/ou *diopsídio*, e também pelo enriquecimento em elementos incompatíveis.

O estudo composicional de clinopiroxênio e olivina foi realizado por meio de determinações químicas por ME e LA-ICP-MS. Os cristais de clinopiroxênio analisados são zonados e são classificados como diopsídio, cuja composição molecular dos membros finais é restrita ao intervalo $\text{En}_{26-46}\text{Wo}_{42-52}$

FS7-30. O enriquecimento de ETRs ocorre de 4 a 198 vezes em relação ao reservatório condritico, com padrões de distribuição de ETR com formato côncavo para baixo e com maior enriquecimento de ETR leves em relação aos pesados, e estão mais concentrados nos clinopiroxênios de DSMPN e menos em DAPGG. Cristais de olivina se apresentaram como objeto de estudo apenas em DSMU e DSMB e estas são, predominantemente, magnesianas (Fo_{76-88}). Dos elementos traços estudados em olivina (Na, P, Sc, Ti, V, Cr, Co, Zn e Y), há o empobrecimento máximo de 10^{-2} e o enriquecimento de até 10 vezes o manto primitivo. As zonas cristalinas dos clinopiroxênios e olivinas em equilíbrio com o líquido foram determinadas por meio da constante de equilíbrio de troca catiônica de Mg e Fe^{2+} entre minerais e líquido, $K_D^{\text{Mg}^{2+}-\text{Fe}^{2+}}$. Segundo este critério, as bordas dos clinopiroxênios de DAPGG e DSMB e os centros de cristais de DSMU se encontram em equilíbrio com o líquido. Em DSMPN, a zona setorial mais pobre em Al, Ti e Fe e ETRs foi qualificada para o estudo do coeficiente de partição. Avaliaram-se as olivinas de textura e composição homogêneas de DSMB em equilíbrio com o líquido, ao contrário dos cristais de DSMU.

Os coeficientes de partição obtidos, $D_i^{\text{cpx/l}}$, $D_i^{\text{ol/l}}$, tal qual o grau de incompatibilidade dos elementos traços variam de dique para dique e indicam ser dependentes da composição do cristal e do líquido. Os elementos envolvidos no estudo de partição em clinopiroxênio foram Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, ETRs, Hf, Ta, Th e U e, no estudo em olivina, foram Na, P, Ca, Sc, Ti, V, Mn, Cr, Co, Ni, Zn e Y. Os resultados de $D_i^{\text{cpx/l}}$, $D_i^{\text{ol/l}}$ gerados integram o intervalo de dados da literatura. Observou-se que a crescente incorporação de high field strength elements (HFSE) está conectada a maior incorporação de Al no sítio T em clinopiroxênio. Da mesma forma, verificou-se que a menor estabilidade do Al no líquido diminui a incorporação HFSE nestes cristais. O grau de polimerização do líquido em DAPGG, evidenciada pelo parâmetro NBO/T, parece também influenciar nos baixos coeficientes de partição de elementos traços entre clinopiroxênio e o líquido. Em DSMU, DSMPN e DSMB, os valores de coeficientes são mais elevados que em DAPGG e apresentam líquidos com maior grau de polimerização. Os dados de $D_i^{\text{cpx/l}}$ seguem o comportamento predito pelo diagrama de Onuma e pelo modelo *Lattice Strain*. Por outro lado, o modelo desenvolvido em Wood e Blundy (1997) parece não expressar a influência da estrutura do líquido na partição dos elementos traços, principalmente, no líquido estudado menos polimerizado.

Abstract

The partition coefficients of trace elements between mafic minerals (clinopyroxene and olivine) and matrices assumed to be representative of the magmatic melt were obtained from ultrabasic alkaline dikes related to cretaceous magmatism at Southeast of Brazilian Platform. The four studied dikes, related to Arco de Ponta Grossa (DAPGG) and Serra do Mar (DSMU, DSMPN and DSMB) alkaline provinces, are porphyritic melanocratic bodies, with fine-grained to very fine-grained matrices, from which the former three are lamprophyres (monchiquite or camptonite) and the last one is olivine basalt. The rocks have potassic to ultrapotassic character and are classified as tephrites and basanites; the respective liquids of the last stage of magmatic differentiation (fine-grained to very fine-grained matrices) also are classified as tephrites and basanites. These rocks are enriched with incompatible elements, with about 10 to 100 times more heavy and light rare earth elements (REE) respectively related to the chondrite reservoir. The most abundant compositions are in Province of Arco de Ponta Grossa dike (DAPGG). The experimental procedures to obtain the representative liquid (magmatic melt) were characterized by two different methods. The direct analysis of the matrices by electron microprobe (EM) and by laser ablation inductively coupled plasma mass spectroscopy (LA-ICP-MS), both using a laser beam diameter of 100 μm was an effective option to study the more homogenous and fine-grained matrices (obtained on the border regions of DAPGG e DSMU). Bulk rock analysis by ray-X fluorescence and ICP-MS were made in selected hand-picked matrices devoid of megacrystal populations (this selection made use of a binocular magnifying glass). These procedures were applied to samples in which the size and shape of macrocrystals exceeded the matrix average (DSMPN, border samples and regions between center and border of DAPGG).

The choice of samples from the DSMB border as representatives of the dike liquid was as an alternative to compensate the limited availability of sample material. This was facilitated by mineralogical zoning of the dike. In general, the compositions of matrices differentiate from the respective bulk rock compositions by an abundance of normative felsic minerals, mainly orthoclase, albite and anorthite, and by an impoverishing of normative mafic minerals olivine and/or diopside, and also by an enrichment in incompatible elements. The clinopyroxene and olivine composition study was developed by chemical analysis by EM and LA-ICP-MS. The analysed crystals of clinopyroxene are zoned and classified as diopside, whose molecular end-member composition is restrict to the range of $\text{En}_{26-46}\text{Wo}_{42-52}\text{Fs}_{7-30}$. The enrichment of REE occurs from 4 to 198 times related to the chondrite reservoir, with patterns of REE distribution in a downward concave shape. The enrichment of REE is more pronounced for light than heavy elements and is more concentrated in clinopyroxenes from DSMPN and less in clinopyroxenes from DAPGG. Preserved olivine crystals were found and studied only at

DSMU and DSMB and they are representative of magnesian types (Fo₇₆₋₈₈). From the trace elements studied in olivine crystals (Na, P, Sc, Ti, V, Cr, Co, Zn e Y), there is the maximum impoverishment of 10⁻² and the enrichment of up to 10 times the condrite. The crystalline zones of clinopyroxenes and olivines in equilibrium with the liquid were defined through Mg-Fe²⁺ exchange equilibrium constant between minerals and liquid, $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$. According to this criterion, the borders of the clinopyroxenes from DAPGG and DSMB and the center of crystal from DSMU were in equilibrium with the liquid. In DSMPN, the poorest sector zoning in Al, Ti, Fe and REE was chosen to the partition coefficient study. The olivines with homogenous texture and composition from DSMB were studied in equilibrium with the liquid, unlike the olivine crystals from DSMU.

The absolute values of the partition coefficients obtained, $D_i^{cpx/l}$, $D_i^{ol/l}$, and the level of trace elements incompatibility vary dike by dike and they are dependent of crystalline controls and liquid composition. The elements involved in the partition studies were Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, ETRs, Hf, Ta, Th e U in clinopyroxene and Na, P, Ca, Sc, Ti, V, Mn, Cr, Co, Ni, Zn e Y in olivine. The results of $D_i^{cpx/l}$, $D_i^{ol/l}$ obtained are similar with the range of values from the literature. It was observed that the incorporation of high field strength elements (HFSE) is connected to the incorporation of Al into the T site in clinopyroxene.

Similary, it was noticed that the decreasing stability of Al into the liquid decreases the incorporation of HFSE in the clinopyroxenes. The level of polymerization of the liquid in DAPGG, showed by the NBO/T parameter, seems to influence the low partition coefficients of trace elements between the clinopyroxene and the liquid. In DSMU, DSMPN e DSMB, the coefficient values are higher than in DAPGG and the liquids show a higher level of polymerization. The results of $D_i^{cpx/l}$ follow the behaviour predicted by the Onuma diagram and by the Lattice Strain model. On the other hand, the model developed by Wood and Blundy (1997) seems not to express the influence of liquid structure in the partition of trace elements, notably in the more polymerized liquid studied.

Sumário

1. Introdução	1
1.1. <i>Objetivo e estrutura da dissertação</i>	4
2. Coeficiente de partição	6
2.1. <i>Definição</i>	7
2.2. <i>Determinação experimental de $D_i^{\alpha/\beta}$</i>	9
2.3. <i>Previsão do comportamento de partição de elementos traços</i>	11
2.3.1. <i>Diagrama de Onuma</i>	15
2.4. <i>Dependência de $D_i^{\alpha/\beta}$ com a composição, temperatura e pressão</i>	17
2.5. <i>Modelo Strain</i>	
Lattice	1
9	
3. Variação estrutural e composicional de olivinas de magmas mantélicos	23
3.1. <i>Estrutura e composição de olivina magnesiânica</i>	24
3.2. <i>Elementos menores e traço em cristais de olivina em sistemas básicos</i>	28
3.3. <i>Mecanismos de substituição iônica acoplada e por omissão em olivina</i>	29
3.4. <i>Variações cristalográficas com a temperatura, a pressão e a composição</i>	30
3.5. <i>Olivina em rochas máficas alcalinas</i>	31
4. Variação estrutural e composicional de clinopiroxênios de magmas mantélicos	33
4.1. <i>Estrutura e composição de clinopiroxênio</i>	33
4.2. <i>Influência da composição, temperatura e pressão em clinopiroxênios e a incorporação de elementos traços</i>	37
4.3. <i>Clinopiroxênio em rochas máficas alcalinas</i>	39
5. Procedimento experimental	41
5.1. <i>Introdução</i>	41
5.1.1. <i>Sequência analítica na determinação de elementos maiores, menores e traço em rochas silicáticas</i>	41
5.2. <i>Parte experimental</i>	46
5.2.1. <i>Instrumentação</i>	46
5.2.2. <i>Amostras, soluções, materiais para fabricação de lâminas e de descontaminação</i>	47
5.2.3. <i>Procedimento</i>	48
5.2.3.1. <i>Preparação de amostras</i>	48
5.2.3.2. <i>Preparação de pó para análise de rocha total por FRX e ICP-MS</i>	48
5.2.3.3. <i>Preparação de pó para análise de matriz por FRX e ICP-MS</i>	50
5.2.3.4. <i>Digestão ácida de amostras em forno microondas para análise por ICP-MS</i>	51
5.2.3.5. <i>Preparação de pastilhas fundidas</i>	52
5.2.3.6. <i>Preparação de lâminas delgadas</i>	53
5.2.4. <i>Procedimentos de análise</i>	54
5.2.4.1. <i>FRX</i>	54
5.2.4.2. <i>ICP-MS</i>	54
5.2.4.3. <i>MEV</i>	54
5.2.4.4. <i>ME</i>	56
5.2.4.5. <i>LA-ICP-MS</i>	57
5.3. <i>Tratamento de dados de química mineral</i>	60
5.3.1. <i>Olivina</i>	60
5.3.2. <i>Clinopiroxênio60</i>	
5.4. <i>Método experimental e tratamento de dados</i>	61
5.4.1. <i>Avaliação do método e dados químicos de rocha total, matriz e mineral</i>	61
5.4.2. <i>Análise pontual por LA-ICP-MS</i>	67
5.4.3. <i>Análise de matriz por ME e LA-ICP-MS</i>	69

6. Contextualização geológica, características petrográficas macroscópicas e Microscópicas	75
6.1. Introdução	75
6.1.1. Contexto geológico dos diques do estudo	76
6.2. Características macroscópicas e identificação das amostras	78
6.2.1. Dique básico intrusivo em sienogranitos do maciço Rio Guaraú - Província Alcalina Arco de Ponta Grossa - (DAPGG)	78
6.2.2. Dique básico intrusivo em granitos foliados do complexo costeiro, região de Ubatuba - província alcalina da Serra do Mar- (DSMU)	80
6.2.3. Dique básico intrusivo no maciço alcalino máfico e ultramáfico de Ponte Nova – Província da Serra do Mar - (DSMPN)	80
6.2.4. Dique básico intrusivo na suíte alcalina da Ilha de Búzios - Província Alcalina da Serra do Mar - (DSMB)	81
6.3. Petrografia	81
6.3.1. DAPGG	81
6.3.2. DSMU	86
6.3.3. DSMPN	90
6.3.4. DSMB	91
6.4. Ressalvas no uso do termo porfirítico	97
6.5. Considerações	98
7. Composição e classificação química de rocha total e de matriz	99
7.1. Introdução	99
7.2. Classificação química e descrição composicional de rocha total	100
7.3. Descrição química das matrizes obtidas pelos procedimentos de separação por catação e de análise direta	109
8. Química mineral de olivina e clinopiroxênio	120
8.1. Introdução	120
8.2. DAPGG	121
8.2.1. Clinopiroxênio	121
8.2.1.1. Classificação química de clinopiroxênio e soluções sólidas	121
8.2.1.2. Composição química de elementos maiores e menores em clinopiroxênio	123
8.2.1.3. Variações catiônicas em clinopiroxênio	128
8.2.1.4. Elementos traços em clinopiroxênio	130
8.3. DSMU	130
8.3.1. Olivina	130
8.3.1.1. Classificação de olivina e composição química de elementos maiores e menores	130
8.3.1.2. Variações catiônicas em olivina	134
8.3.1.3. Elementos traços em olivina	134
8.3.2. Clinopiroxênio	137
8.3.2.1. Classificação química de clinopiroxênio e soluções sólidas	137
8.3.2.2. Composição química de elementos maiores e menores em clinopiroxênio	141
8.3.2.3. Trocas catiônicas em clinopiroxênio	144
8.3.2.4. Elementos traços em clinopiroxênio	147
8.4. DSMPN	150
8.4.1. Clinopiroxênio	150
8.4.1.1. Classificação química de clinopiroxênio e soluções sólidas	150
8.4.1.2. Composição química de elementos maiores e menores em clinopiroxênio	150
8.4.1.3. Variações catiônicas em clinopiroxênio	154
8.4.1.4. Elementos traços em clinopiroxênio	157
8.5. DSMB	157

8.5.1. Olivina	157
8.5.1.1. Classificação e descrição composicional de elementos maiores e menores	157
8.5.1.2. Variações catiônicas em olivina	160
8.5.1.3. Elementos traços em olivina	160
8.5.2. Clinopiroxênio	163
8.5.2.1. Classificação química de clinopiroxênio e soluções sólidas	163
8.5.2.2. Composição química de elementos maiores e menores em clinopiroxênio	165
8.5.2.3. Variações catiônicas em clinopiroxênio	169
8.5.2.4. Elementos traços em clinopiroxênio	169
8.6. Considerações	169
9. Discussão	174
9.1. Algumas observações de química de rocha total e química mineral	174
9.2. Composição representativa do líquido	178
9.3. Equilíbrio químico entre cristal e o líquido hospedeiro e coeficiente de partição de elementos traços entre o cristal e o líquido	187
9.3.1. Determinação de zonas dos cristais de olivina e clinopiroxênio em equilíbrio com o líquido	190
9.3.1.1. Olivina	190
9.3.1.2. Clinopiroxênio	196
9.3.2. Coeficiente de partição e o modelo lattice Strain	207
9.3.2.1. Coeficiente de partição entre clinopiroxênio e o líquido, $D_i^{cpx/l}$, e o modelo Lattice Strain	207
9.3.2.1.1. Razões entre coeficientes de partição	217
9.3.2.1.2. Controle do cristal versus do líquido na partição de ETR e HFSE	218
9.3.2.1.3. Partição de elementos em cristal com zonamento setorial	225
9.3.2.1.4. Aplicação do modelo Lattice Strain em dados de clinopiroxênio	228
9.3.2.2. Coeficiente de partição entre olivina e o líquido, $D_i^{ol/l}$, e o modelo Lattice Strain	242
10. Considerações Finais	250
11. Referências	253

Índice de Figuras

Figura 1: Diagrama de Onuma (Onuma *et al.*, 1968), $\log D^{c/l}$ versus $r_{\text{iônico}}$. São indicados também os parâmetros do modelo *Lattice Strain* de acordo com a equação (12): r_0 é o tamanho iônico ótimo do íon a ser incorporado no sítio cristalino em estudo, $D_0^{c/l}$ é o coeficiente de partição de tensão compensada e E é o módulo de Young. Extraído de Wood e Blundy (2003). 16

Figura 2: Estrutura da olivina em A, B e C. Em B, é representada a cela unitária e, em C, destaca-se uma cadeia de octaedro em forma de serra. As estruturas estão orientadas por meio dos eixos cristalográficos. Imagem obtida pelo *software* XTALDRAW, conforme parâmetros encontrados em Birle *et al.* (1968). 25

Figura 3: Estrutura cristalográfica do clinopiroxênio. Em B é representada a cela unitária. As estruturas estão orientadas pelos eixos cristalográficos. Imagem obtida pelo *software* XTALDRAW, conforme parâmetros encontrados em Levien e Prewitt (1981). 34

Figura 4: Áreas de matriz analisadas por *spot* de 100 μm de diâmetro por ME. Os *spots* estão delimitados como círculos brancos e pretos. O número total deles para cada amostra foi de 64 (A), 64 (B), 49 (C), 52 (D) e 28 (E) e 28 (F). 71

Figura 5: Razão entre número de análises aceitáveis segundo o critério de qualidade (Veja subitem 5.4.1.) e número total de análises de uma determinada matriz por ME *versus* granulometria média da matriz em mm. 72

Figura 6: Fotomicrografias com aspectos texturais relevantes de DAPGG. A) Macrocristal poiquilítico de biotita, com inclusões de clinopiroxênio prismático - DAPGG-C1; B) Textura porfirítica e matriz seriada - DAPGG-C1; C) Olivina alterada - DAPGG-C2; D) Textura fluidal - DAPGG-BE; E) Macrocristal de diopsídio - DAPGG-B; F) Cristal de diopsídio com textura *cauda de andorinha* em desenvolvimento - DAPGG-I; G) Ocelo de carbonato e matriz alterada a uralita - DAPGG-I; H) Contato entre o dique e a encaixante - DAPGG - BE. Fotomicrografias obtidas com microscópio óptico com luz transmitida e analisador descruzado em A, B, D, F e H e cruzado em C, E e G. Abreviações - bt: biotita; cpx: clinopiroxênio; cb: mineral carbonático; ol: olivina; pl: plagioclásio. 84

Figura 7: Fotomicrografias de elétrons retroespalhados de cristais de DAPGG. A) Cristal de diopsídio com zonas concêntricas e feição de reabsorção - DAPGG-C1; B e C) Macrocristais zonados de diopsídio zonado - DAPGG-C2; D) Macrocristal de diopsídio zonado - DAPGG-B; E) Microcristal zonado de diopsídio e com feição de reabsorção - DAPGG-B; F) Microcristais prismáticos e alongados da matriz - DAPGG-I. Abreviações - bt: biotita; cpx: clinopiroxênio. 85

Figura 8: Fotomicrografias com aspectos texturais relevantes de DSMU. A) Textura porfirítica e intersertal - DSMU-B2; B e C) Macrocristais de olivina - DSMU-C; D) Ocelo constituído por plagioclásio, opaco, fase vítrea e kaersutita - DSMU-C; E) Macrocristais de clinopiroxênio que formam estruturas em V - DSMU-BE2; F) Contato entre o dique e a encaixante - DSMU-BE2. Fotomicrografias obtidas com microscópio óptico com luz transmitida e analisador descruzado em A, C, D, E, F e cruzado em B. Abreviações - cpx: clinopiroxênio; ks: kaersutita; ol: olivina. 88

Figura 9: Fotomicrografias de elétrons retroespalhados de cristais de DSMU. A, B e C) Macrocristais de olivina com distinção química entre borda e centro - DSMU-C; D) Microcristais zonados de clinopiroxênio da matriz - DSMU-C; E) Estruturas oclares preenchidas com plagioclásio, kaersutita e opaco - DSMU-C; F) Micro e macrocristais de clinopiroxênio que formam estruturas em V - DSMU-BE2. Abreviações - cpx: clinopiroxênio; ol: olivina. 89

Figura 10: Fotomicrografias com aspectos texturais relevantes de DSMPN. A) Textura porfirítica, macrocristal de clinopiroxênio com zonamento setorial; B) Macrocristal de diopsídio com zonamento concêntrico; C) Diopsídio com feição de reabsorção; D e E) Matriz formada por kaersutita, plagioclásio (pl), opaco e apatita; F) Contato entre clinopiroxênio e opaco que incorpora parte da matriz. Fotomicrografias obtidas com microscópio óptico com luz transmitida e analisador descruzado em B, D, E e F e cruzado em A e C. Abreviações - cpx: clinopiroxênio; pl: plagioclásio; ks: kaersutita; ap: apatita. 92

Figura 11: Fotomicrografias de elétrons retroespalhados de cristais de DSMPN. A, B, C) Textura porfirítica com tendência a poiquilítica e intergranular, megacristais de clinopiroxênio. D) Borda de clinopiroxênio com feição de reação. Abreviações - cpx: clinopiroxênio; pl: plagioclásio; ap: apatita. 93

Figura 12: Fotomicrografias com aspectos texturais relevantes de DSMB. A) Textura porfirítica e intersertal. Macrocrystal de clinopiroxênio zonado com feição de reabsorção no centro - DSMB-C; B) Macrocrystal de olivina com início de alteração a partir das bordas e fraturas - DSMB-C; C) Grão de plagioclásio com núcleo substituído e sobrecrecimento de plagioclásio mais limpo - DSMB-C; D) Cristal de clinopiroxênio da matriz com zonamento setorial - DSMU-C; E e F) Matriz composta por clinopiroxênio, kaersutita, biotita, plagioclásio, opaco e vidro - DSMB-C; G e H) Ocelo constituído por feldspato e analcima - DSMB-B. Fotomicrografias obtidas com microscópio óptico com luz transmitida e analisador descruzado em B, C, F e G e cruzado em A, D, E e H. Abreviações - bt: biotita; cpx: clinopiroxênio; ol: olivina; pl: plagioclásio; ks: kaersutita; fsp: feldspato; anl: analcima. 95

Figura 13: Fotomicrografias de elétrons retroespalhados de cristais de DSMB. A) Interação entre cristal de diopsídio e os microlitos - DSMB-C; B) Parte de um xenólito que é constituído por plagioclásio, olivina, clinopiroxênio e apatita - DSMB-C; C) Microcrystal de diopsídio com zonamento setorial - DSMB-C; D) Microcrystal de diopsídio da matriz com zonas concêntricas e núcleo com feição de reabsorção - DSMB-C; E) Microcrystal de diopsídio com zonamento concêntrico e setorial - DSMB-C; F) Microcristais da matriz e zonamento setorial - DSMB-C. Abreviações - cpx: clinopiroxênio; ol: olivina; pl: plagioclásio; ap: apatita. 96

Figura 14: Classificação química dos diques DAPGG, DSMB, DSMU e DSMPN segundo o diagrama TAS (Le Maitre, 2002) e de acordo com o diagrama R1 e R2 (De La Roche *et al.*, 1980). Os setores estão designados pelas letras C (centro), I (intermediário), B (borda) e BE (borda-encaixante). Nos diagramas, estão incluídas as análises de matriz por Microsonda Eletrônica (terminação em ME) ou da seleção por catação (terminação em M). Os óxidos foram normalizados na base anidra e se encontram em % mm⁻¹ em A), C) e E). A quantidade de óxidos normalizados na base anidra foi transformada em 10⁶ cátions em B), D) e F). Em A) e B), estão os dados de DAPGG, em C) e D), os dados de DSMU e, em E) e F), encontram-se os de DSMB e DSMPN. Nos diagramas, também estão representados composições de olivina e de clinopiroxênio dos diques. 101

Figura 15: Diagrama K₂O versus Na₂O em % em massa (m/m). Os campos indicam as três séries das rochas alcalinas: ultrapotássica, potássica e sódica (Middlemost, 1975). 102

Figura 16: Diagramas binários de Cr + Ni + Co em ppm (A, C) e ΣETRs em ppm (B, D) versus mg# [(MgO)/(MgO + FeO)] x 100, termos em mol para os diques DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB. Estão representadas as composições de setores dos diques e cristais de olivina e clinopiroxênio. 106

Figura 17: (A, C, E, G) Valores experimentais de fração mássica de elementos incompatíveis normalizados pelos respectivos valores no manto primitivo (pirolito). (B, D, F, H) Valores de fração mássica de ETR obtidos normalizados pelo condrito. Dados normalizadores são de McDonough e Sun (1995). Diagramas A e B (DAPGG), C e D (DSMB), E e F (DSMU) e G e H (DSMPN). 108

Figura 18: Diagramas binários de óxidos de elementos maiores e menores em % m/m versus mg# nos diques DAPGG, DSPM, DSMBU e DSMB. O mg# foi calculado segundo a expressão $[MgO/(MgO+FeO_t)] \times 100$, com os termos em mol. 110

Figura 19: Diagramas binários de elementos traços em ppm versus mg# nos diques DAPGG, DSMU, DSMB e DSMPN. O mg# foi calculado segundo a expressão $[MgO/(MgO+FeO_t)] \times 100$, com os termos em mol. 112

Figura 20: Diagrama de elementos traços normalizados de análise de matriz e dados normalizados da rocha de partida. (A, C, E) Valores experimentais de fração mássica de elementos traços incompatíveis normalizados pelos respectivos valores no manto primitivo (pirolito). (B, D, F) Valores de fração mássica de ETR obtidos normalizados pelo condrito. Dados normalizadores são de McDonough e Sun (1995). Diagramas A e B (DAPGG), C e D (DSMU) e E e F (DSMPN). 119

Figura 21: Denominações e identificações por textura de zonas em cristais de clinopiroxênio com zonamento concêntrico. As siglas c, i e b na fotomicrografia produzida por MEV indicam centro, intermediário, borda, respectivamente. As zonas internas são limitas por linhas pontilhadas. 122

Figura 22: Diagrama de classificação de piroxênio cálcico ferromagnesiano de DAPGG por Morimoto *et al.* (1988), onde $\text{Ca} + \text{Mg} + (\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}) = 100\%$, sendo Ca equivalente a Wo, Mg a En e $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}$ a Fs, em apfu. Na legenda, b é a borda, i é a região intermediária e c é o centro. 122

Figura 23: Diagrama ternário Mg - Na - $(\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} - \text{Na} + \text{Mn})$, onde constam dados de clinopiroxênio de DAPGG. São indicadas tendências composicionais de clinopiroxênio dentro de algumas séries de rochas alcalinas pertencentes às seguintes localidades: A=Morotu; B=Uganda; C=Itapirapuã; D= Iron Hill; E= South Qôroq Centre. Diagrama retirado de Barbieri *et al.* (1987). 124

Figura 24: Diagrama de $\text{Fe}^{3+} + \text{Ti}^{4+} + \text{Al}^{3+}$ no sítio M1 e em apfu *versus* Mg^{2+} em M1 de clinopiroxênios de DAPGG. Destaca-se a proporção de membros finais em função da ocupação catiônica em M1. Veja legenda da Figura 23. 124

Figura 25: Diagrama binário de elementos maiores e menores de clinopiroxênios de DAPGG em apfu *versus* $\text{mg}\#_{\text{cpx}}$. O $\text{mg}\#_{\text{cpx}}$ foi calculado na forma $[(\text{Mg})/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}_{\text{t}})] \times 100$, com os termos em apfu. 125

Figura 26: Diagrama de $na = \text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$ *versus* $\text{mg}\# = [(\text{Mg})/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}_{\text{t}})] \times 100$, com os termos em apfu. Relação utilizada para classificar o tipo de zonamento químico em clinopiroxênio de DAPGG segundo Rock *et al.* (1994). 127

Figura 27: Estudo de variações catiônicas de elementos maiores e menores nos sítios M1 e M2 em clinopiroxênio de DAPGG. 129

Figura 28: Estudo variações catiônicas entre os sítios T e M1 em clinopiroxênio de DAPGG. 131

Figura 29: Diagrama multielementar de fração mássica de elementos traços em clinopiroxênio de DAPGG normalizadas pelos respectivos valores encontrados no manto primitivo (A) e no condrito (B), de acordo com os valores normalizadores de McDonough e Sun (1995). 131

Figura 30: Diagramas binários dos elementos traços em ppm em clinopiroxênios *versus* $\text{mg}\#_{\text{cpx}}$ de DAPGG. O $\text{mg}\#_{\text{cpx}}$ foi calculado segundo a expressão $[(\text{Mg})/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}_{\text{t}})] \times 100$, com termos em apfu. 132

Figura 31: Localização de zonas em olivina de DSMU por textura em fotomicrografia por microsonda eletrônica - elétron retroespalhado. A letra b indica a borda e c é o centro. As zonas são separadas pela linha pontilhada no cristal. 133

Figura 32: Solução sólida de forsterita (Mg_2SiO_4), Fo, e faialita (Fe_2SiO_4), Fa, em cristais de olivina de DSMU. No diagrama, são identificados as zonas e os dados de micro e macrocristais. 133

Figura 33: Diagramas binários da proporção catiônica de Mn^{2+} (A), Ca^{2+} (B) e Ni^{2+} (C) em apfu de olivinas de DSMU *versus* $\text{mg}\#_{\text{ol}}$, sendo que $\text{mg}\#_{\text{ol}}$ é igual a $[\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}_{\text{t}})] \times 100$, com os termos em apfu. 135

Figura 34: Diagramas binários em apfu que representam as variações catiônicas, A) $\text{Fe}^{2+} \times \text{Mg}^{2+}$ e B) $\text{Ni}^{2+} \times \text{Ca}^{2+} + \text{Mn}^{2+}$, nos cristais de olivina de DSMU. O coef. ang. é o coeficiente angular da curva de regressão linear dos pontos experimentais e r^2 é o coeficiente de determinação. 136

Figura 35: Valores dos elementos menores (Mn, Ni e Ca) e traços (Cr, Co, Zn, Na, P, V, Ti, Sc, Cu) normalizados pelos respectivos valores no manto primitivo (McDonough e Sun, 1995) nas olivinas de DSMU. 138

Figura 36: Diagramas binários da fração mássica de elementos traços (Cr, Co, Zn, Cu, Na, P, V, Ti, Sc) em ppm *versus* $\text{mg}\#_{\text{ol}}$ dos cristais de olivina de DSMU. O $\text{mg}\#_{\text{ol}}$ foi calculado segundo a expressão $[\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}_{\text{t}})] \times 100$, com os termos em apfu. 139

Figura 37: Grãos de clinopiroxênio de DSMU. As regiões centrais dos cristais, c, são limitados por linha pontilhada branca. A borda, b, é indicada por seta. 140

Figura 38: Diagrama de classificação dos cristais de piroxênios cálcicos ferromagnesianos de DSMU. Tem-se que $Ca + Mg + (Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mn) = 100\%$, sendo Ca equivalente a Wo, Mg a En e En e $Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mn$ a Fs. Na legenda, b é borda e c é o centro. 140

Figura 39: Diagrama ternário Mg - Na - $(Fe^{2+} + Fe^{3+} - Na + Mn)$, onde constam dados de clinopiroxênio de DSMU. As tendências composicionais de clinopiroxênio dentro da evolução de magmas alcalinos pertencem às rochas alcalinas das seguintes localidades: A=Morotu; B=Uganda; C=Itapirapuã; D= Iron Hill; E= South Qôroq Centre. Diagrama retirado de Barbieri *et al.* (1987). 142

Figura 40: Diagrama de $Fe^{3+} + Ti^{4+} + Al^{3+}$ no sítio M1 *versus* Mg^{2+} no sítio M1 em apfu nos clinopiroxênios de DSMU. Destaca-se a proporção de membros finais em função da ocupação catiônica em M1. 142

Figura 41: Diagrama binário de elementos maiores e menores em clinopiroxênios de DSMU em apfu *versus* $mg\#_{cpx}$. O $mg\#_{cpx}$ foi calculado na forma $[(Mg)/(Mg+Fe^{2+}_t)] \times 100$, com os termos em apfu. Os dados iguais a zero são resultados que ficaram abaixo do limite de quantificação da técnica analítica. 143

Figura 42: Diagrama de $na = Na/(Na + Ca)$ *versus* $mg\# = [(Mg)/(Mg + Fe^{2+}_t)] \times 100$, com os termos em apfu. Relação utilizada para classificar o tipo de zonamento químico em clinopiroxênio de DSMU segundo Rock *et al.* (1994). 145

Figura 43: Estudo de variações catiônicas em clinopiroxênio de DSMU entre cátions de elementos maiores e menores nos sítios M1 e M2. 146

Figura 44: Estudo de variações catiônicas entre os sítios T e M1 em clinopiroxênios de DSMU. Nos diagramas, os cátions estão em apfu. 148

Figura 45: Diagrama multielementar de frações mássicas de elementos traços em clinopiroxênio de DSMU normalizadas pelos respectivos valores encontrados no manto primitivo (A) e no condrito (B), de acordo com os valores de McDonough e Sun (1995). 149

Figura 46: Diagrama de classificação de clinopiroxênio (Morimoto *et al.*, 1988) com dado mineral de clinopiroxênio de DSMPN. Tem-se que $Ca + Mg + (Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mn) = 100\%$, sendo Ca equivalente a Wo, Mg a En e $Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mn$ a Fs. Na legenda, b é borda e c é o centro. 151

Figura 47: Diagrama ternário Mg - Na - $(Fe^{2+} + Fe^{3+} - Na + Mn)$, onde constam dados de clinopiroxênio de DSMPN. As tendências composicionais de clinopiroxênio dentro da evolução de magmas alcalinos pertencem às rochas alcalinas das seguintes localidades: A=Morotu; B=Uganda; C=Itapirapuã; D= Iron Hill; E= South Qôroq Centre. Diagrama retirado de Barbieri *et al.* (1987). 151

Figura 48: Diagrama de $Fe^{3+} + Ti^{4+} + Al^{3+}$ no sítio M1 *versus* Mg^{2+} em M1 e em apfu de clinopiroxênios de DSMPN. Destaca-se a proporção de membros finais em função da ocupação catiônica em M1. 152

Figura 49: Diagrama binário de elementos maiores e menores de clinopiroxênios de DSMPN em apfu *versus* $mg\#_{cpx}$. O $mg\#_{cpx}$ foi calculado na forma $[(Mg)/(Mg + Fe^{2+}_t)] \times 100$, com os termos em apfu. 153

Figura 50: Diagrama de $na = Na/(Na + Ca)$ *versus* $mg\# = [(Mg)/(Mg + Fe^{2+}_t)] \times 100$, com os termos em apfu. Relação utilizada para classificar o tipo de zonamento químico em clinopiroxênio de DSMPN segundo Rock *et al.* (1994). 155

Figura 51: Estudo de variações catiônicas em clinopiroxênio de DSMPN entre cátions de elementos maiores e menores nos sítios M1 e M2. 156

Figura 52: Estudo de variações catiônicas entre os sítios T e M1 em clinopiroxênios de DSMPN. Os dados estão em apfu. 158

Figura 53: Diagrama multielementar de frações mássicas de elementos traços em clinopiroxênio de DSMPN normalizadas pelos respectivos valores encontrados no manto primitivo (A) e no condrito (B), de acordo com os valores de McDonough e Sun (1995). 159

Figura 54: Solução sólida de forsterita (Mg_2SiO_4), Fo, e faialita (Fe_2SiO_4), Fa, em cristais de olivina de DSMB. No diagrama, são identificadas as zonas centro e borda. 161

Figura 55: Estudo de variações catiônica em olivinas de DSMB. Os dados estão em apfu. O coef. ang. é o coeficiente angular da reta de regressão linear dos dados experimentais e r^2 é o coeficiente de determinação desta mesma reta. 161

Figura 56: Elementos menores e traços de cristais de olivina de DSMB normalizados pelos elementos correspondentes em manto primitivo. Os valores normalizadores são de McDonough e Sun (1995). 162

Figura 57: Fotomicrografias de cristais de clinopiroxênio de DSMB obtidas por MEV que exemplificam denominações de regiões: borda (b), centro (c) e região intermediária (i). 164

Figura 58: Diagrama de classificação dos cristais de piroxênios cálcicos ferromagnesianos de DSMB. Tem-se que $\text{Ca} + \text{Mg} + (\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}) = 100\%$, sendo Ca equivalente a Wo, Mg a En e $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}$ a Fs. Na legenda, b é borda e c é o centro. 164

Figura 59: Diagrama ternário Mg - Na - ($\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} - \text{Na} + \text{Mn}$), onde constam dados de clinopiroxênio de DSMB. As tendências composicionais de clinopiroxênio dentro da evolução de magmas alcalinos pertencem às rochas alcalinas das seguintes localidades: A=Morotu; B=Uganda; C=Itapirapuã; D= Iron Hill; E= South Qôroq Centre. Diagrama retirado de Barbieri *et al.* (1987). 166

Figura 60: Diagrama de $\text{Fe}^{3+} + \text{Ti}^{4+} + \text{Al}^{3+}$ no sítio M1 *versus* Mg^{2+} em M1 de clinopiroxênios de DSMB. Ambos os eixos se encontram em apfu. Destaca-se a proporção de membros finais em função da ocupação catiônica em M1. Veja legenda na Figura 59. 166

Figura 61: Diagrama binário de elementos maiores e menores de clinopiroxênios de DSMB em apfu *versus* $\text{mg}\#_{\text{cpx}}$. O $\text{mg}\#_{\text{cpx}}$ foi calculado na forma $[(\text{Mg})/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}_{\text{t}})] \times 100$, com os termos em apfu. Os dados iguais a zero são resultados que ficaram abaixo do limite de quantificação da técnica analítica. 167

Figura 62: Diagrama de $\text{na} = \text{Na}/(\text{Na} + \text{Ca})$ *versus* $\text{mg}\# = [(\text{Mg})/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}_{\text{t}})] \times 100$, com os termos em apfu. Relação utilizada para classificar o tipo de zonamento químico em clinopiroxênio de DSMB segundo Rock *et al.* (1994). 168

Figura 63: Estudo de variações catiônicas em clinopiroxênio de DSMB entre cátions de elementos maiores e menores nos sítios M1 e M2. 170

Figura 64: Estudo de variações catiônicas entre os sítios T e M1 em clinopiroxênios de DSMB. Nos diagramas, os cátions estão em apfu. 171

Figura 65: Diagrama multielementar de frações mássicas de elementos traços em clinopiroxênio de DSMB normalizadas pelos respectivos valores encontrados no manto primitivo (A) e no condrito (B), de acordo com os valores de McDonough e Sun (1995). 172

Figura 66: A) Diagrama $\text{CaO} / \text{Al}_2\text{O}_3$ *versus* $\text{mg}\#$ para os dados de rocha total e análise de matriz dos corpos DAPGG, DSMU, DSMB e DSMPN. B) Diagrama $\text{CaO} / \text{Al}_2\text{O}_3$ *versus* $\text{mg}\#$ com dados de rocha total, matriz e de clinopiroxênio de cada dique. O termo $\text{mg}\#$ foi calculado de acordo com a relação $[(\text{MgO})/(\text{MgO} + \text{FeO}) \times 100]$. 177

Figura 67: Fração mássica, x, em m/m (salvo $\text{mg}\#$) de óxidos de elementos maiores e menores (B, C, D) ou elementos menores e traços (de E a M) em ppm em rocha total e matriz de DAPGG. São mostrados os resultados das análises de material matricial separado por catação (final M) e de análise direta por ME ou LA-ICP-MS (final ME). As razões da escolha das análises para compor a média da matriz estão discutidas no texto. 180

Figura 68: Fração mássica, x, em m/m (salvo $\text{mg}\#$) de óxidos de elementos maiores e menores (B, C e D) ou de elementos menores e traços (de E a L) em ppm em rocha total e matriz de DSMU. São mostrados os resultados das análises de material matricial separado por catação (final M) e de análise direta por ME (final ME). As razões da escolha da análise DSMU-B2(ME) como representativa da matriz estão discutidas no texto. 183

Figura 69: Diagramas de equilíbrio mg# da olivina *versus* mg# do líquido. As linhas contínuas foram calculadas por meio do $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ para os respectivos diques e as linhas pontilhadas através de $\pm \Delta K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ (Tabela 21). Os diagramas A e B correspondem aos dados de DSMB, com mg# do líquido de 51,6 e os diagramas C, D, E e F aos dados de DSMU cujo mg# do líquido é de 55,0. 193

Figura 70: Diagramas multielementares de fração mássica de elementos traços, i, em olivina dividida pela fração mássica dos mesmos elementos no líquido: pares em equilíbrio, x_{ol}/x_l , e pares em desequilíbrio, x_{ol}'/x_l' . Os símbolos em preto em A) são razões construídas com composições dos cristais de olivina em equilíbrio químico com o líquido hospedeiro de DSMB, de acordo com a Figura 69. Em B), os símbolos pretos são razões com composições das zonas da olivina mais próximas do equilíbrio com o líquido em DSMU. 195

Figura 71: Diagramas de Al^{3+} no sítio M1 (Al^{VI}) *versus* Al^{3+} no sítio T (Al^{IV}), ambos em apfu, em clinopiroxênio de DAPGG (A) e DSMPN (B). Os campos representados nos diagramas são baseados em Aoki e Kushiro (1968). 199

Figura 72: Diagramas de Al^{3+} no sítio M1 (Al^{VI}) *versus* Al^{3+} no sítio T (Al^{IV}), ambos em apfu, em clinopiroxênio de DSMU (A) e DSMB (B). Os campos representados nos diagramas são baseados em Aoki e Kushiro (1968). 200

Figura 73: Diagramas de equilíbrio mg# do líquido *versus* mg# do clinopiroxênio. As linhas contínuas foram calculadas por meio do $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ para os respectivos diques e as linhas pontilhadas através de $\pm \Delta K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ (Tabela 23). Os diagramas A, B, C e D correspondem aos dados de DAPGG, com mg# do líquido de 52,7 e os diagramas E e F aos dados de DSMPN, cujo mg# do líquido é de 41,3. 203

Figura 74: Diagramas de equilíbrio mg# do líquido *versus* mg# do clinopiroxênio. As linhas contínuas foram calculadas por meio do $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ para os respectivos diques e as linhas pontilhadas através de $\pm \Delta K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ (Tabela 23). Os diagramas A, B, C e D correspondem aos dados de DSMB, com mg# do líquido de 51,6 e os diagramas E e F aos dados de DSMU, cujo mg# do líquido é de 55,0. 204

Figura 75: Diagramas multielementares de fração mássica de elementos traços, i, em clinopiroxênio dividida pela fração mássica dos mesmos elementos no líquido: x_i^{cpx}/x_l , pares em equilíbrio; $x_i^{cpx'}/x_l'$, pares em desequilíbrio. Os símbolos em preto são composições de regiões em equilíbrio químico dos cristais de acordo com as Figuras 73 e 74 com o líquido hospedeiro. 208

Figura 76: Coeficiente de partição de elementos traços entre clinopiroxênio e a matriz de DAPGG, DSMPN, DSMB e DSMU. Estão representadas barras de erros cujo cálculo é descrito no texto. 212

Figura 77: Em A e C, coeficientes de partição de elementos traços entre clinopiroxênio e o líquido de DAPGG, DSMPN, DSMB, DSMU e dados da literatura. Em B, são representados dados composicionais de alguns elementos traços do líquido normalizados pelos respectivos valores no manto primitivo e, em D, estão os dados de de ETRs no líquido normalizados pelos valores no condrito. Os valores normalizadores são de Dounough e Sun (1995). As abreviações são basanito/tefrito (B/T), traquiandesito basáltico (BTA), fonolito (F) e traquibasilto (TB). 214

Figura 78: Diagramas binários de A) D_{La} / D_{Er} em M2 em clinopiroxênio *versus* $Al^{3+}M1$, B) D_{Nb} / D_{Ta} *versus* D_{Hf} / D_{Zr} em clinopiroxênio, C) D_Y / D_{Ho} *versus* D_{Hf} / D_{Zr} em clinopiroxênio, D) $Cr^{3+}+Al^{3+}+Ti^{4+}+Fe^{3+}$ em M1 em apfu *versus* Al^{3+} em T em apfu E) D_{Hf} / D_{Zr} *versus* $Cr^{3+}+Al^{3+}+Ti^{4+}+Fe^{3+}$ em M1 (apfu). 216

Figura 79: Diagramas binários de D_{Er} , D_{Hf} e D_{Ta} , *versus* TAl^{3+} , $Cr^{3+}+Al^{3+}+Ti^{4+}+Fe^{3+}$ no sítio M1, $M1Na^+$, $M1Al^{3+}$ em clinopiroxênio. 219

Figura 80: Diagramas binários de D_{La} , D_{Er} , D_{Hf} e D_{Ta} *versus* $Ca^{2+}M2$ em clinopiroxênio, mg#_{cpx}, mg# e NBO/T. 220

Figura 81: Diagramas binários de coeficiente de partição de Y, La, Gd, Er, Hf, Zr, Nb e Ta entre o clinopiroxênio e o líquido *versus* $(K^+ + Na^+)/Al^{3+}$ (com os termos em apfu). 224

Figura 82: Coeficiente de partição de elementos traços entre as zonas c1 e c2 do cristal cpx 4 de DSMPN e o líquido. Este cristal apresenta zonamento setorial, sendo que c1 corresponde a zona mais rica de Al, Ti e Fe e c2 mais rica em Si e Mg. 225

Figura 83: Diagrama de Onuma: coeficiente de partição de ETRs entre clinopiroxênio cpx 4 e o líquido de DSMPN versus raio iônico (r) em Å. 225

Figura 84: Diagrama de Onuma e ajuste do modelo *Lattice Strain* pela equação (1) da Tabela 27 aos dados experimentais de partição de elementos traços entre o clinopiroxênio e o líquido de DAPGG. A) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{cpx/l}$, versus raio iônico em Å (r) de elementos no sítio cristalino M2; B) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{cpx/l}$, versus raio iônico em Å (r) de elementos no sítio cristalino M1. A curva tracejada indica que o modelo *Lattice Strain* não pode ser devidamente ajustado devido a falta de dados de elementos com aquela carga elétrica. 229

Figura 85: Diagrama de Onuma e ajuste do modelo *Lattice Strain* pela equação (1) da Tabela 27 aos dados experimentais de partição de elementos traços entre o clinopiroxênio e o líquido de DSMPN. A) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{cpx/l}$, versus raio iônico em Å (r) de elementos no sítio cristalino M2; B) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{cpx/l}$, versus raio iônico em Å (r) de elementos no sítio cristalino M1. A curva tracejada indica que o modelo *Lattice Strain* não pode ser devidamente ajustado devido a falta de dados de elementos com aquela carga elétrica. 230

Figura 86: Diagrama de Onuma e ajuste do modelo *Lattice Strain* pela equação (1) da Tabela 27 aos dados experimentais de partição de elementos traços entre o clinopiroxênio e o líquido de DSMU. A) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{cpx/l}$, versus raio iônico em Å (r) de elementos no sítio cristalino M2; B) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{cpx/l}$, versus raio iônico em Å (r) de elementos no sítio cristalino M1. A curva tracejada indica que o modelo *Lattice Strain* não pode ser devidamente ajustado devido a falta de dados de elementos com aquela carga elétrica. 231

Figura 87: Diagrama de Onuma e ajuste do modelo *Lattice Strain* pela equação (1) da Tabela 27 aos dados experimentais de partição de elementos traços entre o clinopiroxênio e o líquido de DSMB. A) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{cpx/l}$, versus raio iônico em Å (r) de elementos no sítio cristalino M2; B) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{cpx/l}$, versus raio iônico em Å (r) de elementos no sítio cristalino M1. A curva tracejada indica que o modelo *Lattice Strain* não pode ser devidamente ajustado devido a falta de dados de elementos com aquela carga elétrica. 232

Figura 88: Diagrama de Onuma (Onuma *et al.*, 1968) - coeficiente de partição para os cátions com carga 3+ que é incorporado no sítio M2 do clinopiroxênio, $D_i^{cpx/l}$, versus o raio iônico em Å. São mostrados $D_i^{cpx/l}$ obtidos experimentalmente para DAPGG e DSMU, valores calculados a partir a composição do cristal e do mg# do líquido (Wood e Blundy, 1997) e valores resultantes do ajuste aos dados experimentais da curva gerada pela equação (1) da Tabela 27. 238

Figura 89: Diagrama de Onuma (Onuma *et al.*, 1968) - coeficiente de partição para os cátions com carga 3+ que é incorporado no sítio M2 do clinopiroxênio, $D_i^{cpx/l}$, versus o raio iônico em Å. São mostrados $D_i^{cpx/l}$ obtidos experimentalmente para DSMPN e DSMB, valores calculados a partir a composição do cristal e do mg# do líquido (Wood e Blundy, 1997) e valores resultantes do ajuste aos dados experimentais da curva gerada pela equação (1) da Tabela 27. 239

Figura 90: Diagrama de Onuma - dados experimentais de partição, $D_i^{ol/l}$, dos elementos i entre a olivina e o líquido de DSMB em (A) versus o raio iônico em Å. Razão entre as frações mássicas dos elementos i na borda da olivina e no líquido em (B) e no centro da olivina e o líquido de DSMU em (C) versus raio iônico em Å. Neste texto, x_i^{ol}/x_i^l simboliza pares em desequilíbrio químico. 243

Figura 91: Coeficiente partição médio de elementos traços entre a olivina e o líquido de composição basanítica de DSMB. São também representados os dados da razão entre as frações mássicas dos elementos i na borda da olivina e no líquido e no centro da olivina e no líquido de DSMU, x_i^{ol}/x_i^l . 248

Figura 92: Coeficientes de partição de elementos traços entre a olivina e o líquidos em diversos sistemas. São representadas também as razões formadas pelos pares composicionais dos elementos i (na olivina e no líquido) de DSMU, x_i^{ol} / x_i^l .

249

Índice de Tabela

Tabela 1: Resumo das características gerais das técnicas utilizadas para análises químicas ou para obtenção de materiais de apoio (fotomicrografias). Abreviações: ND (não destrutivo), D (destrutivo), S (sensibilidade), Z (número atômico), AP (análise pontual), e⁻ (elétrons) e LD (limite de detecção), WDS (wavelength dispersive spectroscopy), EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy). Referências: Denoyer et al. (1991), Potts (1987), Reed (2005), Dedavid et al. (2007) e este trabalho. 45

Tabela 2: Código das amostras e número de análises por amostra na determinação de elementos maiores, menores e traço pelas diferentes técnicas utilizadas neste trabalho. Legenda: FRX (fluorescência de raio X); ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry); LA-ICP-MS (laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry) e ME (microsonda eletrônica). 49

Tabela 3: Programa de aquecimento do forno de microondas para a dissolução de rochas básicas. A Pot é a potência aplicada ao magnetron, P a pressão nominal dentro dos tubos de PFA, T é o tempo total do estágio, TAP (time at pressure) é o tempo do estágio com a pressão definida em P e FAN é a exaustão aplicada internamente. 55

Tabela 4: Tabela 4: Número de análises por amostra na determinação de elementos maiores por FRX em pastilha fundida e de elementos traços por dois diferentes métodos de preparação de amostra (pastilha fundida dissolvida em HNO₃ e amostra dissolvida em meio de HF + HNO₃ em forno de microondas) e analisada por ICP-MS. As letras A e B se referem às análises realizadas nas duas respectivas frações selecionadas de cada amostra. A letra M após o código da amostra indica ser a matriz obtida pelo processo de catação manual. 55

Tabela 5: Condições instrumentais do ICP-MS empregados na análise de amostras dissolvida em HF + HNO₃ em forno microondas. 58

Tabela 6: Algumas condições instrumentais do ME. O comprimento de onda, λ , a linha espectral do raio X como o cristal analisador são comuns à análise da olivina, clinopiroxênio e de matriz. Não se assemelham quanto à voltagem aplicada na janela do detector. A corrente da fonte de elétrons foi de 20 nA, e a voltagem de aceleração foi de 15 kV. 58

Tabela 7: Materiais de referência, MR, utilizados para calibração da ME nas análises de olivina, clinopiroxênio e matriz. O nome dos minerais está abreviado sendo que Ol (olivina), An (anortita), Fa (faialita), Wo (wollastonita), Or (ortoclásio), R (rutilo), Cm (cromita), Ab (albita) e Ap (apatita). C é a fração mássica (m/m) em porcentagem dos óxidos nos materiais de referência. 59

Tabela 8: Condições experimentais do laser na análise direta de olivina, clinopiroxênio e matriz por LA-ICP-MS. São mostradas as condições para análise no modo spot e raster. D é o diâmetro do feixe, f é a frequência, J/cm² é a densidade de energia. 59

Tabela 9: Dados médios de limite de quantificação e de desvio padrão relativo das duplicatas(n) na análise de elementos maiores e menores em rocha total e matriz (catação) por FRX. Os dados são apresentados para os elementos na forma de óxido. O DPR das análises individuais não foi fornecido pelo laboratório Acmlab®. Os dados das n-plicatas e das respectivas médias estão apresentados nas Tabelas 1A e 2A (Anexo). 63

Tabela 10: Dados médios de limite de quantificação (LQ), desvio padrão relativo (DPR) fornecido pelo equipamento e o desvio padrão relativo de duplicatas (DPR(n)). O primeiro método (1) consiste na análise por ICP-MS de amostra dissolvida em meio ácido em forno microondas e o segundo (2), na análise da pérola de amostra dissolvida em meio ácido. Os valores em negrito indicam resultados não satisfatórios. O DPR (m) é o valor resultante da média gerada considerando os resultados dos dois métodos. Os dados das n-plicatas estão apresentados nas Tabelas 1A e 2A. 64

Tabela 11: Valores médios de LQ e DPR (fornecidos pelo equipamento) para óxidos de elementos maiores e menores obtidos na análise de clinopiroxênio, olivina e matriz por ME. Espaço sem valor significa que ou o elemento não foi analisado, ou o resultado da análise esteve abaixo de LQ. 65

Tabela 12: Dados médios de LQ e DPR (fornecidos pelo equipamento) da análise de olivina, clinopiroxênio e matriz, respectivamente, por LA-ICP-MS dos resultados aceitáveis. 66

Tabela 13: Intervalo de confiança cujos valores de fração mássica dos elementos traços obtidos dos materiais de referência são considerados concordantes com os valores tabelados segundo o teste t-Student. Análise de rocha total foi realizada por ICP-MS e da olivina, clinopiroxênio (cpx) e matriz por LA-ICP-MS. 68

Tabela 14: DPR (n) das análises (consecutivas) de elementos maiores e menores em matriz por ME para as amostras DAPGG-BE(ME), DAPGG-B(ME) e DSMU-B2(ME). O número de análises, n, para cada amostra é 52, 48 e 25. 73

Tabela 15: DPR(n) das médias das análises (consecutivas) de elementos traços em matriz por LA-ICP-MS para as amostras DAPGG-BE(ME), DAPGG-B(ME) e DSMU-B2(ME). O número de análises, n, para cada amostra é 13, 7 e 11, respectivamente. Cada análise correspondeu a área de 4 spots de 100 µm de diâmetro sendo assim em números de spots igual a 52, 28 e 44. 74

Tabela 16: Relação de diques e amostras. Os códigos de identificação de dique e amostras são DAPGG (Dique básico intrusivo em sienogranitos do maciço Rio Guaraú - Província Alcalina Arco de Ponta Grossa), DSMU (Dique básico intrusivo em granitos foliados do complexo costeiro, região de Ubatuba - Província Alcalina da Serra do Mar), DSMPN (Dique básico intrusivo no maciço alcalino máfico e ultramáfico de Ponte Nova – Província da Serra do Mar) e DSMB (Diques básicos intrusivos na suíte alcalina da Ilha de Búzios - Província Alcalina da Serra do Mar). A letra C se refere ao centro, I a intermediário, B a borda e BE a borda-encaixante. São fornecidas também informações sobre a localização dos corpos em coordenada GPS, o tipo de encaixante e classificação química segundo Menezes et al. (2015), Alves (1997), Garda (1995) e Azzone et al. (2009) e classificação petrográfica de acordo com o presente trabalho. 79

Tabela 17: Características petrográficas gerais dos diques DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB, E é a região do dique próximo a encaixante, B é a borda, I é a região intermediária entre borda e o centro e C é o centro do dique. 83

Tabela 18: Classificação, mineralogia normativa e dados de composição de DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB. Os elementos Cr, Ni, Co e o somatório de ETRs estão em ppm. Abreviações e legenda: B (borda), BE (borda-encaixante), M (análise de matriz separada por catação), ME (análise de matriz por amostragem direta de sólido), I (intermediário), C (centro), Di (diopsídio), Or (ortoclásio), Ne (nefelina), (Il) Ilmenita, An (anortita), Ol (olivina), Mt (magnetita), Ap (apatita), Ab (albita), Cs (dissilicato de cálcio), B (basanita), T (tefrito), P (potássico), UP (ultrapotássico). 103

Tabela 19: Composição de elementos maiores, menores e traços, x, dos líquidos de DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB. DP é o desvio padrão. A composição do líquido de DAPGG é a média dos resultados de DAPGG-BE(ME), DAPGG-BM e DAPGG-IM. 188

Tabela 20: Equação para o cálculo de $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ para a olivina em função de NBO/T (oxigênio não ligante por cátion tetraedricamente coordenado) e a equação de NBO/T. T é a proporção catiônica de tetraedros nos líquidos silicáticos, M é a proporção de cátions modificadores de rede, n é a carga do cátion e i é o elemento/cátion. 192

Tabela 21: Valor de NBO/T, para DSMB e DSMU, considerando o Fe_{total} como Fe^{2+} em (1), o resultado do cálculo de NBO/T distinguindo as proporções catiônicas entre Fe^{2+} e Fe^{3+} (2) e o valores de $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$. 192

Tabela 22: Equações termobarométricas de Putirka (1999) e Putirka (2008) empregadas neste estudo, onde T (K) é a temperatura, P (bar) é a pressão, X é a fração molar catiônica dos elementos indicados no índice e a fase é mencionada no expoente. O l se refere a líquido, cpx a clinopiroxênio, $T^{sat.cpx}$ a temperatura de saturação do clinopiroxênio, Fm a Fe + Mg e H_2O_l é a porcentagem em massa de H_2O no líquido.

Tabela 23: Soluções das equações apresentadas na Tabela 22. T^{anidro} é a temperatura obtida em (1), $T^{hidratado}$ é a temperatura fornecida pela equação (2) e $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ é a solução de (3) ao empregar o valor de temperatura

$T^{média} \pm DP$ (desvio padrão). Para a pressão, foi fixado o valor de 1000 bar. O erro de 0,4 (Putirka, 1999) para K_D foi utilizado como estimativa. 198

Tabela 24: Coeficientes de partição, $D^{cp/l}$, de elementos traços entre clinopiroxênio e os líquidos de DAPGG, DSMB, DSMPN e DSMU. DP é o desvio padrão. Na Tabela 25, constam os números de análises utilizadas para cada corpo. Campos sem valor são de elementos que não puderam ser detectados acima do limite de quantificação e os números em negritos são valores com erros maiores. 209

Tabela 25: Número total de análises realizadas nas matrizes e nas zonas cristalinas utilizadas no cálculo dos coeficientes de partição de elementos traços entre clinopiroxênio e o líquido de DAPGG, DSMB, DSMPN e DSMU. 209

Tabela 26: Composição média de elementos maiores, menores e traços, x, das zonas em equilíbrio com o líquido (Tabela 19) dos diques DAPGG, DSMB, DSMPN e DSMB. DP é o desvio padrão. 211

Tabela 27: Equação geral (1) de cálculo do coeficiente de partição de elementos traços entre o cristal e a fase líquida do modelo Lattice Strain. Equações de cálculo dos parâmetros r_0 de M2, E_{M2} e D_0 na incorporação de elementos terras raras e Y no sítio M2 de clinopiroxênio. X se refere a fração do elemento no sítio indicado, P é a pressão em GPa, T é a temperatura em K, $mg\#_{liq}$ é o índice do líquido, R é a constante dos gases e NA é o número Avogadro. 233

Tabela 28: Valores dos parâmetros r_0 , E^{n+} e D_0^{n+} calculados de acordo com as equações da Tabela 27 e os parâmetros obtidos segundo o ajuste da equação (1) nos dados experimentais. O r_0 está em Å, E em GPa e D_0 é adimensional. 237

Tabela 29: Razão D_{La}/D_{Er} calculado pelo método de Wood e Blundy (1997) e observado dos dados experimentais de DAPGG, DSMU, DSMB e DSMPN. 237

Tabela 30: Coeficiente de partição, D_i , dos elementos i entre olivina e o líquido para DSMB e a razão x_i^{ol}/x_i^l em DSMU. São apresentados os desvios padrões, cujo cálculo está descrito no texto. 244

Tabela 31: Número total de análises realizadas nas matrizes e nas zonas cristalinas utilizadas no cálculo do coeficiente de partição entre olivina e o líquido de DSMB e x_i^{ol}/C_i^l de elementos menores ou traços entre as regiões centrais (c) e a borda (b) de olivina e o líquido de DSMU. 244

Tabela 32: Composição média de elementos maiores, menores e traços das olivinas em equilíbrio com o líquido de DSMB e das zonas centrais e de borda da olivinas de DSMU. DP é do desvio padrão. Os óxidos estão em % m/m e os traços em ppm. x é a composição dos cristais de olivina em equilíbrio com o líquido de DSMB e x' representa a composição dos cristais de olivina de DSMU que estão em desequilíbrio com o respectivo líquido. 245

Tabela 1A: Análises químicas individuais de rocha total e matriz por FRX e ICP-MS Anexo

Tabela 2A: Resultados da análise química de elementos maiores em matriz por ME de DAPGG-BE, DAPGG-B e DSMU-B2 em % em massa. Estão apresentadas as análises com fechamento abaixo de 101%. Anexo

Tabela 3A: Análises de elementos menores e traços por LA-ICP-MS das matrizes das amostras DAPGG-BE, DAPGG-B e DSMU-B2 em ppm. Anexo

Tabela 4A: Análises químicas de rocha total e matriz e mineralogia normativa. Em parênteses, encontra-se o número de replicatas. Os óxidos e os elementos Cr e Ni foram analisados por FRX e os demais por ICP-MS. Anexo

Tabela 5A: Composição química de elementos maiores e menores em % em massa (m/m) de cristais de olivina nos diques DSMU e DSMB. A fórmula estrutural foi calculada na base de 4 oxigênios e é apresentada em apfu. Os elementos abaixo do limite de quantificação da técnica analítica estão indicados por <LQ. A letra c é a região central e b é a borda do cristal. Anexo

Tabela 6A: Composição química de elementos maiores e menores e fórmula estrutural de cristais de clinopiroxênio de DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB. A fração mássica (m/m) é dada em %. O cálculo da proporção Fe^{2+} e Fe^{3+} foi realizado segundo Schumacher (1991) e a classificação e distribuição catiônica nos sítios T, M1 e M2 foram baseadas em Morimoto et al. (1988). Abreviações: b (borda), i (intermediário), c (centro) e n (núcleo). O mg# foi calculado de acordo com a expressão $[Mg/(Mg+Fe^{2+})] \times 100$, com os termos em apfu. Anexo

Tabela 7A: Composição de elementos traços em olivina dos diques de DSMU e DSMB em ppm. Os elementos Nb, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Ho, Lu, Pb, Th e U foram também analisados, mas estiveram abaixo do limite de quantificação da técnica analítica (<LQ) em todas as análises e por isso não constam na tabela. A letra b é a borda e o c é o centro do cristal. Anexo

Tabela 8A: A fração mássica dos elementos traços em clinopiroxênio dos diques DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB em ppm. As análises foram obtidas por LA-ICP-MS. A região c é o centro do cristal, i é a região intermediária entre a borda e o centro e b é a borda. Anexo

Tabela 9A: Composição química média de elementos maiores e menores e fórmula estrutural de cristais de olivina de DSMU e DSMB. A fração mássica (m/m) é dada em %. Esses dados são baseados nas Tabelas 5A e 7A. São apresentados também valores médios de fração mássica dos elementos traços em ppm. Anexo

Tabela 10A: Composição de elementos maiores, menores e traços por zona analisada de cada cristal de clinopiroxênio de DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB. Os dados foram organizados por zonas de acordo com os resultados das Tabelas 6A e 8A. A letra X é a fração mássica e DP é o desvio padrão. Em parênteses após X e DP, está indicado o número de análises realizadas na zona que constituem a média X, quando a quantidade é maior que 1. Anexo

1. Introdução

O coeficiente de partição de Nernst, $D_i^{\alpha/\beta}$, é designado pela razão entre a fração mássica do elemento i na fase α e a fração mássica do elemento i na fase β , sendo tal quociente restrito à condição de equilíbrio químico entre as fases α e β (Blundy e Wood, 2003). É utilizado no estudo de modelagem de evolução magmática (McIntire, 1968; Winpenny e MacLennan, 2011). Em Petrologia, a obtenção do coeficiente de partição pode ser realizada pela análise química de produtos provenientes do estudo de simulação experimental (*e.g.*, Hill *et al.*, 2011; Mollo *et al.*, 2013) ou de amostras encontradas no meio natural (*e.g.*, Olin e Wolff, 2010; Ubide *et al.*, 2014). Ambos os métodos apresentam resultados complementares, já que o primeiro permite o reconhecimento da ação das diferentes variáveis separadamente no comportamento dos elementos químicos do sistema, e o segundo tem o valor do coeficiente de partição sob a influência simultânea das distintas variáveis atuantes no sistema geológico (Blundy e Wood, 2003).

Os trabalhos experimentais pioneiros de cristalização em laboratórios para tal fim procuraram desenvolver procedimentos que permitissem a separação eficiente entre os cristais precoces e a fase vítrea, de modo que fases contaminantes não fossem amostradas junto ao material alvo para análise (Irving, 1978). Outro aspecto de discussão nos trabalhos experimentais é a variável tempo empregada nas simulações de cristalização. Preocupa-se em utilizar um tempo mínimo de execução do experimento que leve os produtos fase vítrea e cristalina à condição de equilíbrio químico mútuo (Roeder e Emslie, 1970; Green e Person, 1985; Beattie, 1994).

Embora o estudo de coeficiente de partição em materiais naturais também enfrente alguns percalços na separação e análise de cristal e matriz, este processo é facilitado já que rochas podem apresentar cristais maiores que aqueles obtidos experimentalmente. Por outro lado, a fração mássica de elementos incompatíveis costuma ser menor em minerais do que em cristais sintetizados, pois, neste último, realiza-se a etapa de dopagem do material de partida (*e.g.*, Corgne *et al.*, 2012; Suzuki *et al.*, 2012). O estudo de partição de elementos traços em olivina, por exemplo, é sensível a esta problemática. Em Arzamastsev *et al.* (2009), foram obtidos coeficientes para setes elementos traços entre olivina e melaneferinito, uma vez que os demais traços estavam abaixo do limite de detecção da técnica analítica aplicada.

Entretanto, foram calculados coeficiente de partição para vinte e quatro elementos a partir de grãos de olivina sintética provenientes de um líquido de composição basáltica em Imai *et al.* (2012).

O progresso no desenvolvimento de equipamentos de análises químicas contribuiu para que volumes cada vez menores de amostra fossem analisados com resultados aceitáveis (Jackson *et al.*, 1992; Butler *et al.*, 2007; Lavrent'ev *et al.*, 2015). Foi com o surgimento de análises pontuais por espectrometria de dispersão de comprimentos de onda (WDS) em microsonda eletrônica (ME) e por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado com *laser ablation* (LA-ICP-MS) que as análises químicas dos materiais geológicos puderam desvendar a complexidade composicional das dimensões micrométricas dos mesmos. Assim, apesar da análise de separados de cristais ainda ser uma alternativa, a análise *in situ* possibilita a aplicação de método analítico mais rápido e menos suscetível a amostragem de fases concomitantes (Jackson *et al.*, 1992).

Discussões acerca de variações e contribuição química de determinadas populações de macro e megacristais, principalmente, em rochas porfiríticas, ao longo de seção de um corpo (Ubide *et al.*, 2012; Menezes *et al.*, 2015) tem impactado no procedimento de obtenção de coeficientes de partição. Essas populações de cristais apresentam feições de reabsorção e/ou zonamentos químicos, sendo denominadas ou antecristais, ou xenocristais (Charlier *et al.*, 2005) e estão, portanto, em desequilíbrio como material circundante. O entendimento ou estudo do zonamento químico de um corpo pode auxiliar na obtenção da composição química do líquido em equilíbrio com o cristal em estudo. Por exemplo, em Menezes *et al.* (2015), foi constatado que a composição de elementos maiores do setor central do dique menos a composição dos antecristais e xenocristais da mesma zona é equivalente a composição da borda do corpo. Assim, esforços experimentais ou mesmo de modelagem para obter a composição que melhor represente o líquido em rochas têm sido realizados de forma a não incluir a carga de antecristais e xenocristais (Ubide *et al.*, 2014).

Por consequência da presença de antecristais e/ou xenocristais na rocha, faz-se necessária a identificação de zonas cristalinas em equilíbrio com o líquido. Para este fim, são citados métodos de observação texturais e de investigação por meio dos princípios termodinâmicos. Por critério textural, tem-se que cristais homogêneos, sem zonamento e euédricos estão em equilíbrio com a matriz próxima que equivale ao líquido (Arzamastsev *et al.*, 2009; Olin e Wolff, 2010). Em cristais zonados, são avaliadas quais zonas estabelecem

relação de equilíbrio com o líquido a partir das relações matemáticas da Termodinâmica. O parâmetro usado que considera a composição química de elementos maiores das fases é a constante de equilíbrio químico da troca catiônica de Mg e Fe^{2+} entre o cristal e o líquido, $K_D^{\text{Mg}-\text{Fe}^{2+}}$ (e.g., Ubide *et al.*, 2014). Os elementos traços também são utilizados para esta avaliação por meio do modelo *Lattice Strain* (e.g., Olin e Wolff, 2010).

Há estudos de aplicação do coeficiente de partição que assumem, por simplificação, que este parâmetro não varie ao longo de um processo magmático. No entanto, para que o modelo melhor alcance seus objetivos, uma seleção minuciosa de coeficientes tabelados deve ser realizada de forma que haja compromisso entre as condições físico-químicas do sistema em estudo e aquelas em que o coeficiente foi obtido (Blundy e Wood, 2003).

São crescentes os trabalhos que almejam entender o efeito da composição do cristal (e.g., Lundstrom *et al.*, 1998), da pressão (e.g., Corgne *et al.*, 2012; Suzuki *et al.*, 2012), da temperatura (e.g., Sun e Liang, 2012, e suas referências) e da estrutura e composição do líquido (e.g., Mysen, 2004; Schmidt *et al.*, 2006) no processo de partição de elementos traços entre duas fases coexistentes. Tentativas foram feitas para parametrizar variações do coeficiente de partição de elementos traços entre olivina (Bérdard, 2005), ortopiroxênio (Bérdard, 2007), clinopiroxênio (Bérdard, 2014) e seus respectivos líquidos em função das condições físico-químicas.

Por sua vez, o diagrama de Onuma (Onuma *et al.*, 1968) tem recebido larga aplicação, principalmente, em trabalhos que envolvem a obtenção do coeficiente de partição de elementos terras raras. O diagrama de Onuma prevê a distribuição de $D_i^{\alpha/\beta}$ de cátions de uma série isoeletrônica entre duas fases coexistentes na forma de uma parábola em função do raio iônico. Este comportamento foi expresso matematicamente por meio de princípios termodinâmicos em (Blundy e Wood, 1994), baseado no trabalho de Brice (1975). O modelo *Lattice Strain* atribui a variação de $D_i^{\alpha/\beta}$ à penalidade energética gerada pela tensão no retículo cristalino proporcionado pelo ingresso de um cátion com raio iônico e/ou carga diferente do cátion que comumente ocupa o sítio cristalino em foco daquele cristal (Blundy e Wood, 2003).

1.1. Objetivo e estrutura da dissertação

O presente trabalho visou obter $D_i^{\alpha/\beta}$ entre minerais formadores de rocha (i.e., clinopiroxênio e olivina) e líquidos silicático básicos alcalinos. Este estudo constitui a primeira

abordagem do tema em rochas relacionadas ao magmatismo alcalino Cretáceo no sudeste da Plataforma Sul-Americana. Dada a importância do uso de $D_i^{\alpha/\beta}$ na construção de modelo de evolução magmática compatível ao sistema analisado, este estudo espera, por consequência, contribuir com dados de $D_i^{\alpha/\beta}$ a futuras investigações de modelagens petrológicas nestas rochas ou em semelhantes. Para tanto, duas perguntas principais nortearam o desenvolvimento do trabalho, quais sejam, 1) qual a composição do líquido e 2) quais cristais ou porções de cristais se encontram em equilíbrio químico com esse líquido.

Os litotipos estudados são classificados como tefrito/basanito e são provenientes de quatro diques de localidades distintas: região norte do litoral do estado de São Paulo (Ubatuba e Ilha de Búzios); região da Serra da Mantiqueira (próximo à Santo Antônio do Pinhal); região sul do Estado de São Paulo (próximo à Cajati). Tais diques são representantes das Províncias Alcalinas Serra do Mar e Arco de Ponta Grossa, respectivamente (cf. Riccomini *et al.*, 2005). Pôde-se obter $D_i^{\alpha/\beta}$ de elementos traços entre clinopiroxênio e o líquido nos quatro diques e entre olivina e o líquido em dois destes mesmos diques. Devido à semelhança mineralógica e de filiação magmática entre as rochas, houve abertura a comparações e discussões das possíveis variáveis que justificassem concordâncias e discordâncias de valores de $D_i^{\alpha/\beta}$ entre os diques e dados da literatura.

Vale ressaltar que este estudo de partição descreveu com detalhes as etapas de procedimento experimental e de tratamento de dados na obtenção de $D_i^{\alpha/\beta}$. Também discutiu e mostrou alternativas às dificuldades encontradas no desenvolvimento do tema. Ademais, o aprofundamento das discussões quanto ao comportamento de partição dos elementos traços nos quatro sistemas em foco foi realizado com auxílio do modelo *Lattice Strain*. Em sequência, são citados os assuntos tratados em cada capítulo integrante do corpo da dissertação *Coeficientes de partição de elementos traços entre minerais máficos (clinopiroxênio e olivina) e líquidos ultrabásicos alcalinos (basanitos e tefritos): estudo de diques relacionados ao magmatismo cretáceo no sudeste da Plataforma Brasileira*.

Os capítulos 2, 3 e 4 trazem revisões bibliográficas diretamente ligadas ao tema de estudo. O capítulo 2 abrange a definição de $D_i^{\alpha/\beta}$, suas variáveis e o modelo *Lattice Strain*. O capítulo 3 traz a descrição cristalográfica e química de olivina, com ênfase em sistemas básicos alcalinos. O capítulo 4 apresenta a descrição cristalográfica e química geral de clinopiroxênio, com ênfase em sistemas básicos alcalinos.

No capítulo 5, tem-se a descrição detalhada da metodologia experimental adotada na obtenção da composição química de cristais, rocha total e matriz, bem como os critérios para tratamento de dados.

Os resultados obtidos neste trabalho são apresentados nos capítulos 6 a 8. O capítulo 6 é destinado à apresentação e descrição das amostras: classificação, características macroscópicas e petrografia. O capítulo 7 traz a classificação e descrição química dos dados analíticos obtidos para rocha total e matriz. O capítulo 8 apresenta a classificação e a descrição química de olivinas e clinopiroxênios, evidenciando os zonamentos químicos das mesmas. Apresenta também descrições das trocas catiônicas de elementos maiores, menores ao longo do processo de cristalização.

O capítulo 9 é destinado às Discussões. Estas foram subdivididas em: avaliação do zonamento químico nos diques estudados; seleção de composições químicas representativas do líquido; regiões cristalinas de olivina e clinopiroxênio em equilíbrio com o líquido magmático; cálculo e dados de $D_i^{\alpha/\beta}$, estudo de variáveis de $D_i^{\alpha/\beta}$; aplicação do modelo *Lattice Strain* nos dados obtidos de $D_i^{\text{clinopiroxênio/líquido}}$ e $D_i^{\text{olivina/líquido}}$.

O capítulo 10 apresenta as principais conclusões do trabalho bem como considerações finais.

Todas as tabelas com os dados analíticos absolutos obtidos neste trabalho são apresentadas nos Anexos.

2. Coeficiente de partição

O estudo do comportamento de elementos traços em processos ígneos auxilia no entendimento de evolução do magma e da formação de rochas ígneas. Os elementos traços se destacam devido às suas respectivas preferências por uma fase em detrimento de outra durante uma etapa de diferenciação magmática (Blundy e Wood, 2003). Modelos teóricos quantitativos foram desenvolvidos para prever o comportamento dos elementos traços frente aos processos de cristalização do magma (Albarède e Bottinga, 1972) ou fusão de uma rocha (Gast, 1968). Tais modelos dependem do coeficiente de partição que consiste em uma razão numérica que mede a afinidade de um elemento traço por uma determinada fase (Blundy e Wood, 2003).

As regras desenvolvidas para a predição da distribuição dos elementos traços entre fases coexistentes são baseadas, por exemplo, no tamanho de raio iônico (Goldschmidt, 1937), no grau de covalência da ligação por meio da eletronegatividade e do ponto de fusão (*e.g.* Ringwood, 1955a), etc. Todavia, estas regras são válidas apenas para um conjunto de dados e falham ao tratar de alguns casos (Burns e Fyfe, 1967) e, por isso, não são consideradas universais. O modelo *Lattice Strain* não é adotado para prever a partição de cátions de metais de transição já que não contabiliza o efeito do campo cristalino, no entanto, apresentam bons resultados para cátions com camada fechada como Ca^{2+} , Mg^{2+} e Sr^{2+} e para os elementos terras raras (ETRs) cujo efeito do campo cristalino pode ser negligenciado (Blundy e Wood, 1994).

A aplicação do coeficiente de partição de elementos traços entre duas fases coexistentes em sistemas máficos abrange, principalmente, a investigação da rocha fonte e a identificação de múltiplos processos de mistura e fracionamento na geração de um magma final de um determinado sistema. Em Winpenny e MacLennan (2011), um modelo que prevê o mecanismo de mistura de magma do manto em uma câmara magmática foi construído com auxílio de coeficientes de partição selecionados para estimar a composição de líquidos em equilíbrio com diferentes zonas de clinopiroxênio em um basalto. O estudo de coeficiente de partição de elementos traços obtidos de minerais do manto em líquido silicático e carbonatado a altas pressões levou a conclusão que harzburgito refertilizado seria uma opção

de fonte de material para formação de magma de composição kimberlítica na litosfera continental (Girnis *et al.*, 2013).

Dada a complexidade no processo de partição de elementos traços em sistema ígneos, este capítulo visa introduzir e definir o coeficiente de partição e descrever a ação das suas variáveis com intuito de fornecer base teórica para o desenvolvimento das discussões pertinentes a este trabalho.

2.1. Definição

Os elementos traços podem ser incorporados nos minerais durante o crescimento por meio de diferentes processos, tais como adsorção ou por solução sólida. Neste último caso, os elementos traços são incorporados nos sítios cristalinos em substituição aos cátions que comumente ocupam a posição referida ou nos interstícios (McIntire, 1963). Em contrapartida, no primeiro processo, os elementos traços não integram sítios cristalinos ou efetivam ligações químicas com o cristal hospedeiro. Este é caso da adsorção física de íons ou átomos na superfície no mineral (McIntire, 1963). Entre os processos citados, é a incorporação de elementos traços por solução sólida que pode atingir condição de equilíbrio químico e, por esse motivo, é tratada mais facilmente pelas relações da termodinâmica (McIntire, 1963).

Segundo McIntire (1963) e Banno e Matsui (1973), no que diz respeito à cristalização de um mineral em um líquido, a partição de um elemento traço entre duas fases coexistentes é tida em equilíbrio quando o potencial químico (μ) do elemento i no líquido (l) se iguala ao potencial químico do elemento no cristal (c), a temperatura, T , e pressão, P (1).

$$\mu_i^c = \mu_i^l \quad (1)$$

Com $\mu_i^{o,l}$ e $\mu_i^{o,c}$ sendo os potenciais químicos padrões de i e α_i^l e α_i^c , as atividades de i nas respectivas fases l e c , e R a constante universal dos gases, obtêm-se as relações (2) e (3).

$$\mu_i^{o,l} + RT \ln \alpha_i^l = \mu_i^{o,c} + RT \ln \alpha_i^c \quad (2)$$

$$\mu_i^{o,l} - \mu_i^{o,c} = RT \ln \left(\frac{\alpha_i^c}{\alpha_i^l} \right) \quad (3)$$

Assim, a razão entre as atividades de i no cristal e no líquido corresponde a constante de distribuição, $K_{Di}^{c/l}$ (4).

$$e^{(\mu_i^{o,l} - \mu_i^{o,c})/RT} = \frac{\alpha_i^c}{\alpha_i^l} = K_{Di}^{c/l} \quad (4)$$

Para sistemas onde o soluto tem comportamento ideal, o coeficiente de atividade, γ_i , é igual a 1 e, conseqüentemente, α_i é igual a fração molar de i , X_i , na fase especificada, levando à relação (5).

$$K_{Di}^{c/l} = \frac{\gamma_i^c X_i^c}{\gamma_i^l X_i^l} = D_{i*}^{c/l} \quad (5)$$

O coeficiente de partição molar, $D_{i*}^{c/l}$, iguala-se à constante de distribuição, $K_{Di}^{c/l}$, quando o γ_i é igual a um. Esta é a condição na qual o elemento traço se comporta idealmente no sistema. Em sistemas reais, a idealidade é atingida se i está suficientemente diluído nas fases coexistentes de forma a obedecer a lei de Henry (Watson, 1985). Deste modo, $D_{i*}^{c/l}$ torna-se independente da concentração de i , cujo intervalo de concentração é determinado experimentalmente para T , P e o restante da composição do sistema constantes e é característico em um dado sistema (Watson, 1985). Neste intervalo, $D_{i*}^{c/l}$ se torna constante e alcança um valor limite. Para situações gerais, o coeficiente de partição é representado por $D_i^{\alpha/\beta}$ quando X_i for fração mássica baseado nas recomendações de Beattie *et al.* (1993). Na literatura, o coeficiente de difusão também é designado pela letra D , cuja unidade é expressa por comprimento² / tempo, ao contrário de $D_i^{\alpha/\beta}$ que é um parâmetro adimensional e por isso não devem ser confundidos.

Deste modo, tem-se que $D_i^{\alpha/\beta}$, quando em um sistema ideal, depende da temperatura, pressão e composição do sistema e mede a tendência para cátions/elementos de serem incorporados por uma dada fase em detrimento de outra. O $D_i^{\alpha/\beta}$ é utilizado para classificar os cátions/elementos em compatíveis ($D_i^{\alpha/\beta} > 1$) e incompatíveis ($D_i^{\alpha/\beta} < 1$) a uma dada fase. Dentro do grupo dos incompatíveis, são conhecidos os LILE (*large ion lithophile elements*), HFSE (*high field strenght elements*) e REE/ETRs (*rare earth elements*/elementos terras raras).

A terminologia do coeficiente de partição, ou coeficiente de distribuição de Nernst, não é tratada na literatura com uniformidade. Segundo Rollinson (1993), este parâmetro é representado por $K_{Di}^{c/l}$ e incluem as constantes sob o comportamento ideal segundo a lei de Henry e $D_i^{c/l}$ é o coeficiente de partição total que compreende no somatório dos coeficientes de partição de i na rocha entre as fases cristalinas coexistentes e o líquido, considerando as suas proporções. Em Beattie *et al.* (1993), este último parâmetro é designado por $\bar{D}_i^{ct/l}$. A equação (6) expressa esta definição de acordo com Beattie *et al.* (1993), no qual $\bar{D}_i^{ct/l}$ é igual o somatório dos coeficientes de partição do elemento i entre as fases coexistentes (ct) e l , com ϕ^c sendo a fração mássica de cada fase cristalina, c .

$$\bar{D}_i^{ct/l} = \sum_{c=1}^n \phi^c D_i^{c/l} \quad (6)$$

2.2. Determinação experimental de $D_i^{\alpha/\beta}$

O coeficiente de partição de elementos traços pode ser obtido pela análise de material amostrado da natureza, consistido de minerais e rochas (*e.g.*, Foley *et al.*, 1996; Thompson e Malpas, 2000; Arzamastsev *et al.*, 2009), ou por meio de experimentos realizados sob o controle das condições físico-químicas (*e.g.*, Hart e Dunn, 1993; Adam e Green, 2006). Este último parte de rochas naturais ou materiais sintéticos dopados com elementos traços alvos cujas concentrações empregadas ainda obedeçam a lei de Henry. Assim, esses materiais são submetidos a variações de um parâmetro, por exemplo, pressão, e os demais são mantidos aproximadamente constantes. Porém, constitui um desafio obter minerais de tamanho apropriado para o emprego subsequente de técnicas analíticas (*e.g.*, Green e Pearson, 1985), pois a taxa de resfriamento em laboratório difere consideravelmente da ocorrida nos eventos em escala geológica. Por esse mesmo motivo, busca-se fazer um controle rigoroso da taxa de

resfriamento para assegurar que a condição de equilíbrio químico entre as fases seja atingida, ou que a cristalização seja mais lenta que o grau de difusão dos elementos entre as fases (Blundy e Wood, 2003).

Já em rochas naturais, os minerais são maiores, o que facilita a etapa de análise. Por outro lado, o método de se obter coeficiente de partição dessas rochas não permite restringir diretamente as condições de pressão e temperatura envolvidas no processo ígneo em particular (Thompson e Malpas, 2000) e se considera desprezível a mudança composicional do líquido com a saída de voláteis durante solidificação (Bédard, 2005). Portanto, para o melhor entendimento da evolução magmática é de extrema importância que dados provenientes de ambos os métodos estejam disponíveis para serem correlacionados, pois um permite reconhecer as variações de comportamento dos elementos traços com variações do meio composicional, de pressão e temperatura e outro, verificar o comportamento frente à escala geológica e às complexidades reais dos fenômenos naturais.

A identificação dos pares cristal/líquido em equilíbrio químico mútuo para o cálculo de $D_i^{c/l}$ não requer necessariamente que as fases cristais e a matriz estejam em estrito contato na amostra, apesar de, sob aspecto textural, a proximidade entre as fases estudadas e o formato euédrico do cristal sejam uma referência (Olin e Wolff, 2010). Macrocristais formados no início do fracionamento podem apresentar zonamento químico, ou seja, gradiente de fração mássica de elementos (maiores e traço) do núcleo em direção às bordas. Neste caso, apenas as áreas limites entre as duas fases poderiam se encontrar em condição de equilíbrio químico; no entanto, a borda de sobrecrecimento, no qual o controle difusivo no crescimento pode ser determinante (Albarède e Bottinga, 1972) apresentou uma composição em desequilíbrio com a magma hospedeiro em Ubide *et al.* (2014). Já fenocristais com distribuição de elementos traços homogênea não apresentam esta complexidade e, por isso, qualquer região do cristal pode ter valor representativo da fração mássica do elemento traço (Arzamastsev *et al.*, 2009). É recomendável, portanto, que a condição de equilíbrio entre duas fases seja avaliada por meio da composição química de elementos maiores entre as duas fases coexistentes. O uso da constante de equilíbrio da troca iônica de Fe^{2+} e Mg^{2+} entre as duas fases obtida de trabalhos anteriores possibilitou a Arzamastsev *et al.* (2009) concluir que a borda de fenocristais de clinopiroxênio dos diques alcalinos ultrabásicos estivessem em equilíbrio com a matriz. Este mesmo procedimento foi adotado por Ubide *et al.* (2014). Porém, em Irving (1978), é apontada a importância da execução de estudos que relacionem a

constante de equilíbrio de elementos maiores e traços entre fases ao coeficiente de difusão, já que este último é desigual entre os íons de elementos maiores e traços e, por esse motivo, o equilíbrio pode ser alcançado em momentos diferentes para as duas categorias de íons.

Existem diversos métodos experimentais de simulação de cristalização e análises químicas que são utilizados para obtenção de valores de $D_i^{\alpha/\beta}$. Vapor de água e sais fundidos foram utilizados como barreira no ambiente de cristalização para que as fases (líquido e cristal), simultaneamente formadas, já estivessem separadas no final do experimento. Essa alternativa adquiriu importância, pois existe a dificuldade de separar cristais e vidros para subseqüentes análises químicas sem contaminação mútua. No entanto, esse método se mostrou desfavorável ao alcance do equilíbrio devido à ausência de contato entre as fases (Ziellinski e Frey, 1974). Apesar das dificuldades, o método de separação de cristais e de fase vítrea foi muito empregado, e consiste em diferentes técnicas: isolamento manual de uma das fases do produto sintetizado previamente britado, utilização de líquidos densos ou dissolução diferencial (Irving, 1978). Todavia, avanços foram conquistados com advento ou aperfeiçoamento das técnicas analíticas como a microsonda eletrônica (ME) e a espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado com *laser ablation* (LA-ICP-MS) que proporcionaram a análise *in situ* de minerais e de vidros, sem a necessidade de pré-tratamento de amostra que constituem uma etapa crítica do método analítico (Jackson, 1992).

2.3. Previsão do comportamento de partição de elementos traços

A discussão acerca do processo de distribuição de elementos traços entre minerais magmáticos ganhou destaque com a publicação de Goldschmidt (1937). Esse trabalho introduziu três regras consideradas sustentáculos para o entendimento da formação de solução sólida e a incorporação de elementos traços que comumente não perfazem a química de um determinado mineral e, por conseguinte, permite a previsão do comportamento dos elementos durante etapas da diferenciação magmática. Ao considerar a competição entre dois íons pela ocupação de um dado sítio cristalino, Goldschmidt introduziu os seguintes princípios:

1. Dois íons serão capazes de substituir um ao outro extensivamente se a diferença entre os raios iônicos for menor de 15%.

2. Entre dois íons com mesma carga e raios iônicos diferentes, entrará na estrutura cristalina, preferencialmente, aquele com menor raio iônico. Assim, o íon de maior raio iônico será incorporado na etapa de fracionamento mais tardia.

3. Entre íons com mesmo raio iônico e cargas diferentes, aquele com maior carga será incorporado com preponderância no sítio cristalino nas etapas precoces do fracionamento mineral.

Contudo, a referida publicação foi discutida em trabalhos posteriores (Shaw, 1953; Ringwood, 1955a; Ringwood 1955b; Philpotts, 1978), pois foram observadas exceções às regras estabelecidas. A regra 1 não pode ser considerada universal, pois o aumento da temperatura do sistema gera a expansão da rede cristalina e, conseqüentemente, a estrutura se torna tolerante à incorporação de íons com raios maiores ao esperado (Shaw, 1953). Neste mesmo trabalho, foi apontado que o princípio 2 se aplica à solução sólida binária entre os componentes faialita (Fa) e forsterita (Fo), por exemplo, onde o sistema se comporta idealmente, com o enriquecimento de Fe^{2+} ($r_{\text{Fe}^{2+}} = 0,78 \text{ \AA} > r_{\text{Mg}^{2+}} = 0,72 \text{ \AA}$) no fundido nos estágios iniciais. Essa tendência não é observada de forma estrita para diagramas de sistemas binários com máximos e mínimos, em que parte do sistema corresponde à regra de enriquecimento de Goldschmidt e parte se comporta contrariamente. A terceira regra, como questionada por Shaw (1953), não condiz à substituição acoplada para garantir a neutralidade elétrica da estrutura.

Ringwood (1955a) menciona que, além da diferença de carga e raio, a distribuição de elementos entre fases magmáticas é dependente também do caráter covalente das ligações. Goldschmidt (1937) considerou que as ligações nos cristais são puramente iônicas, porém as ligações entre A^+ e B^- são quase sempre de caráter intermediário, em que a diferença de eletronegatividade entre A^+ e B^- não é tão pronunciada como ocorre nos sólidos iônicos. Deste modo, pela regra de Ringwood (1955a), entre dois cátions de tamanho de raio iônico e cargas similares, fará parte do cristal aquele de menor eletronegatividade, já que constituirá no sítio uma ligação de maior caráter iônico que o primeiro. Assim, Ringwood (1955a) procurou explicar alguns desvios dos princípios de Goldschmidt ao utilizar diferença de eletronegatividade entre íons monovalentes, bivalentes e trivalentes grandes que competem para ocupar um sítio cristalino. Segundo Goldschmidt (1937), Fe^{2+} ($r=0,78 \text{ \AA}$) deveria ser

incorporado na estrutura cristalina em detrimento de Mn^{2+} ($r=0,85 \text{ \AA}$), contudo Mn^{2+} confere maior caráter iônico à ligação e se torna mais compatível na fase mineral em relação a Fe^{2+} . Esta regra é baseada na correlação negativa entre ponto de fusão e eletronegatividade, no entanto, em Burns e Fyfe (1967), são mostradas falhas na aplicação desta regra a casos simples, pois outros fatores como a interação interatômica e a entalpia de fusão deveriam ser considerados.

Por meio de um estudo teórico com base em potencial iônico e geometria de íons coordenados em fundido silicático, Ringwood (1955b) relacionou o comportamento de partição de íons de raio pequeno e valência 3+ e íons de valência maior que 3+ entre magma e cristais à tendência de formarem complexos. Cátions com maior potencial iônico (carga do cátion / raio iônico) são coordenados pelos ânions disponíveis no fundido. Os tetraedros formados, com predominância de SiO_4^{4-} , compartilham oxigênio de forma a constituir a estrutura tridimensional do líquido silicático. Os íons Al^{3+} , Ti^{4+} , Ga^{3+} apresentam potencial para substituir Si^{4+} no magma e são incorporados na estrutura dos cristais em formação com a mesma identidade que se encontravam no magma. Ânions, tais como CO_3^{2-} e BO_3^{3-} , por não serem tetraédricos, passam a compor o magma remanescente, no qual se concentram até se cristalizarem. Cátions com menor potencial iônico quebram algumas ligações da rede e se dispõem nos “buracos”, como íons livres e são denominados modificadores de cadeia. Estes são incorporados pelo cristal de acordo com o raio iônico, carga e eletronegatividade (Ringwood, 1955b). Também são incorporados, nas fases cristalinas mais tardias na evolução magmática, íons mais carregados positivamente, já que constituem tetraedros (TaO_4^{3-} , AsO_4^{3-} , WO_4^{2-}) de menor potencial iônico líquido que SiO_4^{4-} . Estes cátions se acumulam no magma e se cristalizam como minerais primários. Tetraedros formados por íon central volumoso apresentam mais dificuldades em substituir o SiO_4^{4-} , ocorrendo livres no magma. Destes, destacam-se SnO_4^{4-} , ZrO_4^{4-} , TiO_4^{4-} e HfO_4^{4-} .

A estabilidade de alguns cátions modificadores de cadeia no magma é observada em Mallik e Dasgupta (2013). Sugere-se que a maior concentração de MgO e CaO em magma gerado da reação entre líquido da fusão parcial de MORB-eclogito carbonatado com granada peridotito em relação ao magma gerado em sistema similar, mas na ausência de voláteis, deve-se à estabilização de Mg^{2+} e Ca^{2+} no líquido como complexo com o CO_3^{2-} .

Na teoria de compostos iônicos, idealmente, os íons apresentam formato esférico e se organizam de forma a maximizar as interações atrativas entre íons de carga oposta na sua

esfera de coordenação e a minimizar as interações repulsivas entre íons de mesma carga. Todavia, alguns íons de metais de transição perdem a esfericidade quando entram em contato com o campo de cargas negativas dos ligantes, devido à repulsão entre os elétrons do íon central e dos ligantes. Alguns exemplos são citados: V^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+} e Ni^{2+} (Keppler, 1992). Íons com orbitais d preenchidos assimetricamente, sob o efeito do desdobramento do campo cristalino, repelirão mais alguns ligantes do que outros (Mitra, 2004). Assim, a teoria do campo cristalino apresenta mais um fator que interfere na incorporação de íons nos sítios cristalinos.

Por sua vez, quando o crescimento cristalino ocorre sob controle cinético, o processo de partição de elementos traços passa a depender da difusão dos cátions no meio líquido. Um mineral pode ser composicionalmente homogêneo ou a fração mássica de elementos pode variar de forma oscilatória, gradativa ou contínua. Dadas as diversas possibilidades encontradas na natureza, diferentes mecanismos são sugeridos na literatura de acordo com cada caso geológico. Albarède e Bottinga (1972) discutem modelos cinéticos de crescimento de cristais que resultariam na formação de minerais de composição homogênea ou heterogênea. O mineral pode crescer em ambiente onde o reservatório líquido é infinito ou finito. Nestas duas condições, se o crescimento é lento o suficiente para o mineral se reequilibrar no meio líquido, não ocorre variação composicional. Porém, se a difusão no líquido ou no sólido for muito lenta, o crescimento cristalino prosseguirá antes mesmo que o sistema atinja o reequilíbrio, o que gera variação composicional no mineral. Deste modo, o fator cinético se torna um controle da incorporação de elementos na estrutura na condição de não equilíbrio. Neste caso, o comportamento de partição de elementos traços passa a ser denominado coeficiente de partição aparente (Albarède e Bottinga, 1972). Haase *et al.* (1980) apresentam estudo teórico cinético em que se baseia na difusão de elementos nos magmas, na estequiometria de reação durante a cristalização, na taxa de crescimento da zona de sobrecrecimento do cristal para explicar o zonamento oscilatório em plagioclásio. Shimizu (1990) atribuiu o zonamento oscilatório em augita rica em Ti ao modelo discutido por Haase *et al.* (1980) e observou que alguns elementos compatíveis e incompatíveis eram incorporados na estrutura de forma alternada, como foi verificado para o par Cu-Ti.

2.3.1. Diagrama de Onuma

Outra abordagem à investigação do comportamento dos elementos durante os processos magmáticos surgiu com o trabalho de Onuma *et al.* (1968). Por meio da análise química de fenocristais de clinopiroxênio e ortopiroxênio e da matriz em rocha basáltica, relacionou-se o logaritmo do coeficiente de partição e raio iônico de elementos traços e maiores. O gráfico ($\log D_i^{\alpha/\beta} \times r_{\text{iônico}}$) assim obtido, intitulado diagrama de Onuma, é formado por curvas que apresentam concavidades para baixo (Figura 1). Cada curva é atribuída a uma série de íons isoeletrônicos que se dispõem aproximadamente paralela uma a outra. A partir do diagrama se conclui que os coeficientes de partição parecem ser dependentes dos efeitos do raio iônico e da carga do íon. O ponto máximo das respectivas curvas corresponde ao íon hipotético com raio ótimo para ser incorporado em um dado sítio cristalino. Portanto, a estrutura apresenta papel inquestionável na partição de elementos maiores e traço de acordo com o diagrama.

Onuma *et al.* (1968) observaram que curvas que contem dois ápices são indicativas de que íons de uma série isoeletrônica competem por sítios cristalinos diferentes da mesma estrutura. O comportamento de partição em função do raio iônico e da carga mostrado pelo diagrama de Onuma vão de encontro às regras 2 e 3 de Goldschmidt (Philppots, 1978). É explícito, no diagrama, que a incorporação de íons maiores e menores que o íon de raio ótimo é priorizada igualmente. Da mesma forma, foi observado que cátions bivalentes com raio iônico semelhante a de íons trivalentes são incorporados preferencialmente que este últimos em granada (Philppots, 1978).

Philppots (1978) sugeriu quatro regras que direcionam o desenho do diagrama de Onuma a partir dos dados obtidos experimentalmente. A primeira regra diz respeito à região do raio ótimo da curvatura e foi baseada na teoria da tensão e da elasticidade do retículo cristalino. A expressão obtida a partir de estudos teóricos correlacionados a dados experimentais de Nagasawa (1966) e Tsang *et al.* (1978) relaciona o comportamento parabólico entre raio iônico e coeficiente de partição. Estes dois trabalhos consideraram a energia potencial de tensão que é gerada no retículo ao se inserir no sítio um íon de raio diferente daquele que comumente ocupa o lugar. A segunda regra fornece outra relação empírica entre coeficiente de partição e raio iônico que permite desenhar curva para íons com raio iônico alguns pontos percentuais a maior ou menor que o raio ótimo para o sítio cristalino

Figura 1: Diagrama de Onuma (Onuma *et al.*, 1968), $\log D^{c/l}$ versus $r_{iônico}$. São indicados também os parâmetros do modelo *Lattice Strain* de acordo com a equação (12): r_0 é o tamanho iônico ótimo do íon a ser incorporado no sítio cristalino em estudo, $D_0^{c/l}$ é o coeficiente de partição de tensão compensada e E é o módulo de Young. Extraído de Wood e Blundy (2003).

em questão. A terceira regra diz que, para um dado raio iônico, a inclinação das curvas das séries isoeletricas apresentadas é a mesma. Já a quarta regra considera que há um plano de simetria no meio da curvatura que intersecta o maior valor de $D_i^{\alpha/\beta}$. Em Möller (1988), porém, estas regras foram revisadas e criticadas quando utilizadas em um conjunto de dados, indicando que mais fatores ainda precisariam ser levados em consideração.

2.4. Dependência de $D_i^{\alpha/\beta}$ com a composição, temperatura e pressão

As composições do magma e do cristal influenciam o coeficiente de partição. A variação de composição de um cristal dentro da série de solução sólida gera mudanças no comprimento médio da ligação nos sítios cristalinos (Deer *et al.*, 1978). A média de comprimento da ligação entre oxigênio e o sítio M2 (M2-O) em clinopiroxênio, por exemplo, cresce com aumento da ocupação de cátions com raios iônicos cada vez maiores nos sítios M1 e M2 (Cameron e Papike, 1981). Em McKay *et al.* (1986), observou-se que há o aumento do coeficiente de partição de ETRs conforme a quantidade de Ca^{2+} aumenta no sítio M2 no piroxênio. De acordo com Cameron e Papike (1981), o Ca^{2+} que apresenta raio iônico maior que Fe^{2+} e Mg^{2+} deve aumentar o volume de M2 de forma a acomodar em maior proporção cátions trivalentes de ETRs cujos raios iônicos são maiores que de Fe^{2+} e Mg^{2+} , porém menores que de Ca^{2+} em sítio de coordenação VIII.

A influência da substituição acoplada na partição de elementos HFS entre clinopiroxênio e o líquido em um sistema de composição diopsídio-anortita foi observada em Lundstrom *et al.* (1998). Neste estudo, observou-se que o aumento da partição de tais elementos no cristal se correlacionava positivamente com a quantidade de Al^{3+} no sítio T, já que este cátion promove o balanço de carga com a incorporação de HFSE.

A importância da composição e da estrutura do líquido no comportamento de partição de elementos traços é também evidenciada (O'Neil e Eggins, 2002; Mysen, 2004; Schmidt *et al.*, 2006). O líquido é descrito como formado, em parte, por uma estrutura tridimensional constituída por unidades tetraédricas, principalmente, de SiO_4^{4-} (Mysen, 1983). Nesta estrutura, os íons de oxigênio que ligam os Si^{4+} são denominados oxigênios ligantes (*bridging oxygen*, BO). Outros cátions podem apresentar este mesmo comportamento e constituir a cadeia tridimensional: Al^{3+} , P^{5+} , Fe^{3+} . A presença de íons de metais como o Mg^{2+} , Fe^{2+} e Ca^{2+} , cátions modificadores, promovem a formação de átomos de oxigênios não ligantes

(*nonbridging oxygen atoms*, NBO), o que diminui o grau de polimerização do líquido silicático. Os oxigênios não ligantes se ligam a cátions modificadores e a cátions com coordenação tetraédrica da estrutura tridimensional. O balanço de carga por causa da inserção de cátions com carga inferior a 4+ no sítios tetraédricos da estrutura dimensional é feito principalmente pelo K^+ e Na^+ e, por isso, não desempenham geralmente função de cátions modificadores. No esgotamento deste íons no sistema, cátions alcalinos terrosos podem assumir este papel (Mysen, 1988).

Em Schmidt (2006), foram estudadas as tendências de partição de diferentes cátions entre líquidos com baixo e alto grau de polimerização. Dos cátions de elementos alcalinos e alcalinos terrosos, há crescente afinidade pelo líquido com menor polimerização conforme a eletronegatividade e o potencial de ionização aumentam. Cátions com pares de elétrons isolados (Pb^{2+} , As^{3+} , Si^{4+} e Al^{3+}) tem número de coordenação 4 e constituem estrutura tetraédrica. Estes apresentam preferência pelo líquido mais polimerizado. Os cátions de ETRs e HFSE tendem a migrar para o líquido menos polimerizado já que, por apresentarem número de coordenação acima de 4, podem formar no líquido poliedro com a coordenação correspondente devido ao número maior de NBO. Por consequência, $D_i^{cristal/líquido}$ de ETRs e HFSE aumenta com a polimerização do líquido, pois as quantidades de NBO diminuem.

De forma similar, Möller *et al.* (1980) sugere que os cátions, no magma, interagem com ânions silicáticos multidentados formando quelatos. Segundo a IUPAC (2012), quelatos ocorrem quando um átomo central é ligado ou interage com mais de dois centros de ligações de um mesmo ligante, neste caso, os silicatos polimerizados. Ainda neste trabalho, é indicado que a estabilidade de ETRs no líquido silicático é aumentada em presença de água, pois esta diminui a polimerização do líquido fazendo com que o número de NBO aumente. O mecanismo proposto em Zotov e Keppler (1998) sugere que a H_2O ao interagir com o líquido silicático forma dois grupos Si-OH a partir de um BO. O CO_2 age na estrutura do líquido ao formar CO_3^{4-} por meio da transformação de dois NBO em um BO.

É difícil isolar a influência das diferentes variáveis no valor de coeficiente de partição. Um estudo do comportamento do coeficiente de partição dos elementos Sr, Ti e ETRs entre clinopiroxênio, anfibólio e líquido de composição basanítica mostrou que $D_i^{\alpha/\beta}$ diminui como o aumento da pressão de 0,5 a 3GPa e que o efeito da temperatura não é muito pronunciável (Adam e Green, 1994). Em Liu *et al.* (1992), a influência de pressão na partição

de ETRs entre clinopiroxênio e o magma basalto alcalino foi evidenciada. A mudança da posição do pico da curva do diagrama de Onuma para série isoeletrônica 3+ em M2 em direção ao tamanho de raio iônico menor foi relacionado ao aumento de pressão e, em menor grau, ao aumento da proporção de Al em M1 no cristal de clinopiroxênio.

2.5. Modelo Strain Lattice

A cristalização de minerais no magma é resultado da diferença de energia de Gibbs, ΔG , entre o meio líquido e o cristal, com $G^{\text{cristal}} < G^{\text{líquido}}$. Quanto maior a diferença, maior é taxa de crescimento do cristal, exceto se o abaixamento da temperatura do sistema for suficiente para aumentar a viscosidade do magma de forma a impedir o transporte de massa do líquido à superfície do cristal (Brice, 1975). A inserção de um íon que usualmente não constitui a composição química do mineral pode implicar na deformação no retículo cristalino, que diminui ΔG entre magma e a fase cristalina. A deformação, ϵ , é a mudança de tamanho da estrutura de um corpo quando este está sob o efeito de uma força e é numericamente definida como $\Delta L/L$, onde L é o comprimento inicial do corpo em uma dada direção e ΔL é a variação de comprimento durante a ação da força. A deformação é elástica se a estrutura volta à dimensão original após a cessão da força aplicada. O coeficiente de Poisson mede a deformação transversal em relação à deformação longitudinal (ϵ_z) e é expresso por $\nu = -\epsilon_x/\epsilon_z = -\epsilon_y/\epsilon_z$. Tensão, σ , é a força por unidade de área a qual o material está submetido, que é de compressão quando é perpendicular a superfície do material e é de cisalhamento ao ser aplicada tangencialmente. Deformação e tensão são relacionadas linearmente por meio do módulo de Young, E , e é designado por σ/ϵ .

Com o reconhecimento da mudança da energia reticular com as trocas iônicas em um sítio cristalino, alguns modelos que prevêem o comportamento de partição de elementos entre fase cristalina e o líquido foram desenvolvidos em termo de tamanho de raio iônico e das constantes elásticas. Nagasawa (1966) considerou os parâmetros elásticos isotrópicos para a construção do seu modelo que gerou resultados concordantes com a tendência experimental de partição de íons quimicamente semelhantes (Ag^+ , Rb^+ , Cs^+) entre NaNO_3 e KCl e os seus respectivos fundidos, com intuito de que as variações energéticas fossem, predominantemente, dependentes do raio iônico. A relação matemática encontrada por Nagasawa (1966) é aplicada apenas às substituições de íons com raio iônico maior que o íon encontrado em abundância no sítio cristalino. Brice (1975) sugeriu uma expressão matemática

alternativa (7) que acarretou uma relação linear entre $\ln K$ e $\left[\frac{1}{2} r_A (r_B - r_A)^2 + \frac{1}{3} (r_B - r_A)^3 \right]$ em minerais isotrópicos e sistemas ideais, sendo K é a constante de distribuição. O ΔG é a energia de tensão reticular gerada pela incompatibilidade da inserção do íon no sítio cristalino,

$$\Delta G = 4\pi Y \left[\frac{1}{2} r_A (r_i - r_A)^2 + \frac{1}{3} (r_i - r_A)^3 \right] N_A \quad (7)$$

onde r_A e o r_i são os raios iônicos do íon da estrutura e do íon dopante e N_A é a constante de Avogadro.

O modelo *Lattice Strain* se destacou com a atenção e aplicação dada por Blundy e Wood (1994). Tal abordagem teórica, semelhante aos trabalhos precursores (Nagasawa, 1966; Brice, 1975), vincula princípios termodinâmicos, constantes elásticas e o raio iônico ao comportamento de partição dos elementos traços. A previsão de $D_i^{\alpha/\beta}$ em função do raio iônico é condizente à curva experimental de Onuma *et al.* (1968). Algumas simplificações também são assumidas na aplicação do modelo de Blundy e Wood (1994): as propriedades elásticas do retículo são isotrópicas, a fração mássica dos elementos substituintes na estrutura deve responder a lei de Henry e a ligação predominante no cristal deve ter caráter iônico. Blundy e Wood (1991) inferiram que a estrutura do líquido é muito mais flexível que a estrutura cristalina para acomodar os diferentes íons. Consequentemente, a componente energética de tensão no líquido é desprezível frente à da tensão gerada pela acomodação de um íon incompatível na estrutura.

Blundy e Wood (1994) consideram que a variação da energia livre de Gibbs global, ΔG , na substituição iônica simultânea de A por i no sítio cristalino de um mineral, representada em (8), é a diferença entre $\Delta G_{\text{fusão}}^A$, a energia responsável pela partição de A entre as duas fases coexistentes, e $\Delta G_{\text{troca}}^i$, a energia gerada pela inserção de i, um elemento incompatível, no sítio cristalino em respeito a uma dada temperatura e pressão (9).

$$\Delta G = \Delta G_{\text{fusão}}^A - \Delta G_{\text{troca}}^i \quad (9)$$

ΔG é relacionada a $D_i^{\alpha/\beta}$ pela combinação das equações (4) e (5), como é verificado em (10).

$$D_i^{c/l} = e^{\left(\frac{\Delta G_{\text{fusão}}^A - \Delta G_{\text{troca}}^i}{RT}\right)} \quad (10)$$

$\Delta G_{\text{troca}}^i$ é equivalente à energia de tensão reticular proveniente da equação (7). Assim, é fornecida a relação (11). O termo $e^{\frac{\Delta G_{\text{fusão}}^A}{RT}}$ passa a denominar coeficiente de partição de tensão compensada, $D_0^{c/l}$, que é o coeficiente de partição do íon de tamanho de raio iônico ótimo que é incorporado na estrutura, isto é, $r_o = r_i$. Deste modo, obtém-se a equação (12) que se traduz, graficamente, o comportamento de partição de uma série isoeletrônica numa curva aproximadamente parabólica. Os parâmetros do modelo *Lattice Strain* estão indicados na Figura 1.

$$D_i^{c/l}(P, T, X) = e^{\left(\frac{\Delta G_{\text{fusão}}^A}{RT} - \frac{4\pi Y \left[\frac{1}{2} r_A (r_i - r_A)^2 + \frac{1}{3} (r_i - r_A)^3 \right] N_A}{RT}\right)} \quad (11)$$

$$D_i^{c/l}(P, T, X) = D_0^{c/l}(P, T, X) e^{\left(-\frac{4\pi Y \left[\frac{1}{2} r_A (r_i - r_A)^2 + \frac{1}{3} (r_i - r_A)^3 \right] N_A}{RT}\right)} \quad (12)$$

Avanços no entendimento do comportamento dos elementos traços se refletem na correspondência entre resultados experimentais e modelos teóricos. O modelo *Lattice Strain* vem sendo empregado em sistema máficos alcalinos e não alcalinos em um número crescente de trabalhos (Corgne *et al.*, 2012; Scarlato *et al.*, 2014; Ubide *et al.*, 2014). O estudo de partição não se restringe à relação cristal e líquido e é também aplicado entre líquidos magmáticos de composição contrastantes (Martin *et al.*, 2012; Martin *et al.*, 2013). Além de auxiliar na investigação da evolução magmática, em particular, a partição de elementos traços

dá sustentação a teorias de formação de magmas alcalinos no manto que se destacam pela sua composição química diferenciada (Gast, 1968).

3. Variação estrutural e composicional de olivinas de magmas mantélicos

A olivina é uma das primeiras fases a se cristalizar em magmas gerados no manto. Portanto, o estudo da sua variação composicional em diversos sistemas é visto como uma alternativa para adquirir o conhecimento do processo da evolução magmática nos estágios iniciais de diferenciação (Kamenetsky *et al.*, 2001; Winpenny e MacLennan, 2011). A quantidade de Ni, Ca e o teor de forsterita (Fo) em olivina auxiliam na identificação do grau de fracionamento do magma (Kamenetsky *et al.*, 2001).

A composição da olivina tal como os seus parâmetros cristalográficos dependem das condições físico-químicas atuantes no sistema durante a etapa de cristalização. É, geralmente, uma fase estável no manto superior e na crosta inferior, todavia a olivina rica em Mg se dissolve em magmas *quartzo* normativo (Thornber e Huebner, 1985). Em contato com as condições atmosféricas em ambiente aquático, a olivina tende se a dissolver, cujo mecanismo é discutido em Pokrovsky e Schott (2000). Em contrapartida, cristais de olivina mais ricos em Fe são encontrados em regiões menos profundas, superficiais (Daval *et al.*, 2010), e podem coexistir com magmas ácidos (Deer *et al.*, 1982).

A estrutura cristalina também varia a altas pressões e resulta nos polimorfos wadsleyita e ringwoodita, estáveis a 410 e 660 km de profundidade (Pearson *et al.*, 2014). A olivina comumente encontrada em rochas básicas alcalinas é rica em Mg e é pertencente ao sistema cristalográfico ortorrômbico. É esperado que cristais de olivina derivados de magmas primitivos gerados no manto superior apresentem mg# $[Mg/(Mg+Fe)]*100$, em apfu, de 88 a 94 (Dostal e Owen, 1998). A compilação de Deer *et al.* (1982) mostra que a composição da olivina está inserida no intervalo de mg# de 86,6 a 63,6 em sistemas nefeliníticos a basálticos alcalinos. Na província vulcânica central da Europa, olivina representativa de lava nefelinítica apresenta núcleo com mg# igual a 81 e borda com mg# igual a 75, e o xenocristal de olivina apresenta núcleo com mg# de 88 e borda com mg# de 77 (Jung *et al.*, 2006). Em sistema hidratado de composição basanítica, o mg# da olivina obtida experimentalmente foi de 79 (Zanetti *et al.*, 2004).

Atualmente, é possível investigar o teor de elementos traços incompatíveis em olivina, o que era dificultoso antes do advento das técnicas microanalíticas e a consequente diminuição do limite de detecção (Evans *et al.*, 2008; De Hoog *et al.*, 2010). A fração mássica

de incompatíveis como o La em forsterita cristalizado a 1 atm e 1400 °C variou de 0,029 ppm a 0,134 ppm com a composição do sistema CMAS (CaO - MgO - Al₂O₃ - SiO₂) (Evans *et al.*, 2008). Em um líquido de composição basanítica a 1,4 GPa e 1055°C, o teor de La foi de 0,011 ppm (Zanetti *et al.*, 2004). Já em Blundy e Dalton (2000), no sistema de composição CMAS – CO₂ a 3 GPa, o La esteve abaixo do limite de detecção na olivina, mas foi detectado acima no clinopiroxênio (0,051 ppm). De forma semelhante, em olivina melaneferinitos, o teor de La na olivina é abaixo do limite de determinação; no entanto, no clinopiroxênio, a concentração deste elemento foi de 149 ppm (Arzamastsev *et al.*, 2009). Em comparação ao clinopiroxênio, nota-se que a olivina praticamente não fraciona elementos incompatíveis como os ETRs em sistemas básicos, mas apresenta em sua estrutura elementos menores a traços tais como Ni, Cr, Mn e Ca (*e.g.*, Arzamastsev *et al.*, 2009; Foley *et al.*, 2011) que, por apresentarem caráter tipicamente compatível, são mais facilmente detectados pelas técnicas analíticas instrumentais. Assim, os elementos compatíveis ganham também importância ao lado dos incompatíveis no estudo dos seus respectivos coeficiente de partição entre a olivina e o magma.

3.1. Estrutura e composição de olivina magnesiânica

A olivina, com fórmula geral X₂SiO₄, apresenta solução sólida completa entre os membros finais forsterita, Mg₂SiO₄, e faialita, Fe₂SiO₄. Está incluída na subclasse dos nesossilicatos no qual os tetraedros de SiO₄⁴⁻ estão isolados na estrutura. O seu sistema cristalino é o ortorrômbico e o grupo espacial ao qual o retículo cristalino pertence é representado por Pbnm (Deer *et al.*, 1982). A estrutura cristalina se fundamenta em tetraedros independentes de SiO₄⁴⁻ que interagem com unidades octaédricas, nos quais o cátion bivalente central é coordenado por 6 oxigênios (Figura 2A). Cada oxigênio interage com um átomo de Si e três cátions bivalentes (Birle *et al.*, 1968). Os poliedros de coordenação octaédricos são designados por M1 e M2. O primeiro tipo forma cadeia contínua ao longo de [001] e compartilham arestas e, no segundo tipo, compartilham entre si vértices (Figura 2B).

Os oxigênios perfazem camadas aproximadamente paralelas ao plano (100) e se dispõem segundo o empacotamento compacto hexagonal (Deer *et al.*, 1982). Os sítios

Figura 2: Estrutura da olivina em A, B e C. Em B, é representada a cela unitária e, em C, destaca-se uma cadeia de octaedro em forma de serra. As estruturas estão orientadas por meio dos eixos cristalográficos. Imagem obtida pelo *software* XTALDRAW, conforme parâmetros encontrados em Birle *et al.* (1968).

octaédricos constituem cadeias em forma de serra (Figura 2C), paralelas ao eixo z (Birle *et al.*, 1968). No plano yz, tais cadeias de octaedros quando vazios se localizam das cadeias ocupadas mais próximas a $b/2$. As cadeias ocupadas do próximo plano se situam em cima das cadeias não ocupadas e a um plano de deslizamento b da próxima camada ocupada do primeiro plano. As cadeias em forma de serra de planos alternados são unidas por meio do Si dos tetraedros. Por outro lado, cadeias adjacentes são unidas por meio do compartilhamento do vértice do octaedro (Birle *et al.*, 1968).

Na estrutura da olivina, os sítios tetraédricos e octaédricos não apresentam forma regular. No que diz respeito aos sítios M, em M1, todos os oxigênios participam de arestas compartilhadas, diferentemente de M2, em que só há três arestas compartilhadas com poliedros adjacentes, em que três oxigênios participam (Birle *et al.*, 1968 e Hazen, 1976). O compartilhamento de arestas aproxima os cátions da estrutura, o que proporciona a maior repulsão entre essas cargas. Há o aumento do comprimento da ligação entre M e o oxigênio da aresta compartilhada e a diminuição do comprimento da aresta compartilhada, deformando os poliedros (Hazen, 1976). Deste modo, é mais clara a correlação entre o número de arestas compartilhadas e a diferença de tamanho e formato entre M1 e M2 em que o primeiro é menor e mais distorcido do que o segundo. Em referência às ligações Si-O, são indicados três diferentes comprimentos em Fo₉₀ dentro de um mesmo poliedro: 1,614 Å; 1,654 Å e 1,635 Å (Birle *et al.*, 1968). O valor médio encontrado de M2-O foi 2,135 Å e de M1-O foi 2,103 Å.

A diferença de menos de 15 % em tamanho entre os raios iônicos de Fe²⁺ e Mg²⁺, respectivamente, 0,78 e 0,72 Å (Shannon, 1976), permite que a substituição de um íon por outro nos sítios M seja completa (Kerrick e Darken, 1975) na olivina ferromagnesiana. A extensão da substituição catiônica entre Mg²⁺ e Fe²⁺ depende das condições de temperatura e pressão e da disponibilidade de cada íon no meio (Deer *et al.*, 1982). A altas pressões, por exemplo, tem-se a cristalização de olivina com maior conteúdo de Fo a temperaturas mais elevadas e o empobrecimento desse membro nas olivinas cristalizadas em temperaturas mais baixas.

Vários trabalhos investigaram a existência ou não de ocupação preferencial de Fe²⁺ ou Mg²⁺ por um determinado sítio M em cristais de olivina de composição intermediária. Birle *et al.* (1968) verificou que possivelmente a estrutura em cristais de olivina Fo₉₀ é desordenada. No entanto, trabalhos posteriores (*e.g.*, Aikawa *et al.*, 1985; Morozov *et al.*, 2005; Kroll *et al.*,

2006) mostraram que cristais de olivina de composição intermediária apresentam alguma ordenação com a crescente preferência de Fe^{2+} pelo sítio M1 a temperaturas mais elevadas. A reação de troca pode ser representada pela equação (13).

Aikawa *et al.* (1985) revelou que a preferência do Fe^{2+} por M1 cresce com o aumento da temperatura em olivinas Fo_{50} de metagabros e que a preservação desta distribuição depende do histórico do resfriamento do grão. É apontado que o resfriamento num intervalo de 10 ns de 900 - 700°C a < 500°C não possa ser o suficiente para manter a configuração catiônica ordenada inicial. Por esse motivo, foram encontrados intervalos diferentes de valores de coeficientes de distribuição das trocas catiônicas de Mg^{2+} e Fe^{2+} entre M1 e M2 ($K_D^{\text{Mg}^{2+}-\text{Fe}^{2+}}$) em rochas de natureza distinta. Sendo $K_D^{\text{Mg}^{2+}-\text{Fe}^{2+}} = \left(X_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{M2}} \cdot X_{\text{Fe}^{2+}}^{\text{M1}} \right) / \left(X_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{M1}} \cdot X_{\text{Fe}^{2+}}^{\text{M2}} \right)$, onde X é fração molar do íon apresentado no índice e o sítio é indicado no expoente, o $K_D^{\text{Mg}^{2+}-\text{Fe}^{2+}} > 1$ assinala a tendência do Fe^{2+} em se ordenar em M1 e de Mg^{2+} em M2. Já a ordenação inversa é representada por $K_D < 1$. Neste mesmo estudo, os valores de $K_D^{\text{Mg}^{2+}-\text{Fe}^{2+}}$ são menores que 1,05 em cristais de olivina de rochas plutônicas e metamórficas e entre 1,05 e 1,20 em grãos de olivina vulcânicos e lunares. Neste último caso, o resfriamento do magma é mais rápido, o que acarreta na maior preservação da desordem dos íons bivalentes.

Morozov *et al.* (2005) encontraram a ordenação crescente entre 500 e 750°C em Fo_{50} devido a maior distorção angular de M1 com o aumento da temperatura, com valores de $K_D^{\text{Mg}^{2+}-\text{Fe}^{2+}}$ entre 1,21 a 1,48. Apontaram também que, possivelmente, a desordem total ocorra entre 300 e 320°C. A presença de *crossover* com a ordenação de Fe^{2+} em M1 a 600°C e em M2 acima de 630°C (Redfern *et al.*, 2000) é um dos resultados que contraria as implicações anteriores. Porém, é descrito neste trabalho que o resfriamento do cristal se deu em menos de 1 min, o que pode mostrar a subestimação deste parâmetro experimental. O ordenamento catiônico em M1 pode ser decorrente do aumento da estabilidade do campo cristalino (Zanetti, 2004).

3.2. Elementos menores e traços em cristais de olivina em sistemas básicos

Em cristais de faialita, principalmente, ocorre pouca substituição de Mg^{2+} ou Fe^{2+} por Mn^{2+} ou Ca^{2+} . Já em membros mais ricos em Mg^{2+} , mesmo que em pouca quantidade, Cr^{3+} e Ni^{2+} estão normalmente presentes (Deer *et al.*, 1982). O tipo de substituição catiônica simples entre Fe^{2+} e Mg^{2+} , chamada de solução iônica substitucional, é uma substituição 1:1, que garante a neutralidade elétrica do retículo cristalino.

Estudos realizados para determinar a ocupação de elementos de transição em minerais com sítios não equivalentes foram realizados por métodos estatísticos (Dasgupta, 1972) e por meio da teoria do campo cristalino (Burns, 1970). O primeiro estimou que íons Fe^{2+} , Co^{2+} e Ni^{2+} se alocam principalmente no sítio maior, M2, da olivina. Todavia, esses resultados foram questionados devido à qualidade dos dados experimentais utilizados e por não se ter levado em consideração importantes tópicos, como a complexidade no grau de desordem na ocupação dos íons Mg^{2+} e Fe^{2+} entre M1 e M2 em olivina (Burns, 1972). Por sua vez, a teoria do campo cristalino, utilizada em Burns (1970) não considera a componente covalente das ligações entre o cátion e o oxigênio e não trata a modificação da energia de estabilização do campo cristalino com a variação de composição da fase cristalina (Dasgupta, 1972). A preferência de um dado cátion bivalente por um sítio, M1 ou M2, na olivina poderia afetar a aplicação do *Lattice Strain*, mas a identificação de dois r_0 distintos é considerada uma tarefa difícil devido à pequena diferença entre os valores (Zanetti *et al.*, 2004).

Na monticelita, $CaMgSiO_4$, o Ca^{2+} é ordenado em M2 e o Mg^{2+} , em M1 (Birle *et al.*, 1968). Olivinas ricas em Ca, apesar de não serem abundantes, podem ser utilizadas para identificar ambiente de cristalização (Ferguson, 1978). As olivinas cálcicas são mais frequentes em rochas alcalinas com feldspatóide e dependem da atividade de sílica do magma. Não foi encontrado correlação do teor de Ca na olivina com o conteúdo de Mg no magma e a temperatura, porém foi observado, em sistemas vulcânicos, que o zonamento cálcico em olivina é mais pronunciado quando no magma não há plagioclásio, mesmo com a queda da concentração do cálcio no líquido após o progresso do fracionamento.

Os elementos traços incorporados na estrutura cristalina das olivinas podem ser divididos em três grupos segundo De Hoog *et al.* (2010). Os íons bivalentes dos elementos Ni, Mn, Co, Cu e Zn apresentam raio iônico próximo ao do Mg^{2+} e perfazem o grupo I. Também é incluído nesse grupo o íon Li^+ . O grupo II é constituído pelos íons Cr^{3+} , Al^{3+} , V^{5+} , Sc^{3+} , Ca^{2+} e Na^+ e não se acomodam com a mesma facilidade nos sítios octaédricos da olivina como os íons do

grupo I por causa do raio ou da carga. Já o grupo III é formado pelos íons Ti^{4+} , Zr^{4+} , Nb^{3+} , Y^{3+} e P^{5+} , que são bastante incompatíveis devido a maior discordância do tamanho ou à carga destes em relação ao sítio M.

Os ETRs são dificilmente incorporados pela estrutura da olivina, pois o raio dos sítios M1 e M2 ($\sim 0,75 \text{ \AA}$) é pequeno para hospedar cátions com raio iônico de 0,865 a 1,032 $\text{\AA}$ (Foley *et al.*, 2013). Os elementos Ca, Al, Ti e Ni desempenham um papel importante para identificar se a olivina é proveniente do manto ou tem origem ígnea (Foley *et al.*, 2013). Geralmente, a olivina no manto apresenta menor fração mássica desses elementos. Citam-se os exemplos: Ti (até 340 ppm em olivina de rocha ígnea, < 70 ppm em olivina do manto); Al (até 800 ppm em olivina de rocha ígnea, < 130 ppm em olivina do manto). A composição de elementos menores e traço em olivina também pode auxiliar na caracterização do magma progenitor e da rocha fonte e na identificação de processos sofridos pelo magma (Foley *et al.*, 2013).

3.3. Mecanismos de substituição iônica acoplada e por omissão em olivina

A substituição de íons bivalentes por outros monovalentes ou trivalentes exige condições diferentes da substituição simples. Devido à necessidade da formação de um cristal eletricamente neutro, o intercambio de cátions é realizado por mecanismos que garantem o balanço de carga como a substituição acoplada e a substituição por omissão conforme indicados pelas equações (14), (15) e (16) respectivamente (Zanetti, 2004; De Hoog *et al.*, 2010). Em Nielsen *et al.* (1992), a equação (15) foi proposta para a inserção de íons de Sc^{3+} na estrutura dos cristais de olivina. Equações análogas poderiam ser escritas para Fe^{2+} .

Segundo Zanetti (2004), a substituição de cátions 4+ e 5+ em olivinas não poderia seguir o mecanismo (15) já que invocaria um grande número de vacâncias na estrutura cristalina. Assim, com os dados de química mineral em olivina em equilíbrio com líquido basanítico, foi considerado (14) o mecanismo dominante.

3.4. Variações cristalográficas com a temperatura, a pressão e a composição

A lei de Vegard prevê a correlação linear entre a variação dos parâmetros e volume de cela unitária e da composição do sólido a temperatura constante (Denton e Ashcroft, 1991). Foi obtida empiricamente em ligas de sais iônicos e considera a variação composicional por meio da solução sólida substitucional contínua, com os íons distribuídos desordenadamente. A sua aplicabilidade também é verificada em sistemas mineralógicos. A lei é atendida em sistemas ideais onde a interação de ligações entre os membros finais de uma solução sólida é similar a dos respectivos compostos puros. Neste caso, a idealidade não é o único requisito, sendo também necessária a diferença entre os raios iônicos dos íons envolvidos na substituição menor que 5%. Assim, não haverá o desvio positivo dos parâmetros de cela unitária ao previsto pela lei de Vegard (Jacob *et al.*, 2007).

A variação de volume molar de mistura, ΔV^{mix} , em sistemas de solução sólida binária para sistemas silicáticos é discutida em Newton e Wood (1980). Na representação volume *versus* composição, tem-se uma curva em forma de S como característica dos sistemas não ideais e uma curva aproximadamente retilínea ou retilínea dos sistemas ideais. São reconhecidas as ocupações catiônicas que se procedem em sítios cristalinos equivalentes (ES – *equivalent sites*) e em sítios não equivalentes (NS). Neste último caso, a curva próxima ao membro final de menor volume apresenta um excesso negativo de volume que é originada pela ocupação crescente dos sítios maiores pelo cátion de menor raio iônico. Ao se prosseguir a substituição catiônica pelo maior íon, este passa a ser incorporado no sítio cristalino menor de modo que a estrutura do mineral se expande, o que resulta no excesso de volume positivo.

Os parâmetros de cela unitária dos cristais de $(\text{Mg,Ni})_2\text{SiO}_4$, $(\text{Mg,Co})_2\text{SiO}_4$ e $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ sintetizados foram investigados em função da composição por Matsui e Syono (1968). A partir dos membros finais e dos cristais de composição intermediária de cada solução sólida, foi observado que o perfil da curva volume *versus* a composição do tipo sigmoidal é mais pronunciada nas olivinas que contem Fe^{2+} , Co^{2+} e Ni^{2+} , com o efeito crescente nesta ordem. A sugestão para esse comportamento é que o Ni^{2+} tende a se ordenar mais no sítio M1 do que o Fe^{2+} . Tal disposição é explicada pela maior estabilidade do campo cristalino resultante do íon Ni^{2+} em M1 que de Co^{2+} e Fe^{2+} no mesmo sítio (Wood, 1974).

Nos tetraedros de SiO_4^{4-} existem diferentes comprimentos de ligação Si-O. Na forsterita, os comprimentos de ligação são 1,614 Å para Si-O apical e 1,654 Å, 1,635 Å e 1,635 Å para os Si-O basais (Deer *et al.*, 1982). O comprimento médio é de 2,103 Å em M1-O e 2,135 Å

em M2-O. Os comprimentos de ligação M1-O e M2-O aumentam de forma linear com o aumento do componente faialita no mineral, como também o volume dos sítios M1 e M2 (Deer *et al.*, 1982). Com o aumento da temperatura, o comprimento de ligação M1-O e M2-O também aumenta e é intensificada a distorção dos sítios octaédricos. Na faialita, todas as ligações Fe-O aumentam similarmente ao contrário do que ocorre na componente forsterita, onde as ligações Mg-O mais longas expandem mais que as ligações mais curtas (Hazen, 1976). O efeito da pressão na compressão dos sítios M1 e M2 é observado em Hazen (1976). Já as ligações Si-O não mostram mudanças de comprimento pronunciadas com a variação da temperatura e pressão.

3.5. Olivina em rochas máficas alcalinas

Os cristais de olivina podem participar de vários estágios da evolução magmática, por isso podem ser zonados quanto ao conteúdo de Fe^{2+} , Mg^{2+} e Ca^{2+} , por exemplo. Magmas básicos alcalinos podem carregar até a superfície xenocristais de forsterita isolados ou integrando xenólitos ultramáficos do manto. Em rochas de composição basanítica (Almeida, 2009) de diques intrusivos no embasamento Pré-Cambriano em Ubatuba no litoral de São Paulo, os xenocristais apresentam porcentagem molecular de Fo variando de 88 a 91%. Em olivina basaltos alcalinos no nordeste do Irã (Saadat e Stern, 2012), os cristais de olivina provenientes do manto variam entre 88 a 90% de Fo e contem 2 % m/m de MnO e de 0,3 e 0,4 m/m de NiO. Em kimberlitos, foram constatados cristais de olivinas heterogêneos com núcleos ricos em Mg^{2+} (Fo_{89-94}) e Ni^{2+} de fração mássica média de 3500 ppm e feições de reabsorção tanto na fração mais grossa como na mais fina da rocha. A borda de sobrecrecimento com uma composição levemente mais evoluída, Fo_{91-93} , é empobrecida em Ni^{2+} (1750 ppm) em relação ao núcleo requilibrado e constitui a fase em equilíbrio com a matriz (Brett *et al.*, 2009). Nestes mesmos cristais, o Ca^{2+} e Cr^{3+} aumentam de fração mássica em direção à borda. Em olivinas de uganditos, foi observado o aumento de fração mássica de Al, Sc, Ti, Y, Zr, Ce e Nb dos centros para as bordas (Foley *et al.*, 2011).

Enfim, as rochas alcalinas máficas podem carregar cristais de olivina desde os estágios de formação do magma progenitor ou mesmo de diferentes estágios da evolução composicional deste magma. As variações das condições físico-químicas são expressas por suas mudanças texturais e composicionais ao longo da cristalização, como destacado acima. Grãos ou zonas de olivina cristalizados em sistemas máficos alcalinos são alvos de estudos

composicionais e de partição de elementos menores e traço compatíveis com intuito de traçar o histórico daquele sistema magmático. Certamente, o aumento da sensibilidade das técnicas analíticas (*e.g.*, Foley *et al.*, 2011) ampliará o papel da olivina como meio de estudo e investigação.

4. Variação estrutural e composicional de clinopiroxênios de magmas mantélicos

O clinopiroxênio é um mineral largamente aplicado ao estudo de partição de elementos traços. Constitui um dos primeiros minerais a se cristalizar em magmas provenientes do manto. Ao contrário da olivina, os piroxênios mais ricos em Ca permitem que ETRs sejam acomodados na sua estrutura mais facilmente (Wood e Blundy, 1997). Além disso, a sua utilização na construção de modelos de evolução magmática se torna mais atrativa, pois constitui uma fase mais estável em condições ambiente e está suscetível a processos mais lento de difusão química em sua estrutura do que a olivina (Winpenny e MacLennan, 2011). Desta forma, o piroxênio registra em sua composição e textura os processos magmáticos sofridos, possivelmente, desde o início da sua cristalização, por meio de zonamentos químicos e feições texturais muitas vezes bastante complexas (Duda e Scmincke, 1985; Huang *et al.*, 2010; Ubide *et al.*, 2014).

4.1. Estrutura e composição de clinopiroxênio

Os clinopiroxênios são minerais silicáticos ferromagnesianos de fórmula geral XYZ_2O_6 , constituintes do subgrupo dos inossilatos. O sistema cristalino é monoclinico com grupo espacial C2/c nos mais cálcicos, jadeíta e augita e com grupo de espacial P2₁/c na pigeonita (Deer *et al.*, 1978). São formados por cadeias simples e contínuas de composição $(SiO_3)_n^{2n-}$, originadas da polimerização de unidades tetraédricas SiO_4^{4-} por meio do compartilhamento de dois oxigênios com unidades adjacentes. As cadeias se situam ao longo do eixo c_0 da cela unitária (Figura 3) e c_0 apresenta comprimento de aproximadamente de 5,2 Å (Deer *et al.*, 1978). As variáveis X e Y da fórmula geral correspondem aos cátions que ocupam os sítios cristalográficos M2 e M1, respectivamente. Esses cátions conectam lateralmente as cadeias $(SiO_3)_n^{2n-}$ e ficam, com o oxigênio dos tetraedros, em coordenação 7 a 8 no sítio M2 e em coordenação 6 no sítio cristalino M1 (Deer *et al.*, 1978). A variável Z da fórmula geral corresponde aos cátions que ocupam os sítios T da cadeia tetraédrica. Os sítios M1 e M2 compartilham vértices de modo a formarem folhas de poliedros de coordenação dentro dos planos (100). Dessa forma, nota-se que a estrutura apresenta camadas de tetraedros

Figura 3: Estrutura cristalográfica do clinopiroxênio. Em B é representada a célula unitária. As estruturas estão orientadas pelos eixos cristalográficos. Imagem obtida pelo *software* XTALDRAW, conforme parâmetros encontrados em Levien e Prewitt (1981).

intercaladas com camadas de octaedros paralelamente ao plano (100) (Cameron e Pepike, 1981).

Os oxigênios da cadeia tetraédrica são discriminados por O1, O2 e O3. Os oxigênios compartilhados entre duas unidades tetraédricas são designados O3, enquanto O1 e O2 são os oxigênios não compartilhados, que se orientam em direções diferentes (Cameron e Pepike, 1981). Os sítios M2 se localizam entre as bases e os M1 entre os ápices da cadeia de tetraedros com o M2 maior e mais distorcido que M1. Na incorporação de cátions de raios diferentes entre M1 e M2, dentro do intervalo de tolerância da estrutura, ocorrem mudanças na disposição das cadeias tetraédricas e a expansão ou contração de alguns parâmetros de cela, porém sem alterações no grupo espacial (Deer *et al.*, 1978). Em M1, são encontrados cátions de raio iônico de 0,53 Å a 0,83 Å com estado de oxidação que varia entre 2+, 3+ e 4+ e, em M2, o tamanho iônico pode variar do Mg^{2+} (0,72 Å) ao do Na^+ (1,16 Å) (Cameron e Pepike, 1981). Entretanto, o tamanho de M2 varia também conforme o íon ocupado em M1. Em piroxênios sódicos, com Na^+ em M2, o comprimento médio das ligações M2-O pode variar de 2,47 Å a 2,57 Å com a ocupação de Al^{3+} (0,53 Å) e In^{3+} (0,80 Å) em M1, respectivamente (Cameron e Pepike, 1981). O cátion que ocupa M2 exerce grande influência sobre o ângulo β da cela unitária do clinopiroxênio, efeito esse que não é tão expressivo em decorrência da variação de cátions que ocupam M1 (Deer *et al.*, 1978). No estudo estrutural do sítio M2, clinopiroxênio com ocupação iônica de 20% de Mg^{2+} e 80% de Ca^{2+} em M2 mostrou duas posições com configurações distintas para esse mesmo sítio. No entanto, é assumido que as posições sejam equivalentes quando a temperatura está próxima a do *solidus*, pois cresce o grau de desordem, ou seja, aumenta distribuição dos dois íons (Tribaudino *et al.*, 1989).

Dependendo da composição química, os cristais de clinopiroxênios pertencem aos grupos espaciais monoclinicos C2/c ou P2₁/c. Há perda de simetria de C2/c para P2₁/c com inserção de cátions menores como Mg^{2+} em M2. Assim, os piroxênios mais ricos de Ca^{2+} são mais simétricos que os mais pobres nesse cátion (Deer *et al.*, 1978). São classificados em grupos mais gerais de acordo com o cátion que é ocupado em M2: clinopiroxênios cálcicos, clinopiroxênios sódicos e cálcio-sódicos ou ainda de lítio, que são raros. A composição pode ser representada por meio do sistema químico designado pelos membros finais $CaSiO_3$ - $MgSiO_3$ - $FeSiO_3$ para os clinopiroxênios cálcicos, dentro do qual são reconhecidas séries de soluções sólidas (Deer *et al.*, 1978). Já os clinopiroxênios sódicos e cálcio-sódicos são

representados quimicamente pelo sistema químico $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6\text{-NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6\text{-Q}(\text{CaSiO}_3\text{-MgSiO}_3\text{-FeSiO}_3)$ (Deer *et al.*, 1978).

São observados cristais de clinopiroxênios com composições intermediárias aos dos membros finais. Essa variabilidade composicional é responsável pela grande diversidade de espécies de clinopiroxênio e é consequência da formação das soluções sólidas. Estas últimas ocorrem pela inserção de íons diferentes em sítios cristalinos do mesmo tipo em um mineral e envolvem os mecanismos de substituição simples, acoplada ou de omissão na sua formação. Em Colson *et al.* (1989), a incorporação de elementos traços em piroxênios de baixo conteúdo de Ca^{2+} é sugerida via solução sólida, que tem como alternativa, entre os mecanismos já citados, o surgimento de vacância e a inserção de um íon de maior carga. Os vários tipos de substituições existentes dependem da disponibilidade e da carga dos íons no sistema, do tamanho dos íons em relação ao sítio cristalino e da temperatura e pressão. Em relação aos clinopiroxênios, as possíveis substituições acopladas (Morimoto *et al.*, 1988) a partir do íons padrões ($\text{M}_{\text{VIII}}^{2+}$, $\text{M}_{\text{VI}}^{2+}$, 2T^{4+}) estão exemplificadas pelas equações de (16) a (19). Nos sistemas reais, múltiplas substituições catiônicas podem ocorrer concomitantemente. Quando a composição do mineral não condiz à estequiometria de uma substituição acoplada em um sistema fechado, outras substituições podem ser consideradas.

Devido às dificuldades que substituições catiônicas diversificadas e longas extensões de soluções sólidas geram na atribuição da nomenclatura dos piroxênios, foi necessário se ater a subdivisões das séries de soluções sólidas com intervalo composicional e nomes específicos (Morimoto *et al.*, 1988). Assim, os clinopiroxênios cálcicos são constituídos por 3 séries de soluções sólidas. O diagrama ternário de classificação mostra a extensão das soluções sólidas em termo das moléculas dos membros finais wollastonita (CaSiO_3), enstatita

(MgSiO_3) e ferrossilita (FeSiO_3). A série da pigeonita, $(\text{Ca,Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$, é caracterizada por minerais com 5% a 15% de molécula de wollastonita. A série completa entre os membros diopsídio, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, e hedenbergita, $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$, apresentam, aproximadamente, 50% de molécula de wollastonita. Já a série da augita, que é mais empobrecida em Ca^{2+} em relação à série do diopsídio-hedenbergita e apresenta algumas substituições diferenciais mais significativas, como Al^{3+} por Si^{4+} em T, Al^{3+} por Mg^{2+} ou Fe^{2+} em M1 e Na^+ por Ca^{2+} em M2 (Deer *et al.*, 1978). A composição dos piroxênios cálcicos pode ser expressa pela porcentagem molecular dos membros finais wollastonita (Wo), enstatita (En) e ferrossilita (Fs), por exemplo, $\text{Wo}_{50}\text{En}_{35}\text{Fs}_{15}$. Também, tal composição pode ser indicada pela porcentagem molecular dos membros finais das séries de soluções sólidas. Cita-se, como exemplo, $\text{Di}_{55}\text{Hd}_{45}$ da série do diopsídio (Di) e hedenbergita (Hd).

No quadrilátero Di-Hd-En-Fs, ou Quad, há uma lacuna de miscibilidade entre os piroxênios mais e os menos cálcicos em que o sistema não é composto por uma solução sólida homogênea, como ocorre nas regiões das séries da augita e da pigeonita. A lacuna de miscibilidade consiste na separação de dois ou mais minerais distintos coexistentes e é uma região que sofre redução com o aumento da temperatura. Apesar dos piroxênios cálcicos se tornarem C2/c a altas temperaturas, a lacuna persiste mesmo que reduzida (Deer *et al.*, 1978).

O clinopiroxênio cálcio-sódico, onfacita, cuja fórmula geral é $(\text{Ca, Na})(\text{Mg, Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})(\text{Si}_2\text{O}_6)$ apresenta um polimorfo de alta temperatura (C2/c) e outro de baixa temperatura (P2/n) (Morimoto *et al.*, 1988). O conteúdo de $\text{Al}^{3+}_{\text{IV}}$ é menor que 3% e a composição pode ser expressa através dos membros $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$, $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ e $\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$ (Deer *et al.*, 1978). O piroxênio sódico jadeíta ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$) ocorre em rochas metamórficas e não apresenta comumente substituição de Si^{4+} por Al^{3+} . A egrina ($\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$) tem extensa solução sólida com a augita.

4.2. Influência da composição, temperatura e pressão em clinopiroxênios e a incorporação de elementos traços

A variação composicional e a ocupação catiônica em clinopiroxênios podem indicar as condições de temperatura e pressão em que ocorreu a sua cristalização. Em meio deficiente em SiO_2 , o Al^{3+} tende a ocupar os sítios T remanescentes dos clinopiroxênios. Essa locação é mais pronunciada a temperaturas elevadas. Em contrapartida, a altas pressões, os íons Al^{3+} tendem a ocupar os sítios octaédricos. Um estudo que abordou a disposição do Al^{3+} nos sítios

cristalinos em clinopiroxênios de ocorrências ígneas e metamórficas (Aoki e Kushiro, 1968) indicou que clinopiroxênios de eclogitos apresentam Al^{3+} em maior proporção nos sítios M1 que em T e o inverso foi mostrado para clinopiroxênios de rochas ígneas. A relação entre composição e a pressão também é explorada por meio dos parâmetros cristalográficos dos clinopiroxênios para o desenvolvimento de geobarômetro (Nimis e Ulmer, 1998). A variação linear entre pressão e os volumes do sítio M1 e da cela unitária em clinopiroxênios é explicada pelas substituições catiônicas acopladas tais como Na^+ por Ca^{2+} em M2 e Al^{3+} por Mg^{2+} em M1 e a atividade composicional do magma que leva a incorporação do componente de Tschermark cálcica em clinopirôxênio de modo adequar a estrutura cristalina às condições físicas do sistema (Nimis, 1995). O aumento de temperatura faz com que haja a expansão dos sítios M1 e M2, mas não ocorre de forma significativa para os sítios T. Assim, a expansão da cela unitária ocorre mais na direção do eixo b e menos em c e torna a estrutura mais tolerante à ocupação de íons maiores nos sítios M (Deer *et al.*, 1978).

Em Adam e Green (1994), algumas trocas iônicas em clinopiroxênios em equilíbrio com basanitos, em função da temperatura e pressão, foram discutidas. As substituições são atribuídas ao volume do sítio cristalino que se altera com a variação de pressão e à mudança no grau de ordem entre os sítios com a mudança de temperatura. Com o aumento da pressão, a maior incorporação de Si^{4+} em T e de Al^{3+} em M1 faz com que os volumes de M1 e M2 diminuam e que íons mais carregados e menores passam a integrar o sítio M1. O aumento de temperatura faz com que a proporção de Al^{3+} em T e em M1 aumente e também a proporção de Na^+ em M2; porém, a ocupação de Al^{3+} no sítio octaédrico diminui o volume de M2. Por esse motivo, há o aumento de D_{Lu} em M2, tendo em vista que o seu raio iônico é menor dentro da série. Ressalta-se que, neste último caso, o Al^{3+} em M1 e T e o Na^+ constituem já um balanço de carga e, por isso, não há alteração significativa na incorporação de Ti^{4+} , por exemplo.

A substituição de Ca^{2+} por ETR^{3+} , pelas similaridades de tamanhos de raios iônicos, é realizada no sítio M2 do clinopiroxênio (Gallahan e Nielsen, 1992). Segundo Colson *et al.* (1989), no caso da substituição de elementos com carga 3+ em sítios comumente ocupados por cátions de carga 2+, o balanço de carga é realizado pela formação de vacância na estrutura ou pela substituição acoplada de Al^{3+} por Si^{4+} nos sítios T. A porcentagem crescente da componente Tschemark cálcica (CaAlAlSiO_6) facilita a incorporação de ETR devido a expansão dos sítios M2 e a maior proporção de Al^{3+} em T (Gaetani e Grove, 1995), o que possibilita

também o balanço de carga já que um íon de estado de oxidação 3+ é inserido em M2 (Hill *et al.*, 2000; Sun e Liang, 2012).

4.3. Clinopiroxênio em rochas máficas alcalinas

A composição do clinopiroxênio formado depende das condições físico-químicas atuantes durante a cristalização. Por exemplo, o diopsídio de um lamprófiro alcalino (Ubide *et al.*, 2014) do último estágio da consolidação da rocha apresenta fração mássica de Cr abaixo do limite de determinação da técnica analítica, Co + Ni igual a 45 ppm e soma de ETRs a 124 ppm. Por outro lado, a soma de ETRs de hedenbergita de um riolito (Olin e Wolff, 2010) resulta em 824 ppm e, no diopsídio de um basalto, em 21 ppm (Lee *et al.*, 2007).

Diferentes populações de clinopiroxênio são reconhecidas em rochas máficas alcalinas. Em Shaw e Eyzaguirre (2000), foram encontrados três tipos de clinopiroxênio em lavas de composição nefelinítica a basanítica. O primeiro grupo consiste em cristais de $mg\# = (Mg / (Mg + Fe_T)) \times 100$, com os termos em apfu, de 86 a 88 e são ricos em Cr, mas pobre em Ti. Aparentam em composição com cristais que perfazem xenocristais estudados da região. O segundo grupo constitui cristais de $mg\#$ de 72 a 87 e mostra um padrão de fracionamento: enquanto o $mg\#$ diminui, Ti, Al, Ca e Na aumentam. O terceiro grupo identificado tem baixo $mg\#$ (~60), Al, Ti e Ca, mas apresenta mais alta fração mássica de Na que os demais cristais de clinopiroxênio. Em Arzamastsev *et al.* (2009), três tipos de clinopiroxênio foram encontrados em um complexo alcalino máfico. O primeiro tem feição de reabsorção, é enriquecido em HFSE e ETRs e a componente hedenbergita varia de 20% a 55%. Seu $mg\#$ médio é de 51. O segundo tipo contém teor de Cr restrito a 1,2 %, $mg\#$ médio de 77 e distribuição de ETRs típico de rochas alcalinas. O terceiro tipo compõem a matriz e as zonas mais externas dos outros dois tipos de clinopiroxênio e apresenta maior conteúdo de ETRs e HFSE que os cristais tipo 2. O $mg\#$ destes cristais é em média 73.

Assim, ressalta-se que há um grande contraste composicional entre cristais de clinopiroxênio de diferentes sistemas. A maior incorporação de elementos traços é dependente da composição de elementos maiores do cristal e do líquido, da abundância dos elementos traços no magma, assim como, de T e P. No que diz respeito a um grupo de rochas de um mesmo complexo, ou mesmo dentro de um corpo, podem haver distintas populações de um mineral caracterizadas por diferenças mineralógicas limitadas. Há evidências que magmas básicos e ultrabásicos alcalinos podem ser originados a grandes profundidades no

manto (Fitton e Upton, 1987). Consequentemente, rochas máficas alcalinas podem carregar, em direção à superfície, cristais e fragmentos de litotipos do manto como também cristais com registro dos estágios de evolução magmática, com complexos zonamentos composicionais.

5. Procedimento experimental

5.1. Introdução

Pode ser evidente em alguns estudos que a obtenção dos dados analíticos é dirigida a terceiros quando o pesquisador não apresenta meios ou habilitação técnica para realização da parte experimental. Todavia, o conhecimento do método analítico empregado tal como a participação e/ou acompanhamento das etapas experimentais de análise das amostras, quando possível, são pontos de relevância para que o pesquisador reconheça o grau de qualidade dos dados analíticos obtidos. É indispensável que haja uma comunicação elucidativa entre pesquisador e técnico analítico quanto ao meio da caracterização do tipo de amostra e dos objetivos analíticos almejados (Enzweiler, 2010). Assim, é possível determinar o método mais adequado a ser aplicado entre os disponíveis.

As primeiras questões a serem discutidas são as propriedades químicas e físicas gerais das amostras, estratégia de amostragem, homogeneidade da fonte amostral, da amostra e da alíquota a ser analisada e o limite de detecção das técnicas analíticas. Em sequência, incluem-se também discussões sobre vias de contaminação ao longo do método, interferências analíticas, precisão e exatidão. Neste caso, fica implícita que a validação do método de determinação já deve ser uma etapa estudada (Krug, 2008). De tal modo, o pesquisador adquire noção e reconhece a importância da sequência analítica como é capaz de identificar possíveis fontes de erros sistemáticos.

5.1.1. Sequência analítica na determinação de elementos maiores, menores e traço em rochas silicáticas

A sequência do método analítico compreende desde as etapas pré-operacionais como definição do problema analítico e a escolha do método até as operacionais como amostragem, pré-tratamento de amostra, calibração, avaliação, obtenção e tratamento de dados (Krug, 2008). Uma vez inferidas as etapas pré-operacionais, inicia-se a amostragem sobre o qual o pesquisador ou o analista tem o compromisso de coletar amostras de forma a garantir a representatividade do corpo ou objeto de estudo e integridade química do material coletado (Kratochvil, 2003). O tipo de amostragem designará no resultado final um conjunto de dados que exprime a variação composicional ao longo de uma secção do corpo estudado ou a composição global de todo o corpo. Em Ubide *et al.* (2012), a variação composicional na

secção transversal de um sill de lamprófiro de menos de 0,5 m foi estudada por meio da amostragem das 5 zonas modalmente diferenciadas. Segundo Potts (1987), é sugerido que, em amostras de rochas silicáticas com heterogeneidade não elevada, seja amostrado no mínimo 1 kg da fonte com objetivo de obter uma amostra representativa do todo.

No estágio seguinte, ainda no pré-tratamento de amostra, além das etapas de limpeza e secagem, está inserida uma sequência de subetapas que resultam na adaptação das condições químicas e físicas da amostra e analito de modo que possibilite a aplicação de uma dada técnica analítica (Krug, 2008). Podem ser citados os pré-tratamentos físicos como britagem, moagem e os químicos como a derivatização e as digestões via úmida (Knapp e Schramel, 2003). É no pré-tratamento de amostra em que processos de contaminação e perdas por volatilização são mais propensos de ocorrer, podendo ser responsáveis por 30% dos erros de análise segundo Oliveira (2003). Por exemplo, o uso de panela de carbetto de tungstênio na moagem não é considerado uma alternativa adequada quando se requer a análise de elementos traços como W, Co, Ta e Nb nas amostras, visto que o material da panela é fonte de contaminação dos elementos citados (Sertek *et al.*, 2015). Da mesma forma, o uso de reagentes e solventes de alto grau de pureza, a descontaminação de vidraria e dos equipamentos e a limpeza dos ambientes de trabalho são procedimentos essenciais para o melhor desempenho do procedimento analítico (Knapp e Schramel, 2003; Krug, 2008).

As análises diretas de sólidos e, especificamente, as *in situ*, não requerem a prévia dissolução da amostra e permitem a aplicação de etapas de pré-tratamento de amostras menos laboriosas que diminuem as chances de contaminação/perda de analito (Nomura *et al.*, 2008). A fluorescência de raios X (FRX), largamente utilizada em estudos geoquímicos, utiliza amostra na forma pulverizada e prensada com um aglutinador na determinação de elementos traços. Técnicas como a microsonda eletrônica (ME) são atrativas por possibilitarem a associação das análises químicas e a resolução espacial (Reed, 2005) e exigem um preparo das amostras simples e rápido que compreende entre laminação, polimento de superfície e recobrimento por carbono.

Na determinação de elementos maiores, menores, traços em amostras geológicas, técnicas instrumentais espectroscópicas são geralmente empregadas e se fundamentam na medida de radiação absorvida ou produzida pelo analito, ou pela medida da razão carga / massa do íon em análise no caso da espectroscopia de massa (MS) (Potts, 1987). Na determinação qualitativa e quantitativa de vários elementos que constituem rochas e

minerais, as técnicas multielementares simultâneas ou sequenciais de alta seletividade são os meios mais rápidos de se obter resultados. A seletividade é a capacidade do equipamento em produzir sinal de vários elementos presentes na alíquota analisada discriminando um sinal do outro, ou seja, resultados sem interferentes (Vessman *et al.*, 2001). Esta característica é alcançada com dispositivos como os cristais analisadores e monocromadores, por exemplo.

Assim, deve-se recorrer às técnicas cujos atributos e especificidades ajudarão a atingir o objetivo analítico. A Tabela 1 apresenta de forma concisa fundamentos de funcionamento e características importantes das técnicas empregadas neste trabalho. Inicialmente, as técnicas menos sensíveis são recomendadas para a análise de elementos maiores e menores e as mais sensíveis precisas para elementos traços. A sensibilidade se define como a razão entre o valor do sinal analítico, resposta da técnica, e a concentração do analito analisado (IUPAC, 2006).

A necessidade de análises pontuais de cristais ou mesmo matrizes para o estudo composicional de detalhe leva à escolha de técnicas como LA-ICP-MS (*laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry*) e ME (*e.g.*, Foley *et al.*, 2011; Ubide *et al.*, 2014). Já a química total de rochas é obtida, geralmente, por técnicas como ICP-MS para traços (ppb-ppm) e FRX para elementos maiores, menores e alguns elementos traços em ppm (*e.g.*, Saadat e Stern, 2012).

Dois parâmetros são considerados importantes para limitar inferiormente a faixa de trabalho da técnica: limite de detecção (LD) e o limite de quantificação (LQ). O primeiro aponta a quantidade mínima de analito que a técnica analítica pode detectar para haver uma distinção entre sinal analítico e o ruído instrumental (González e Herrador, 2007). O segundo é a quantidade mínima de analito que pode ser determinado com precisão aceitável (González e Herrador, 2007). Por sua vez, técnicas que utilizam curva de calibração podem ter o limite superior de trabalho diagnosticado a partir do ponto em que a curva perde a linearidade (Van Zoonen *et al.*, 1998).

O bom funcionamento da técnica também está relacionado à ausência de interferentes não espectrais que correspondem aos efeitos de matriz. Em Química Analítica, o termo matriz se refere aos outros constituintes da amostra que não seja a espécie em análise, o analito. Os interferentes não espectrais alteram a sensibilidade da técnica, ou seja, concomitantes da matriz podem aumentar ou suprimir o sinal do analito (IUPAC, 2006). Em ICP-MS, por exemplo, o Ar que constitui o plasma pode ser um interferente não espectral do ^{56}Fe ao formar $^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}^+$. Todavia, a utilização de cela dinâmica de reação em ICP-MS possibilitou a análise do ^{56}Fe com

a diminuição de tal interferência quando se utiliza quadrupolo como analisador (Ebdon *et al.*, 2003).

Os efeitos de matriz podem ser contornados pelo uso de materiais de referência de composição próxima a da amostra. No entanto, são poucos os materiais de referência disponíveis no mercado que correspondem às propriedades e composição dos materiais geológicos. A saída encontrada para técnicas como FRX e ME foi o desenvolvimento e aplicação correções teóricas, algoritmos, como alternativa para minimizar tais efeitos (*e.g.*, Gomes, 1984). Materiais de referência também podem ser utilizados como controle do desempenho do método e investigação da veracidade do mesmo (Enzweiler, 2010).

Apesar de se tratar de uma técnica semiquantitativa (EDS), o microscópio eletrônico de varredura (MEV) é uma técnica que se destaca pela velocidade de aquisição de dados e aplicabilidade dos mapas de detalhe topográfico e composicional. Nos equipamentos modernos de ME, o MEV encontra-se acoplado como técnica auxiliar.

Desta forma, este capítulo tem o compromisso de descrever os procedimentos, materiais e condições analíticas instrumentais utilizadas neste trabalho. Está inserida neste capítulo também a produção de lâminas para petrografia e fotomicrografias, já que são etapas de avaliação textural das amostras, cuja importância está relacionada à qualidade dos dados das análises químicas pontuais em função da problemática do estudo. Cabe salientar que as análises de rocha total para elementos maiores e menores por FRX e as de elementos traços por ICP-MS, obtidas a partir da dissolução ácida de fundidos de boratos, foram realizadas no laboratório AcmeLabs® em Vancouver, Canadá. Por esse motivo, a

Tabela 1 : Resumo das características gerais das técnicas utilizadas para análises químicas ou para obtenção de materiais de apoio (fotomicrografias). Abreviações: ND (não destrutivo), D (destrutivo), S (sensibilidade), Z (número atômico), AP (análise pontual), e- (elétrons) e LD (limite de detecção), WDS (wavelength dispersive spectroscopy), EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy). Referências: Denoyer et al. (1991), Potts (1987), Reed (2005), Dedavid et al.(2007) e este trabalho.

Técnica	Fundamento			Amostra e Introdução de amostra	Componente de seleção	LD / ppm	Elementos	Outras características
	Excitação	Fenômeno	Medição					
FRX	raio X (radiação primária)	ionização das camadas mais internas dos elementos / excitação	raio X (radiação secundária)	sólida / pastilha fundida ou prensada	cristais analisadores	0,1-100	Z>10	ND, alta precisão, sensibilidade moderada
ME (EDS)	e ⁻	ionização das camadas mais internas dos elementos / excitação	raio X	sólida / lâmina	detector de estado sólido Si(Li) ou Ge	1000 - 3000	Z>11	ND, rapidez de aquisição de dados, caráter semi-quantitativo, AP, mapa composicional (demorado)
ME (WDS)	primário				cristais analisadores	100 - 300	Z>4	ND, S moderada, alta precisão, AP, mapa composicional (demorado)
ICP-MS	fótons / plasma	ionização, Separação elementos massa/ carga	número de íons	ablação de sólido (LA)	quadropolo	0,001-1	Exceto: componentes do plasma e do solvente, F, Cl, Br	D, resolução espacial mais baixa que ME, boa precisão, detecção de isótopo, S alta, AP
				aspiração e nebulização de líquidos				D, alta precisão, detecção de isótopo, S alta
MEV	e ⁻ primários	e ⁻ são ejetados com a ionização dos átomos da amostra	e- secundários (SE)	sólida / lâmina	detector cintilador			ND, mapa de detalhe topográfico e composicional, alta resolução espacial, S moderada
		e ⁻ com espalhamento elástico	e- retroespalhado (BSE)					

descrição dos respectivos métodos em particular está sucinta. As demais etapas foram realizadas seguindo o trabalho já desenvolvido pelos laboratórios e com a infraestrutura do Núcleo de Apoio à Pesquisa (NAP) GeoAnalítica-USP, sediado no Instituto de Geociências (IGc) da Universidade de São Paulo, bem como a utilização de outros laboratórios do IGc.

5.2. Parte experimental

5.2.1. Instrumentação

Na etapa de cominuição da amostra, foram utilizados serra com disco diamantado (APF Usinagem, São Paulo) e uma prensa hidráulica de aço com 30 ton força (Schwing Siwa Equipamentos Industriais, São Paulo). Também foram empregados os moinhos de bola Planetary Mono Mill – Pulverisette 6 (Fritsch, Alemanha) e de anéis Vibrating Cup Mill - Pulverisetti 9 (Fritsch, Alemanha). O primeiro foi utilizado com panela de ágata de capacidade volumétrica de amostra entre 1 e 30 ml e 10 esferas do mesmo material com 10 mm de diâmetro. O equipamento apresenta como opção as frequências de rotação entre 100 e 600 rpm. No segundo, foram utilizadas duas panelas de ágata com capacidade volumétrica de 20 a 30 ml e de 40 a 70 ml de acordo com o volume de cada amostra. O equipamento apresenta velocidade acima de 1500 ppm.

A balança utilizada para pesagem semi analítica foi a CG Libror, modelo 3220H e, para as pesagens analíticas as balanças modelo AG 245 (Mettler Toledo) e AP-250d (Ohaus), todas até centésimos de mg. O aquecimento e secagem das soluções, quando necessário, ocorreram em chapa elétrica de alumínio da empresa Fisaton. A seleção de matriz de algumas amostras foi efetuada em lupa, modelo Z-11 (Olympus, Japão) com aumento de 18 a 110x e razão de zoom de 1,8 a 11x. A secagem das amostras, quando necessária, foi realizada na estufa modelo 315 SE (Fanem).

As digestões das amostras e materiais de referência em meio ácido foram realizadas no forno de microondas modelo MDS 2100 (CEM, Carolina do Norte, EUA). Este equipamento é de baixa a média pressão e apresenta carrossel com capacidade de 12 vasos fechados de Teflon® PFA (perfluoralcóxi). A frequência do magnetron do equipamento é de 2450 MHz. A pressão é monitorada por um sensor acoplado no interior de um dos vasos.

As lâminas petrográficas foram produzidas utilizando-se serras com disco diamantado, máquina de corte modelo 137-U (Reliance, EUA) e de polimento modelo PM4, Precision Lapping and Polishing Machine (Logitech, Escócia). O revestimento das lâminas com filme de

carbono foi realizado num equipamento modelo auto 306 Vacuum Coater (BOC Edwards, Inglaterra), com funcionamento por pulverização catódica.

No estudo petrográfico, além do microscópio óptico, foi utilizado um Microscópio Eletrônico de Varredura, modelo 440i da empresa LEO Electron Microscopy Ltd (Cambridge, Inglaterra). O equipamento apresenta um espectrômetro de energia dispersiva de raio X, detector de estado sólido de Si(Li), com janela de 10 mm² e resolução de 138 eV a 5,9 keV. Também compõem o equipamento o detector de elétrons secundários tipo 1 (SE1) e o detector de elétrons retroespalhados do tipo quatro semi condutores (QBSO). O *software* utilizado no equipamento é o Inca 300 da Oxford Instruments Ltd (Oxford, Inglaterra).

Para as determinações de traço no Laboratório de Química do NAP-GeoAnalítica-USP, foi empregado ICP-MS, modelo ELAN 6100 (DRC - *Dynamic Reaction Cell*) da empresa PerkinElmer. O equipamento apresenta sistema de introdução de amostra de quartzo, cone de interface de platina, lentes automáticas, cela de reação dinâmica, analisador do tipo quadrupolo e detector de dois estágios e fotomultiplicador. Ao equipamento é acoplada uma câmara de *nebulização* ciclônico e a introdução da solução da amostra foi realizada com o auxílio de um amostrador automático modelo AS – 93 Plus (PerkinElmer). No caso de análise *in situ*, é acoplado ao ICP-MS o sistema de ablação por *laser* modelo UP-231/AF da empresa New Wave. O laser utilizado é o de Nd:YAG, modelo Tempest (Eolite), com comprimento de onda de 213 nm e operação no modo *Q-switched*.

Parte das análises de química mineral e de matriz (elementos maiores, menores e alguns traços) foi feita na microsonda eletrônica JXA-FE-8530 (JEOL, Japão) do Laboratório de microsonda eletrônica do NAP-GeoAnalítica-USP. O instrumento é equipado com cinco espectrômetros de WDS, tendo cada um 2 cristais analisadores intercambiáveis. Os cristais presentes são TAP, LIFL, PETJ e TAPH. A configuração utilizada nas análises consistiu nos seguintes cristais nos canais de 1 a 5: 1 - TAP, 2 - LIFL, 3 - PETJ, 4 - LIFL e 5 - TAPH. Contém um espectrômetro de EDS e um detector de imageamento por catodoluminescência (CL).

5.2.2. Amostras, soluções, materiais para fabricação de lâminas e de descontaminação

Na preparação dos padrões analíticos para a construção de curva de calibração e amostras para análise por ICP-MS, foi utilizada água deionizada de baixa resistividade (18,2 MΩ cm a 25 °C) adquirida pelo sistema Milli-Q Plus de ultrapurificação de água (Millipore). Foram também utilizados na etapa de digestão das amostras e materiais de referência, HNO₃

(Merck, Darmstadt, Alemanha) e HF (Merk, Darmstadt, Alemanha), ambos de grau analítico e destilados no modo *subboiling*. Na produção das pastilhas fundidas para análises em FRX, foi empregado como fundente tetraborato de lítio / tetraborato de lítio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ / LiBO_2) grau espectroscópico.

Na fabricação de lâminas petrográficas ou para determinações químicas por LA-ICP-MS, foram utilizados pasta de alumina, resina EpoxySet Resin e secante EpoxySet Hardener da Allied. O recobrimento das lâminas para MEV e ME foi realizado com grafite BOC Edwards disponível como tarugo.

As amostras utilizadas neste estudo estão na Tabela 2, assim como o número de análises executadas em cada uma. A explicação dos códigos das amostras é dada no Capítulo 6. Cabe mencionar que os códigos procedidos pela palavra matriz em parênteses não discrimina os dois procedimentos experimentais utilizados na obtenção de composição química da matriz e os códigos específicos são dados nos subitens 5.2.3.3., 5.2.4.3. e 5.2.4.4..

Na descontaminação de equipamentos e vidrarias, foram empregados HNO_3 (65% m / m) (Synth, Diadema, São Paulo, Brasil), Extran (Merck), etanol comercial (96 % v / v) e água destilada e deionizada.

5.2.3. Procedimento

5.2.3.1. Preparação de amostras

As amostras foram previamente lavadas com água corrente e secas ao ar livre. Após, foram serradas em fatias de espessuras de aproximadamente 1 cm. O material, assim preparado, foi destinado a diferentes fins como a preparação de pó para análise química por FRX e ICP-MS e de lâminas para as análises por MEV e LA-ICP-MS.

5.2.3.2. Preparação de pó para análise de rocha total por FRX e ICP-MS

Inicialmente, as capas de intemperismo das amostras foram retiradas por meio da prensa hidráulica. Quando necessário, as amostras foram novamente lavadas com água corrente e secas ao livre para retirar algum resquício do pó da camada de intemperismo. Em seguida, cerca de 230 a 400 g das amostras foram prensadas. Xenólitos e xenocristais de

Tabela 2: Código das amostras e número de análises por amostra na determinação de elementos maiores, menores e traços pelas diferentes técnicas utilizadas neste trabalho. Legenda: FRX (fluorescência de raio X); ICP-MS (inductively coupled plasma mass spectrometry); LA-ICP-MS (laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry) e ME (microsonda eletrônica).

Amostra	FRX	ICP-MS	ME			LA-ICP-MS		
			olivina	clinopiroxênio	matriz	olivina	clinopiroxênio	matriz
DAPGG -C1	1	2						
DAPGG-C2	1	2		35			17	
C2 (matriz)	1	3						
DAPGG-I	1	2		61			29	
I (Matriz)	1	4						
DAPGG-B	3	4		48				
B (Matriz)	1	3			101			21
DSMB-C	1	3	21	37		13	10	
DSMB-B	1	3	11				9	
B (Matriz)					64			
DSMU-C	1	2	59	23		8	10	
C (Matriz)	1	3						
DSMU-B1	2	4						
B1 (Matriz)	3	3						
DSMU-B2	1	3	24	9		11	2	
B2 (matriz)					27			11
DSMU-BE1	2	4						
DSMU-BE2	1	2	36	13		11	6	
BE2 (Matriz)					28			
DSMPN	1	2		29				
(Matriz)	1	3			64		6	
Total	24	52	151	255	284	43	89	32

encaixantes crustais, fraturas com alteração ou pequenos veios preenchidos foram descartados no início da prensagem.

Na etapa seguinte, foi realizado quarteamento nas amostras que apresentavam, pelo menos, o volume de aproximadamente 80 ml de material prensado. O quarteamento consistiu na distribuição do pó prensado formando uma coluna sobre uma folha de papel sulfite branca. A distribuição do pó foi realizada com movimentos de alternância de sentido sobre o mesmo montante. A coluna foi dividida em 4 frações de mesmo volume, sendo as duas centrais as duplicatas 1 e 2 e as duas laterais separadas como uma fração única. Antes de iniciar a moagem no moinho de anéis de uma determinada amostra, parte da fração única era moída por 1 min para limpar e ambientar quimicamente o moinho para a respectivas moagens das frações 1 e 2. O processo de moagem foi de 15 min por fração, suficientes para a obtenção de pó com partículas menores que 200 mesh. Por indisponibilidade temporária do equipamento, as frações de três amostras foram moídas em moinho de bolas de ágata em 3 etapas de 2 minutos cada a 500 rpm. Neste caso, a qualidade foi bastante similar ao do pó obtido pelo moinho de anéis. Essa avaliação foi realizada pelo tato, comparando-se a homogeneidade do tamanho dos grãos do pó e se foi atingida a granulometria de silte.

Todos os pós produzidos foram armazenados em sacos plásticos de polietileno. A prensa foi limpa com estopa e álcool etílico e seca com jato de ar pressurizado após a prensagem de cada amostra. O quarteamento foi realizado logo após a prensagem da amostra, utilizando o mesmo ambiente, para se evitar contaminação cruzada. A panela do moinho de anéis foi lavada com detergente e água corrente, enxaguado com álcool etílico e seco com ar pressurizado. Já a panela do moinho de bolas e as esferas foram lavadas com água corrente e detergente e depois enxaguadas com água destilada.

5.2.3.3. Preparação de pó para análise de matriz por FRX e ICP-MS

Parte significativa das amostras selecionadas para este estudo apresentava textura porfíritica, dessa forma, além das análises químicas totais de rocha, um trabalho de preparação específico foi realizado para a análise da matriz fina destas amostras, o qual envolveu inclusive o trabalho de catação manual das populações de macro- e megacristais.

As fatias de rocha de algumas amostras, após a retirada da capa de alteração, foram prensadas de forma que obtivessem fragmentos de alguns milímetros. Bastante atenção foi dada ao descarte de regiões das amostras com presença de xenólitos e xenocristais da encaixante. O material formado foi peneirado com agitação manual e foram separados 3 frações das quais a granulometria consistiu, respectivamente, em menor que 200 mesh, entre 200 e 80 mesh e maior de 80 mesh. A fração intermediária foi lavada com água destilada para eliminar o pó ainda presente. Em seguida, estes fragmentos foram deixados na estufa por 24 h a 60 °C.

Em uma lupa, foi realizada a catação de macro e megacristais do material seco e o restante constituído predominante pela matriz foi separado para a presa e moagem. A identificação de fragmentos sem macro e megacristais obedeceu aos seguintes critérios: granulometria fina dos cristais e homogeneidade. Os xenocristais da encaixante foram reconhecidos pelo tamanho mais desenvolvido e coloração clara, bem contrastante com a matriz escura das amostras do estudo. Os macrocristais mais observados pela lupa foram os de clinopiroxênio de cor escura e os de olivina, esverdeados. Aglomerados de cristais que se destacavam no meio da matriz foram considerados xenólitos. No total, foram separados aproximadamente 25 g de matriz de cada amostra.

As matrizes selecionadas foram prensadas e moídas em moinho de anéis de acordo com o procedimento descrito no item anterior. O quarteamento não foi possível devido à quantidade limitada de pó gerado. O processo de descontaminação da panela após a lavagem foi realizado com o pó da fração mais fina da etapa de peneiramento. As análises das matrizes obtidas por este procedimento é indicada por M após o código original na amostra, por exemplo, DSMPN-M.

5.2.3.4. Digestão ácida de amostras em forno microondas para análise por ICP-MS

Este procedimento foi baseado em Navarro *et al.* (2008). Em uma barquinha de polietileno, foram pesados 50 mg de amostra e esta quantia foi transferida para o tubo de PFA. Em seguida, foram feitas as adições de 5 ml de HNO₃ e 15 ml HF, ambos concentrados. O sistema foi mantido tampado por 2h para liberação de possíveis vapores de CO₂. Após, foi aplicado o programa de aquecimento do forno microondas (Tabela 3). Foram utilizados 12 tubos por rodada, sendo 1 para o branco analítico e outro para a duplicata de uma das amostras. Ao término do programa e resfriamento do sistema, a amostra já dissolvida foi

transferida para um béquer de PFA. Todas as transferências de líquidos e sólidos foram realizadas de forma a garantir a transferência quantitativa do material de um recipiente para o outro. Para isso, foi empregada água deionizada, adicionada por toda parede interna do tubo, repetidas vezes.

O volume final total de aproximadamente 50 ml foi deixado na chapa em aquecimento até a obtenção de um resíduo de aspecto pastoso. A este material residual, foram adicionados 3 ml de HNO_3 concentrado e o mesmo volume em água deionizada. Repetiu-se o aquecimento em chapa até a formação do sólido com as características descritas na etapa anterior. O processo de adição de HNO_3 e H_2O e o subsequente aquecimento foram repetidos mais uma vez. Finalmente, para obtenção de uma solução homogênea e transparente, o sólido foi levado ao aquecimento por meia hora com a adição de 5 ml de HNO_3 concentrado e 5 ml de água deionizada. A solução resultante, após resfriamento, foi transferida para um frasco de polietileno onde a massa foi completada para 100 g com a adição de água deionizada.

Os materiais de referência para calibração também passaram pelo mesmo processo de digestão em forno microondas e de eliminação de fluoreto em sistema aberto. O branco foi igualmente preparado, paralelamente, às amostras.

Os tubos, tampas de PFA, os béqueres de mesmo material e os frascos de polietileno foram deixados por 24 h imersos ou preenchidos por solução de Extran 2 % v/v e depois foram enxaguados com água. Os tubos e béqueres de PFA foram preenchidos com HNO_3 10 % v/v e deixados por 1 h na chapa aquecida a aproximadamente 130 °C. Esta última etapa foi realizada mais uma vez. As tampas e acessórios do equipamento de microondas como também os frascos de polietileno, após a imersão em Extran, foram também preenchidos ou imersos com HNO_3 10 % v/v e deixados assim por 24 h. Finalmente, todos os acessórios, frascos e béqueres foram enxaguados com água deionizada e secos em capela de fluxo laminar.

5.2.3.5. Preparação de pastilhas fundidas

Uma alíquota das amostras previamente moídas foi enviada ao laboratório AcmeLabs® onde foram realizadas a quantificação do LOI (*loss on ignition*) e a produção das pastilhas fundidas. Uma determinada quantidade de amostra foi aquecida a 100°C para eliminação de umidade adsorvida. O teor de voláteis foi determinado pela diferença de massa entre a quantia inicial e o resíduo seco obtido pelo aquecimento do material a 1000°C. A uma alíquota de 5,0 g de amostra do resíduo seco foi adicionado fundente constituído por mistura de

$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ / LiBO_2 de alta pureza. A mistura resultante foi aquecida em um cadinho de ouro e de platina/ouro. O material fundido foi transferido imediatamente para um molde de platina em formato de disco. Aos materiais de referência, o mesmo procedimento foi aplicado.

Um procedimento similar foi realizado para as mesmas amostras, porém com intuito de converter as amostras em pérola e, após, dissolvê-las em meio de HNO_3 concentrado de alto grau de pureza. Assim, para a produção da pérola foi empregado 0,2 g de amostra. A solução obtida, límpida, foi diluída com água deionizada e analisada por ICP-MS.

5.2.3.6. *Preparação de lâminas delgadas*

A preparação de lâminas delgadas foi dividida em corte inicial da amostra, desbaste e polimento. O corte inicial com serra de disco diamantado foi realizado para isolar a área da amostra previamente selecionada para constituição da lâmina. O desbaste foi feito no equipamento com o auxílio de um rebolo de carbeto de silício. Após, as lâminas passaram pelo tratamento final por meio do equipamento de polimento combinado com pasta de alumina. Finalmente, as amostras foram fixadas nas lâminas de vidro com resina mais secante. As lâminas destinadas para o estudo petrográfico foram ajustadas para 30 μm de espessura e recobertas com lamínula. As demais foram produzidas com 80 μm .

As lâminas destinadas à análise por ME e MEV foram deixadas em banho ultrassônico com água destilada por 3 min e, após, na estufa para secagem a aproximadamente 70°C. Posteriormente, as lâminas foram recobertas com carbono no metalizador sob vácuo de 10^{-5} torr, até a formação de uma camada de 25 μm de espessura. Para análise das mesmas lâminas por LA-ICP-MS, a remoção da camada de carbono e o polimento foram realizados com pó de alumina. A lavagem e a secagem foram executadas em seguida como descritas anteriormente.

5.2.4. *Procedimentos de análise*

5.2.4.1. *FRX*

Análise de rochas silicáticas por FRX é um método bastante difundido e informações sobre procedimento experimental e fundamentos se encontram documentados com maiores detalhes na literatura (*e.g.*, West *et al.*, 2012; Potts, 1987). Neste experimento, como materiais de referência de controle, foram utilizados SYD - (National Resources Canada) e Oreas72b (Ores Research and Exploration). Pastilhas fundidas das respectivas amostras e algumas duplicadas (Tabela 4) foram analisadas obtendo-se as frações mássicas em % (m/m)

dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , MnO , TiO_2 , P_2O_5 e V_2O_5 e dos elementos Cu, Ni, Pb, Sr, Zn, Zr.

5.2.4.2. ICP-MS

Da análise das pastilhas fundidas e dissolvidas em meio ácido, foram fornecidas, pelo laboratório AcmeLabs®, as frações mássicas em ppm dos seguintes elementos: Sc, Ba, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, V, W, Zr, Y e ETRs. Algumas amostras foram analisadas em replicatas (Tabela 4). O padrão de referência certificado para o controle de qualidade do método utilizado foi SO-18. Mais informações e discussão sobre análise por ICP-MS de amostras fundidas com boratos e dissolvidas em ácidos minerais podem ser consultadas em (Ebdon *et al.*, 2003).

As condições instrumentais do ICP-MS do NAP GeoAnalítica-USP utilizadas na análise de amostras dissolvidas em $\text{HF} + \text{HNO}_3$ em forno microondas se encontram na Tabela 5. As amostras foram introduzidas no equipamento por meio de amostrador automático. Na construção da curva de calibração foram considerados o branco analítico e as soluções dos seguintes materiais de referência: DR-N (CNRS) - diorito, OU-1 (GeoPT) - tufo vulcânico, Ou-2 (GeoPT) - dolerito e JA - 1 (GSJ) - andesito. No acompanhamento do *drift*, foi utilizado Pi - 41c e, no controle de qualidade, JGb-1 (GSJ) - gabro e BR (CNRS) - basalto. Deste modo, foram analisados os elementos Sc, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, Hf, Pb, Th, U e ETRs, cujos valores de fração mássica foram fornecidos em ppm.

5.2.4.3. MEV

Análises petrográficas por imagens de elétrons retroespalhados para reconhecimento de estruturas zonadas foram obtidas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Instituto de Geociências – USP. As condições durante a operação do MEV foram: voltagem de aceleração de 20 kV, distância de trabalho de 25 mm e corrente de 6,5 nA.

Tabela 3: Programa de aquecimento do forno de microondas para a dissolução de rochas básicas. A Pot é a potência aplicada ao magnetron, P a pressão nominal dentro dos tubos de PFA, T é o tempo total do estágio, TAP (time at pressure) é o tempo do estágio com a pressão definida em P e FAN é a exaustão aplicada internamente.

Estágio	Pot / %	P / psi	T / min	TAP /	FAN / %
1	55	60	15	15	100
2	60	70	30	30	100
3	65	85	30	30	100

Tabela 4: Número de análises por amostra na determinação de elementos maiores por FRX em pastilha fundida e de elementos traços por dois diferentes métodos de preparação de amostra (pastilha fundida dissolvida em HNO_3 e amostra dissolvida em meio de $\text{HF} + \text{HNO}_3$ em forno de microondas) e analisada por ICP-MS. As letras A e B se referem às análises realizadas nas duas respectivas frações selecionadas de cada amostra. A letra M após o código da amostra indica ser a matriz obtida pelo processo de catação manual.

Amostra	FRX		ICP-MS*		ICP-MS	
	A	B	A	B	A	B
DAPGG -C1	1	-	1	-	1	-
DAPGG-C2	1	-	1	-	1	-
DAPGG -C2M	1	-	1	-	2	-
DAPGG-I	1	-	1	-	1	-
DAPGG-IM	1	-	2	-	2	-
DAPGG-B	2	1	1	1	1	1
DAPGG-BM	1	-	1	-	2	-
DSMB-C	1	-	1	-	1	1
DSMB-B	1	-	1	-	1	1
DSMU-C	1	-	1	-	1	-
DSMU-CM	1	-	1	-	2	-
DSMU-B1	1	1	1	1	1	1
DSMU-B1M	3	-	1	-	2	-
DSMU-B2	1	-	1	-	1	1
DSMU-BE1	1	1	1	1	1	1
DSMU-BE2	1	-	1	-	1	-
DSMPN	1	-	1	-	1	-
DSMPN- M	1	-	1	-	2	-

5.2.4.4. ME

As análises de WDS foram efetuadas ao longo de duas semanas e o equipamento foi calibrado a cada sete dias. Anteriormente às análises, um estudo minucioso por meio do microscópio óptico foi feito para a identificação de possíveis inclusões, fraturas contidas nos cristais de clinopiroxênio e olivinas e zonas de variação composicional dos mesmos. Na microsonda eletrônica, os cristais eram visualizados por imagens de elétrons retroespalhados. O ajuste do foco grosseiro e a visualização de detalhes complementares foram realizados com microscópio de luz refletida do próprio equipamento; o foco mais fino necessário para uma boa qualidade de análise era feito automaticamente. As regiões de maior interesse nos cristais selecionados foram as bordas e os centros. Procurou-se a realização das análises em duplicatas, nas regiões selecionadas de composição do mesmo cristal, segundo os estudos preliminares. As regiões intermediárias também foram analisadas quando apresentavam espessuras de dimensões o suficiente para acomodar o *spot* de 5 µm de diâmetro. Todas as análises pontuais foram realizada sob condições de 15kV de voltagem de aceleração e 20 nA.

O estudo da matriz foi executado com feixe de 100 µm de diâmetro, também sob condições de 15 kV de voltagem de aceleração e 20 nA. As regiões das amostras selecionadas foram aquelas em que a matriz se encontrava mais homogênea quanto a granulometria. Os *spots* foram dispostos e programados em grades, geralmente, quadráticas. O número de análises da matriz variou de amostra para amostra.

Os parâmetros experimentais executados nas análises estão apresentados na Tabela 6. O efeito matriz foi corrigido pelo algoritmo PZR Armstrong. Na Tabela 7, encontram-se os materiais de referência (Smithsonian Microbean Standards) utilizados na calibração de cada óxido para a olivina, clinopiroxênio e matriz, respectivamente. As amostras que passaram por análise por ME estão na Tabela 2. As análises pontuais de matriz por ME e LA-ICP-MS são identificadas por (ME) após o código original da amostra, por exemplo, DAPGG-I(ME).

5.2.4.5. LA-ICP-MS

Das lâminas delgadas previamente analisadas por ME, o recobrimento de carbono foi retirado pelo método abrasivo e limpas segundo o subitem 5.2.3.5..

Procuraram-se realizar as análises nas regiões anteriormente analisadas por ME. Os locais escolhidos eram também examinados por meio do monitor com o auxílio de uma ferramenta do *software* que acompanha o equipamento para se certificar se duas zonas adjacentes ou cristal e matriz não seriam amostrados concomitantemente pelo *laser*. Foram realizadas análises por *raster* ou *spot* em duplicata de bordas, de centro de cada cristal e de algumas zonas intermediárias do cristal. A matriz foi analisada por *spot* ou *raster* de diâmetro de 100 µm e com os materiais de referência utilizados na análise dos grãos de clinopiroxênio. As regiões da matriz da rocha analisadas foram próximas ou sobrepostas as das analisadas por ME.

A rotina analítica utilizada foi descrita em Andrade *et al.* (2014). O padrão analítico de referência era analisado a cada seis análises de cristal ou matriz. Os materiais de referência para a calibração do clinopiroxênio e olivinas foram, respectivamente, 612 (NIST, vidro silicático) e HBVO-2 (USGS, basalto). No final da análise de cada lâmina, o padrão certificado 610 (NIST, vidro silicático) era analisado como controle de qualidade analítico.

O valor de fração mássica do óxido CaO, referente a cada zona, obtido por ME foi utilizado como padrão interno do clinopiroxênio e da matriz. O MgO foi empregado com a mesma função nas análises de elementos traços da olivina. Para a redução do dados, foi utilizado o *software Glitter®*, desenvolvido pelo GEMOC e comercializado pela Access MacQuarie Ltd. (Jackson *et al.*, 2001). Esse programa de tratamento de dados on-line também permite delimitar o tempo de análise contabilizado para o resultado final de uma análise. Ou seja, pode-se eliminar alguns segundos iniciais ou finais de análise que contivesse alguma inclusão. Tal observação foi possível fazer através de diagramas de intensidade *versus* tempo de análise para cada elemento. As amostras que foram analisadas por LA-ICP-MS estão apresentadas na Tabela 2. Na Tabela 8, encontram-se as condições experimentais do *laser* usado no modo *spot* ou no modo *raster*. Quando a matriz foi analisada por *spot*, o equipamento foi ajustado para realizar após o branco 4 análises pontuais de 35 s e intervalos entre si de 1 s.

Tabela 5: Condições instrumentais do ICP-MS empregadas na análise de amostras dissolvida em HF + HNO₃ em forno microondas.

Descrição	Valor
Fluxo de gás nebulizador	1,01 L / min
Fluxo de gás auxiliar	1 L/min
Fluxo de gás plasma	16 L / min
Voltagem da lente	7 V
Potência elétrica da RF	1100 W

Tabela 6: Algumas condições instrumentais do ME. O comprimento de onda, λ , a linha espectral do raio X como o cristal analisador são comuns à análise da olivina, clinopiroxênio e de matriz. Não se assemelham quanto à voltagem aplicada na janela do detector. A corrente da fonte de elétrons foi de 20 nA, e a voltagem de aceleração foi de 15 kV.

Elementos	Linha	Cristal analisador	λ / nm	voltagem da janela / V		
				ol	cpx	mx
Si	K α	TAP	0,71254	8,2	8,2	8,2
Al	K α	TAP	0,83393	8,2	1,8	8,2
Fe	K α	LIFL	0,1936	0	0	0
Mn	K α	LIFL	0,21018	0	2,1	0
Ni	K α	LIFL	0,16579	0	0,8	-
Ca	K α	PETJ	0,33584	0	1,2	0
K	K α	PETJ	0,37414	0	1,2	0
Ti	K α	LIFL	0,27485	0	0,7	0
Cr	K α	LIFL	0,22897	0	0,7	0
Na	K α	TAPH	119,101	9,3	9,3	9,3
Mg	K α	TAPH	0,989	9,3	0,7	9,3
P	K α	PETJ	0,6157	-	-	0

Tabela 7: Materiais de referência, MR, utilizados para calibração da ME nas análises de olivina, clinopiroxênio e matriz. O nome dos minerais está abreviado sendo que Ol (olivina), An (anortita), Fa (faialita), Wo (wollastonita), Or (ortoclásio), R (rutilo), Cm (cromita), Ab (albita) e Ap (apatita). C é a fração mássica (m/m) em porcentagem dos óxidos nos materiais de referência.

Óxido	olivina		clinopiroxênio		matriz	
	MR	C/mm ⁻¹	MR	C/mm ⁻¹	MR	C/mm ⁻¹
SiO ₂	Ol	40,81	Di	55,81	Di	55,81
Al ₂ O ₃	An	36,03	Na	36,03	An	36,03
FeO	Fa	67,55	Fa	67,55	Fa	67,55
MnO	Fa	2,14	Fa	2,14	Fa	2,14
NiO	Ol	0,37	riolito	0,73	-	-
CaO	Wo	47,84	Wo	47,84	Wo	47,84
K ₂ O	Or	12,78	Or	12,78	Or	12,78
TiO ₂	R	99,98	R	99,98	R	99,98
Cr ₂ O ₃	Cm	60,5	Cm	60,5	-	-
Na ₂ O	Ab	11,79	Ab	11,79	Ab	11,79
MgO	Ol	49,42	Di	17,79	Di	17,79
P ₂ O ₅	-	-	-	-	Ap	40,78

Tabela 8: Condições experimentais do laser na análise direta de olivina, clinopiroxênio e matriz por LA-ICP-MS. São mostradas as condições para análise no modo spot e raster. D é o diâmetro do feixe, f é a frequência, J/cm² é a densidade de energia.

Condições	Olivina		Clinopiroxênio	Matriz	
	Spot	Raster		spot	raster
Potência /%	85 - 90	85 - 90	85 - 90	85	85 - 90
f/ Hz	20	15	20	20	20
Passo/ μm s ⁻¹	-	2	2	-	3
J/cm ²	1,625	2,035	3,955	3,735	4,333
D / μm	25	55	25	100	100
Dwell /s	60	60	60	35*	60
Pausa / s	-	-	-	1	-
Branco / s	40	40	40	40	40

* por spot

5.3. Tratamento de dados de química mineral

5.3.1. Olivina

Na amostra DSMB, foram analisados 2 cristais de olivina e, nas amostras do dique DSMU, foram estudados 11 cristais de olivina.

A fórmula estrutural unitária da olivina foi calculada com base em quatro oxigênios e os sítios M1 e M2 foram considerados equivalentes na distribuição dos cátions em apfu (átomos por fórmula unitária). Foram utilizados na construção da fórmula estrutural resultados composicionais do Si^{4+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} e Ni^{2+} , sendo o somatório desses cátions igual a 3 em apfu. O resultado de cada análise pontual em % m/m, assim como a sua fórmula estrutural unitária, encontra-se na Tabela 5A do Anexo. Os dados das análises individuais de fração mássica de elementos traços em ppm em olivina estão apresentados no Anexo (Tabela 7A).

Nas zonas químicas dos cristais que tiveram mais de uma análise pontual, foi obtida uma média composicional com o seu respectivo desvio padrão. Posteriormente, foram relacionados os dados composicionais de elementos maiores, menores com os de traço de cada zona estudada. Estes dados se encontram na Tabela 9A do Anexo.

5.3.2. Clinopiroxênio

Foram analisados no total 28 cristais de clinopiroxênio nas amostras de DAPGG, 8 em DSMB, 22 em DSMU e 4 em DSMPN. A quantidade de cristais analisados por LA-ICP-MS foi inferior àquela analisada por ME.

A fórmula estrutural unitária dos cristais de clinopiroxênio foi calculada segundo a distribuição catiônica nos sítios M2, M1 e T sugerida por Morimoto *et al.* (1988) e a estimativa de Fe^{2+} e Fe^{3+} a partir de Fe^{2+} total seguiu Schumacher (1991). A distribuição dos cátions entre os sítios na construção da fórmula consistiu nas seguintes etapas: Si^{4+} , Al^{3+} e Fe^{3+} em T; os cátions remanescentes Al^{3+} e Fe^{3+} em M1 e Ti^{4+} , Cr^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} e Mn^{2+} neste mesmo sítio; Fe^{2+} , Mg^{2+} e Mn^{2+} remanescentes em M2 e os cátions Ca^{2+} , Na^{+} e K. O somatório dos cátions nos sítios T, M1 e M2 é, respectivamente, 2, 1 e 1 em apfu. Os dados das análises individuais de elementos maiores e menores em % m/m e a fórmula estrutural unitária nos cristais de clinopiroxênio se encontram na Tabela 6A.

No cálculo dos membros finais, foram consideradas as quantidades em apfu normalizadas de Ca total para wollastonita (Wo), Mg para enstatita (En) e de $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}$ para ferrossilita (Fs) (Morimoto *et al.*, 1988).

Os resultados individuais das análises de traços em ppm são apresentados no Anexo (Tabela 8A). O procedimento de construção de médias de análises efetuadas na mesma zona cristalina e da relação de dados entre elementos maiores, menores e traços foi realizado como descrito para as olivinas. Estes dados se encontram no Anexo (Tabela 10A).

5.4. Método experimental e tratamento de dados

A aplicação de métodos analíticos químicos já validados não elimina a etapa de avaliação dos dados obtidos e das condições instrumentais nas quais os resultados foram gerados. Há etapas envolvidas no método de análise química que são fontes importantes de erros sistemáticos dos quais podem ser citados o grau de homogeneidade da amostra/alíquota, a falta de compromisso da matriz e/ou concentração de analitos entre padrão analítico e amostra. Há também a ocorrência de erros aleatórios cuja grandeza deve ser reconhecida por meio das ferramentas estatísticas. Assim, discussões de algumas particularidades do método e os critérios de avaliação dos resultados de composição química de rocha total, matriz e mineral são aqui apresentados com o objetivo de verificar a qualidade dos dados químicos quantitativos utilizados neste trabalho.

5.4.1. Avaliação do método e dados químicos de rocha total, matriz e mineral

Os resultados de análises passaram inicialmente por um teste de qualidade. Foi verificado se o resultado obtido se situava acima do limite de quantificação, LQ, que foi calculado por meio da relação $\text{LQ} = 10\text{LD}/3$, onde LD é o limite de detecção (equivalente a 3 sigma do desvio padrão do resultado das análises de branco) fornecido pelo equipamento. Resultados que não satisfizeram essa condição foram descartados. A regra utilizada foi Concentração ou fração mássica – DP > LQ (aceitável) e Concentração ou fração mássica – DP < ou = LQ (desprezado), sendo DP é o desvio padrão. Foi considerado o valor de 2% para DP de todas as análises por FRX no teste da regra, já que esses dados não foram fornecidos pelo laboratório Acmlabs®. Os valores médios de LQ estão apresentados nas Tabelas 9, 10, 11 e 12. Os resultados das análises químicas mineral, de rocha total e de matriz estão expostos nas Tabelas de 1A a 8A (Anexo).

O desvio padrão relativo, DPR, fornecido pelos equipamentos também foi levado em consideração, já que este está relacionado ao grau de homogeneidade da alíquota da amostra analisada e ao desempenho do equipamento. Para cada técnica analítica, estabeleceu-se um valor máximo de DPR aceitável: ME (5%), ICP-MS (5%) e LA-ICP-MS (15%) com base em dados da literatura: Potts (1987) para FRX; Navarro *et al.* (2008) para ICP-MS e Andrade *et al.* (2014) para LA-ICP-MS.

No entanto, a análise de elementos traços por LA-ICP-MS traz um agravante que, em muitos casos, impossibilita a obtenção de $DPR < 15\%$, apesar dos valores de fração mássica estarem acima dos de LQ. A heterogeneidade gerada por micro inclusões no volume amostrado dos cristais por *laser* pode não ser evitada em alguns casos, embora o exame preliminar petrográfico e a eliminação do sinal de inclusões visíveis pelo *software* Glitter tenham sido realizados.

O DPR fornecido pelo equipamento é maior para as análises de *raster* ou *spot* com feixe de 25 μm do que para feixe de 100 μm em padrão (Tabela 12). Isto está relacionado à dependência do DPR com a quantidade de material amostrado. Nas análises pontuais por ME, este quadro se observou em algumas análises de menores, porém foi mais significativo com o K_2O devido à baixa fração mássica (Tabela 11).

A homogeneidade do pó das amostras foi verificada por meio das análises em duplicatas (Tabela 10). Das amostras escolhidas para o teste, quando apresentavam frações A e B do quarteamento, era analisada uma alíquota de cada fração. No caso das amostras de matriz originadas da catação, não houve formação de diferentes frações pela limitada quantidade de amostra separada, assim, as duplicatas foram realizadas pela retirada de alíquotas do mesmo montante. Na Tabela 10 é mostrado que valores de DPR para as duplicatas ficaram abaixo de 5%, exceto para os elementos Lu e U no segundo método. O DPR das médias dos resultados dos dois métodos por ICP-MS apresentam valores satisfatórios, abaixo de 10%, com exceção de Zr, Er e U.

Cabe relatar que para todas as análises seja de matriz ou rocha total por ICP-MS, LA-ICP-MS ou ME com n-plicatas > 3 , foram aplicados os testes de Dixon e de Grubbs (Miller e Miller, 2005) para a eliminação de *outlier* segundo um intervalo de confiança de 95%. Finalmente, com intuito de avaliar o método de análise aplicado, os valores de concentração ou fração mássica nos materiais de referência obtidos por ICP-MS e LA-ICP-MS foram comparados com os valores tabelados utilizando-se o teste t de *Student* (Miller e Miller,

Tabela 9: Dados médios de limite de quantificação e de desvio padrão relativo das duplicatas (n) na análise de elementos maiores e menores em rocha total e matriz (catação) por FRX. Os dados são apresentados para os elementos na forma de óxido. O DPR das análises individuais não foi fornecido pelo laboratório Acmlab®. Os dados das n-plicatas e das respectivas médias estão apresentados nas Tabelas 1A e 2A (Anexo).

Óxidos	LQ / %	DPR (n) / %
SiO ₂	0,03	0,5
Al ₂ O ₃	0,03	0,4
Fe ₂ O ₃	0,03	0,6
CaO	0,03	0,5
MgO	0,03	0,4
Na ₂ O	0,03	0,8
K ₂ O	0,03	0,4
MnO	0,03	0,8
TiO ₂	0,03	0,4
P ₂ O ₅	0,03	0,4

Tabela 10: Dados médios de limite de quantificação (LQ), desvio padrão relativo (DPR) fornecido pelo equipamento e o desvio padrão relativo de duplicatas (DPR(n)). O primeiro método (1) consiste na análise por ICP-MS de amostra dissolvida em meio ácido em forno microonda e o segundo (2), na análise da pérola de amostra dissolvida em meio ácido. Os valores em negrito indicam resultados não satisfatórios. O DPR (m) é o valor resultante da média gerada considerando os resultados dos dois métodos. Os dados das n-plicatas estão apresentados nas Tabelas 1A e 2A.

Elemento	(1) ICP-MS			(2) ICP-MS		
	LQ / ppm	DPR / %	DPR(n)/ %	LQ / ppm	DPR(n)/ %	DPR (m)/ %
Sc	0,03	0,7	2,0	3,33	0,4	6,4
Rb	0,03	0,6	1,6	0,33	2,7	4,1
Sr	0,03	0,6	1,6	1,67	2,2	5,3
Y	0,03	0,6	1,3	0,33	3,1	5,8
Zr	0,1	0,5	2,9	0,33	2,8	10,6
Nb	0,03	0,5	1,7	0,33	3,0	6,7
Ba	1,67	0,6	2,8	3,33	2,3	6,6
La	0,03	0,7	1,5	0,33	1,7	3,0
Ce	0,03	0,6	3,8	0,33	2,6	3,4
Pr	0,03	0,4	1,1	0,07	2,2	3,4
Nd	0,27	0,5	1,1	1	2,0	3,2
Sm	0,03	0,6	1,3	0,17	3,9	4,3
Eu	0,03	0,7	1,8	0,07	1,4	4,59
Gd	0,03	1,1	2,4	0,17	1,3	5,6
Tb	0,03	0,7	1,6	0,03	1,69	5,3
Dy	0,03	0,8	1,8	0,17	3,0	5,2
Ho	0,03	0,7	1,5	0,07	4,2	8,5
Er	0,03	0,9	1,7	0,1	3,6	10,0
Tm	0,03	1,3	2,4	0,03	9,0	9,3
Yb	0,03	1,0	2,2	0,17	4,9	5,8
Lu	0,03	1,2	2,3	0,03	5,2	9,7
Hf	0,03	1,0	3,0	0,33	3,0	5,1
Th	0,03	1,2	2,5	0,67	5,1	6,6
U	0,03	0,9	2,3	0,33	14,7	10,4

Tabela 11: Valores médios de LQ e DPR (fornecidos pelo equipamento) para óxidos de elementos maiores e menores obtidos na análise de clinopiroxênio, olivina e matriz por ME. Espaço sem valor significa que ou o elemento não foi analisado, ou o resultado da análise esteve abaixo de LQ.

	clinopiroxênio		olivina		matriz	
Óxidos	LQ / %	DPR / %	LQ / %	DPR / %	LQ / %	DPR / %
SiO ₂	0,02	0,1	0,06	0,2	0,04	0,2
Al ₂ O ₃	0,01	0,5	2,00	7,4	0,02	0,4
FeO ou Fe ₂ O ₃	0,03	0,6	0,13	0,5	0,05	0,6
CaO	0,02	0,2	0,77	3,0	0,02	0,4
MgO	0,01	0,1	0,03	0,1	0,02	0,3
Na ₂ O	0,01	2,5	-	-	0,02	1,1
K ₂ O	0,01	13,2	-	-	0,02	0,7
MnO	0,01	4,0	0,88	3,4	0,02	1,0
NiO	-	-	0,77	2,9	-	-
TiO ₂	0,03	1,3	-	-	0,05	1,0
P ₂ O ₅	-	-	-	-	0,05	5,0

Tabela 12: Dados médios de LQ e DPR (fornecidos pelo equipamento) da análise de olivina, clinopiroxênio e matriz, respectivamente, por LA-ICP-MS dos resultados aceitáveis.

Elemento	clinopiroxênio		olivina		matriz	
	LQ / ppm	DPR / ppm	LQ / ppm	DPR / ppm	LQ / ppm	DPR / ppm
Li	2,55	37,44			0,15	9,34
Na	-	-	8,07	6,55		
P	-	-	259,84	26,30	5,65	28,63
Sc	1,69	19,54	2,70	18,34	0,11	4,74
Ti			16,91	18,27		
V	0,59	10,03	2,26	15,60	0,04	5,30
Cr	7,08	18,13	19,54	5,73	0,40	9,42
Mn					0,10	12,36
Co	0,24	16,16	0,79	11,29	0,02	5,61
Ni	11,94	32,34	5,50	10,48	0,51	4,52
Cu	-	-	2,08	31,25		
Zn	7,75	20,98	10,41	9,08	0,41	8,60
Rb	0,34	37,21	-	-	0,01	5,72
Sr	0,23	13,75	-	-	0,01	6,28
Y	0,18	15,48	-	-	0,01	5,18
Zr	0,35	17,43	-	-	0,02	4,55
Nb	0,31	17,55	-	-	0,01	8,46
Cs	0,12	44,71	-	-	0,01	11,85
Ba	1,00	18,80	-	-	0,04	8,67
La	0,13	8,15	-	-	0,01	5,71
Ce	0,13	10,53	-	-	0,01	5,57
Pr	0,08	14,42	-	-	0,00	5,30
Nd	0,67	17,15	-	-	0,04	6,72
Sm	0,91	11,73	-	-	0,06	4,95
Eu	0,24	13,72	-	-	0,01	5,69
Gd	0,73	18,09	-	-	0,05	4,70
Tb	0,11	16,88	-	-	0,01	6,08
Dy	0,66	16,94	-	-	0,04	5,16
Ho	0,11	18,89	-	-	0,01	13,04
Er	0,44	20,05	-	-	0,03	36,11
Tm	0,08	28,11	-	-	0,01	6,14
Yb	0,43	26,45	-	-	0,04	37,53
Lu	0,08	29,09	-	-	0,01	7,49
Hf	0,51	14,76	-	-	0,01	4,81
Ta	0,18	20,70	-	-	0,01	35,20
Th	0,15	14,09	-	-	0,01	7,20
U	0,07	20,42	-	-	0,00	1,50

2005). Os valores obtidos da análise de BHVO-2 por LA-ICP-MS, tanto nos métodos de análise de matriz quanto de clinopiroxênio, foram aceitos no intervalo de 95% de confiança. No entanto, os resultados dos elementos Rb, Sr, Nb e Ce do padrão de referência BR e Sr de JGb-1 obtidos por ICP-MS de material dissolvido em forno microondas foram aceitos apenas no intervalo de 98 % de confiança; além disso, os resultados de Ba em JGb-1 foram aceitos no intervalo de 99% (Tabela 13). Como controle de qualidade no método aplicado na análise de olivina, foram utilizados os materiais de referência Nist 612 e BCR-2. Nota-se que os valores obtidos foram aceito nos intervalo de 95% de confiança. As lacunas na Tabela 13 são de elementos que não foram analisados ou foram detectados abaixo do limite de quantificação da técnica.

Ressalta-se que, nos dados obtidos por ME, foram observados o fechamento de análise e a proporção catiônica dados pelo *software* do equipamento. O fechamento total das análises tolerado para o clinopiroxênio foi de 99 a 101%. Todavia, em olivina, este intervalo foi um pouco maior (99 a 101,5%), mas apenas foi aceito quando a proporção catiônica esteve bastante próxima de 3,000 (2,990 e 3,010 apfu). Um intervalo semelhante também foi aplicado nas análises de olivina em Matzen *et al.* (2011).

5.4.2. Análise pontual por LA-ICP-MS

A amostragem por *laser* utilizada nas determinações pontuais de elementos traços apresenta duas opções de execução, por *spot* ou por *raster*. A primeira possibilita a análise em profundidade e, a segunda, a resolução espacial de superfície. O *spot* gera uma cratera pelo qual a quantidade de amostra que consegue sair diminui com o tempo. Outra limitação no uso do *spot* com diâmetros cada vez menores é a retirada ínfima de amostra, que leva a erros cada vez maiores. A amostra pode ser rapidamente consumida em profundidade pelo *laser* na utilização de *spot* com diâmetro reduzido. Quanto menor o *spot*, maior é a concentração de energia por área, e mais rapidamente são atingidas regiões mais profundas da amostra (Diwakar *et al.*, 2014), o que pode resultar na ablação de outros minerais e inclusões não visíveis (Foley *et al.*, 2011) e até da resina e lâmina. Já em lâminas delgadas de amostras cujos cristais apresentam variação complexa de composição, como os zonamentos em clinopiroxênios, o *raster* é uma alternativa que permite a análise de regiões do cristal com diâmetros de poucos micrometros, pois a energia aplicada não se concentra em uma única região da amostra por tempo de análise.

Tabela 13: Intervalo de confiança cujos valores de fração mássica dos elementos traços obtidos dos materiais de referência são considerados concordantes com os valores tabelados segundo o teste t-Student. Análise de rocha total foi realizada por ICP-MS e da olivina, clinopiroxênio (cpx) e matriz por LA-ICP-MS.

Elemento	Rocha total		olivina		cpx	matriz
	BR	JGb-1	Nist 612	BCR-2	BHVO-1	BHVO-1
Li	-	-	95%	-	98%	99%
P	-	-	-	95%	-	-
Sc	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Ti	-	-	95%	95%	-	-
V	-	-	95%	95%	95%	95%
Cr	-	-	95%	95%	95%	95%
Co	-	-	95%	95%	95%	95%
Ni	-	-	95%	95%	95%	95%
Zn	-	-	95%	95%	95%	95%
Rb	98%	95%	95%	95%	95%	95%
Sr	98%	98%	95%	95%	95%	95%
Y	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Zr	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Nb	98%	95%	95%	95%	95%	95%
Cs	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Ba	99%	95%	95%	95%	95%	95%
La	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Ce	98%	95%	95%	95%	95%	95%
Pr	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Nd	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Sm	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Eu	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Gd	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Tb	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Dy	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Ho	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Er	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Tm	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Yb	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Lu	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Hf	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Ta	-	-	95%	95%	95%	95%
Th	95%	95%	95%	95%	95%	95%
U	95%	95%	95%	95%	95%	95%

Por outro lado, a utilização de feixe de *laser* com diâmetros cada vez menores pode prejudicar o LD e a sensibilidade da técnica em se tratando de análises de elementos traços (Jackson *et al.*, 1992). Assim, esta opção torna-se válida quando o *raster* é aplicado a extensões maiores possíveis, por exemplo, 80-110 μm como executado neste estudo.

A potência do *laser* foi otimizada de forma que o *spot* não atingisse a resina e lâmina. Este controle foi realizado pelo acompanhamento dos sinais dos elementos constituintes do vidro tais como Li, Rb e Na, durante os testes em padrão e amostra em análises. Deste modo, optou-se pela aplicação de *raster* na análise de elementos traços por LA-ICP-MS na maioria das amostras, visto que as zonas de composição homogênea nos cristais permitiram a propagação do *raster* a extensões de dimensões já mencionadas.

5.4.3. Análise de matriz por ME e LA-ICP-MS

A possibilidade de se obter um volume de amostragem que seja representativo do todo é um dos pontos críticos de análise direta de sólidos (Nomura *et al.*, 2008; Ubide *et al.*, 2014). Técnicas analíticas como ME e LA-ICP-MS apresentam vantagens na análise de corpos com zonamento composicional na escala micrométrica, porém o seu uso para estudo de composição global ainda merece mais investigação.

As regiões das matrizes amostradas em *spot* de 100 μm por ME são representadas na Figura 4. Nota-se que, quanto mais fina é a matriz, maior é o número de fases abrangidas pelo *spot* e, conseqüentemente, este conteúdo se torna mais homogêneo entre os *spots* em uma mesma matriz, ou seja, é alcançada uma maior representatividade do todo.

As análises de algumas matrizes apresentaram fechamento acima de 101%, alcançando até 106%. Resultados com fechamento abaixo de 101% foram, no geral, mais frequentes nas análises das matrizes mais finas (<0,3mm), com exceção de DSMU-BE2. Assim, para verificar se mudanças no fechamento das análises estavam correlacionadas à granulometria da matriz foi construído o diagrama do número de análises aceitáveis/número de análises total por ME executadas em cada matriz *versus* a granulometria média (Figura 5). O termo (ME) após o código da amostra na legenda da Figura 5 remete a resultados obtidos por análise direta.

Observa-se que há uma tendência das análises em matrizes mais finas terem fechamento abaixo de 101% de forma a constituírem um patamar próximo de 1, no entanto, dois aspectos no diagrama fogem desta relação. No primeiro caso, apenas 60 %

aproximadamente das análises realizadas na matriz de DSMU-BE2 foram aceitas. A justificativa para este resultado pode estar no grau de alteração desta amostra que é superior a de DSMU-B2. No segundo caso, apesar das matrizes de DAPGG-B e DSMB-B apresentarem granulação semelhante, o número de análises aceitáveis para cada amostra é diferente. A medida da granulometria média foi realizada por meio do comprimento dos minerais mais abundantes. Em DAPGG-B, os cristais de clinopiroxênio são alongados, mas apresentam a seção basal de menor dimensão. Por outro lado, a seção basal dos cristais de clinopiroxênio e de plagioclásio em DSMB-B são maiores, de modo que haja menos componentes nos *spots* comparados aos *spots* na matriz de DAPGG-B (Figura 4). Portanto, a obtenção de análises com qualidade por ME em matrizes pode estar relacionada à granulometria de matriz e a baixa alteração do material. Os resultados das análises por ME de DSMB-B, DSMU-BE e DSMPN, pela baixa qualidade, não foram reportados nas tabelas do Anexo e são descartados das discussões de composição de matriz. Vale mencionar que as análises com fechamento abaixo de 99% observadas em DAPGG-BE, DAPGG-B e DSMU-B2 são consideradas, neste trabalho, como resultantes da presença de voláteis, uma vez que minerais hidratados são parte importante da assembleia mineral destas matrizes.

Outra informação importante na avaliação dos dados composicionais de matriz por ME é o DPR da média dos *spots* para uma dada amostra que indica o grau de homogeneidade da matriz (Tabela 14). Assim, os resultados de DAPGG-B(ME), DAPGG-BE(ME) e DSMU-B2(ME) são considerados satisfatórios para os elementos maiores e mais críticos para os menores. O mesmo foi realizado para os resultados de análise de matriz por LA-ICP-MS (Tabela 15). Os valores considerados críticos foram para o Ba, Sr, Rb, Nb e Th de DAPGG-B(ME), Rb, Ho e Th de DAPGG-BE(ME). Em DSMU-B2(ME), os resultados foram os mais satisfatórios, o que se deve a baixa granulação e homogeneidade da amostra. Assim, os dados de análise direta das matrizes de DAPGG-B, DAPGG-BE e DSMU-B2 são considerados de qualidade para contribuírem para discussão da composição da matriz (Veja subitem 9.2.).

Figura 4: Áreas de matriz analisadas por *spot* de 100 µm de diâmetro por ME. Os *spots* estão delimitados como círculos brancos e pretos. O número total deles para cada amostra foi de 64 (A), 64 (B), 49 (C), 52 (D) e 28 (E) e 28 (F).

Figura 5: Razão entre número de análises aceitáveis segundo o critério de qualidade (Veja subitem 5.4.1.) e número total de análises de uma determinada matriz por ME *versus* granulometria média da matriz em mm.

Tabela 14: DPR (n) das análises (consecutivas) de elementos maiores e menores em matriz por ME para as amostras DAPGG-BE(ME), DAPGG-B(ME) e DSMU-B2(ME). O número de análises, n, para cada amostra é 52, 48 e 25.

	DAPGG-BE(ME)	DAPGG-B(ME)	DSMU-B2(ME)
	n=52	n=49	n=25
Óxidos	DPR (n) / %		
SiO ₂	2,9	11,6	3,3
Al ₂ O ₃	20,2	26,7	7,6
Fe ₂ O ₃	11,4	30,8	7,1
CaO	10,9	24,5	12,9
MgO	13,0	24,8	18,3
Na ₂ O	23,9	38,7	17,9
K ₂ O	23,9	41,5	20,6
MnO	123,0	130,9	11,5
TiO ₂	16,1	47,9	10,8
P ₂ O ₅	21,8	70,8	14,9

Tabela 15: DPR(n) das médias das análises (consecutivas) de elementos traços em matriz por LA-ICP-MS para as amostras DAPGG-BE(ME), DAPGG-B(ME) e DSMU-B2(ME). O número de análises, n, para cada amostra é 13, 7 e 11, respectivamente. Cada análise correspondeu a área de 4 spots de 100 µm de diâmetro sendo assim em números de spots igual a 52, 28 e 44.

	DAPGG-BE(ME) N=13	DAPGG-B(ME) N=7	DSMU-B2(ME) N=11
Element	DPR (n) / %		
Li	16,7	37,3	10,0
P	12,2	25,9	11,1
Sc	4,2	14,5	14,9
V	9,0	10,4	5,9
Cr	35,4	43,5	50,2
Mn	40,0	19,1	8,0
Co	13,0	20,0	11,7
Ni	14,8	12,2	13,4
Zn	11,7	20,3	10,8
Rb	51,3	23,0	16,3
Sr	5,8	28,1	14,7
Y	16,0	17,9	8,6
Zr	16,6	6,3	8,4
Nb	14,4	33,6	20,0
Cs	67,0	52,5	19,6
Ba	12,6	44,5	15,0
La	5,7	18,1	10,7
Ce	6,4	19,1	8,2
Pr	7,2	17,8	7,3
Nd	7,6	17,5	7,0
Sm	8,0	16,8	6,4
Eu	7,3	18,1	6,0
Gd	9,4	14,1	7,5
Tb	10,8	16,2	7,5
Dy	12,5	6,3	7,3
Ho	21,0	15,8	7,5
Er	15,0	17,6	8,1
Tm	16,5	18,5	9,6
Yb	14,1	17,4	9,5
Lu	11,7	14,7	10,0
Hf	16,0	5,4	7,6
Ta	14,9	33,5	12,3
Th	21,7	34,8	17,8
U	9,4	12,0	15,5

6. Contextualização geológica, características petrográficas macroscópicas e microscópicas

6.1. Introdução

O contexto geológico e a variedade de litotipos associados a um complexo alcalino despertam o interesse de pesquisadores pela origem e evolução dos magmas/rochas. O uso de coeficiente de partição de elementos entre cristais e o líquido em equilíbrio permeiam estudos de evolução magmática. A escolha de um dado de coeficiente da literatura, que foi obtido em condições físico-químicas próximas das da formação da rocha em estudo, torna-se uma tarefa essencial. Neste contexto, variedades vulcânicas e subvulcânicas podem ser consideradas as mais próximas de composições de líquidos magmáticos, sendo escolhidas, em grande parte, para estudos que determinam coeficientes de partição em sistemas naturais. A composição primitiva de diques máficos alcalinos é considerada representativa de líquidos de baixas taxas de fusão do manto (Thompson *et al.*, 1998; Brotzu *et al.*, 2005). Há uma carência no estudo coeficientes de partição mineral/líquido para os magmas básicos de tendência alcalina do sudeste da Plataforma Sul-Americana. Este estudo busca contribuir com essa temática a partir de variedades vulcânicas a subvulcânicas de composição básica alcalina encontrada na forma de diques.

A atividade magmática alcalina no sudeste da Plataforma Sul-Americana é associada aos eventos de quebra da porção Gondwana do supercontinente Pangeia e da subsequente formação do oceânico Atlântico Sul. Evidencia-se que a colocação de tais magmas se deu com forte controle estrutural, que inclui descontinuidades reativadas do embasamento cristalino e bordas cratônicas (Riccomini *et al.*, 2005). São citados três intervalos temporais nos quais, aproximadamente, as intrusões alcalinas ocorreram durante a Era Meso-Cenozóica no sul e sudeste do Brasil: 130 Ma em média, 100 a 110 Ma e 90 a 50 Ma (Morbideilli *et al.*, 1995). As ocorrências alcalinas são agrupadas em províncias das quais se mencionam Arco da Ponta Grossa e Minas - Goiás na borda das bacias do Paraná e Bauru, respectivamente, Serra do Mar, que bordeja a bacia de Santos, e o lineamento de Cabo Frio (Gomes e Comin-Chiaramonti, 2005).

O tamanho das ocorrências varia desde complexos de poucas centenas de Km² como o de Poços de Caldas em Minas Gerais com 800 Km² (Ulbrich, 1984) a corpos menores que constituem *stocks* e diques. A abundância de rochas mais evoluídas (*e.g.*, sieníticas) é superior a de rochas máficas e ultramáficas, restringindo estas últimas a corpos relativamente menores (Gomes e Comin-Chiaramonti, 2005). Tem-se como exemplos o complexo de Juquiá no estado de São Paulo, cujo piroxenito foi estimado a 48 Km³ em Slavec *et al.* (2001), e os diques máficos-ultramáficos investigados em Garda e Schorscher (1996) no litoral norte do estado de São Paulo, que compreendem principalmente diques entre 0,2 m e 2,0 m de espessura. Apesar da limitação volumétrica dos afloramentos já divulgados na literatura, as rochas máficas e ultramáficas desempenham papel importante na construção dos modelos de geração e diferenciação magmática de alguns desses complexos alcalinos e no estudo de magmas progenitores (Beccaluva *et al.*, 1992; Azzone, 2008; Azzone *et al.*, 2013).

Neste trabalho, são utilizadas amostras provenientes de diques máficos de três localidades da província alcalina da Serra do Mar (em Ilha de Búzios, Ubatuba e proximidades de Santo Antônio do Pinhal) e de uma na região da província alcalina Arco de Ponta Grossa (nas proximidades de Cajati).

6.1.1. Contexto geológico dos diques do estudo

Este item busca apresentar um contexto geral das encaixantes e de características geológicas dos diques máficos selecionados para este estudo.

O complexo alcalino da ilha de Búzios, estudado de forma minuciosa por Alves (1997), localiza-se no setor norte da Província alcalina da Serra do Mar, na região costeira norte do Estado de São Paulo. É constituído, predominantemente, por rochas álcali feldspato sienitos e quartzo-álcali feldspato sienitos junto às variedades microssieníticas intrudidas em charnoquitos, gnaisses alasquíticos e blastomiloníticos. São encontrados diques félsicos e máficos a ultramáficos de dimensão decimétricas, com direção NE preferencial, que cortam as rochas alcalinas e as demais do embasamento. Os diques máficos se diversificam entre diabásios, microdioríticos e lamprófiros. Magma de composição nefelinítica a basanítica é apontado como um possível magma progenitor das rochas mais primitivas constituintes do complexo alcalino da Ilha de Búzios (Alves e Gomes, 2001). A amostragem de um desses corpos máficos foi selecionada para esse estudo.

Ainda no litoral norte do Estado de São Paulo, destacam-se os enxames de diques máficos que se distribuem de forma irregular em blocos ou *in situ* ao longo dos costões. Dentre algumas dessas ocorrências, que foram descritas petrológica e quimicamente em Garda (1995), ocorrem diques que apresentam espessura de 0,3 a 1,5 m, cuja composição varia entre diabásio, basalto e basanito/tefrito. Localizados em Ubatuba a sudeste do falhamento de Cubatão, os diques intrudem granitoides e charnoquitos do complexo costeiro Pré-Cambriano. Alguns diques se sobressaem por apresentarem xenólitos do manto e que, desta forma, comunicam parte inicial de sua história geológica. Em Almeida (2009), foram estudados xenólitos mantélicos de até 2 cm contidos em um dique de kaersutita lamprófito situado na Praia Vermelha do Sul, Ubatuba. Estes xenólitos são peridotitos e apresentam metassomatismo, sendo classificados como espinélio lherzolitos e wehrlitos. Amostras deste mesmo dique foram selecionadas também para o presente estudo.

Localizado na região oriental da serra da Mantiqueira, nas proximidades de Santo Antônio do Pinhal, o maciço alcalino máfico-ultramáfico em Ponte Nova, Minas Gerais, é datado ($87,6 \pm 1,3$) Ma (Azzone *et al.*, 2009). Esta idade é condizente com o período da manifestação alcalina do setor Norte da Província da Serra do Mar. É um corpo gabróide de caráter cumulático, intrudido em rochas metamórficas e em granitoides do batólito Serra da Água Limpa (Vinagre *et al.*, 2014). Foi descrito com detalhe e sua sequência de colocação elucidada ao considerar fatores genéticos e geocronológicos por Azzone (1998) e Azzone *et al.* (2009). O maciço comporta rochas máficas e ultramáficas que podem ser relacionadas geneticamente pela ação do fracionamento magmático de um mesmo magma primitivo. O maciço teria se formado por sucessivos pulsos magmáticos, em que se destaca um pulso central que originou uma sequência estratigráfica onde cumulos máficos ocupam a base enquanto rochas mais evoluídas perfazem a região mais alta. São descritos diques máficos e félsicos que cortam o maciço, mas que a maior parte se encontra, atualmente, intrudida em blocos de rochas gabróides. Os diques máficos variam de nefelinitos a basanitos e tefritos, sendo estes últimos de maior incidência. Já os félsicos variam entre tefrifonólitos e fonotrefritos. Um dique basanítico da suíte de diques máficos foi selecionado para o presente trabalho.

A Suíte Intrusiva Graciosa, localizada do nordeste de Santa Catarina ao sudeste de São Paulo, é constituída por plútons graníticos e sieníticos, dos quais se encontra o Granito Rio

Guaraú (Faleiros e Pavan, 2013). Neste último maciço, na porção sul do estado de São Paulo, sienogranitos são intrudidos por diques de diabásio e de lamprófiros com orientação N-NW (Menezes *et al.*, 2015). Os diques de lamprófiro apresentam forma irregular e espessura que variam de 0,2 a 1,2 m (Menezes *et al.*, 2015). Um dique de lamprófiro, proveniente desta região, estudado em Menezes (2013) e Menezes *et al.* (2015) apresenta zonamento composicional que, segundo as respectivas conclusões, não é decorrente de mais de um pulso magmático, mas que é melhor justificado pelo fracionamento mineral interno do corpo. Este mesmo dique também foi selecionado para o presente trabalho.

6.2. Características macroscópicas e identificação das amostras

Os diques utilizados para o desenvolvimento deste trabalho estão identificados por códigos que remetem a província alcalina de origem seguidos pelas iniciais da localidade ou do maciço hospedeiro. Para os diques que apresentam estruturas zonadas, as amostras provenientes de cada setor são identificadas pelo código do dique e por uma letra após o hífen. A letra C indica uma amostra do centro do dique, I da região intermediária entre centro e borda, B da borda e, finalmente, BE da região da borda adjacente à encaixante. Quando ocorrem repetições de amostragem de um mesmo setor, um número inteiro é adicionado após a letra do setor, por exemplo, DAPGG-C2. Algumas informações obtidas da literatura como localização em GPS, identificação do setor do dique amostrado, denominação da rocha hospedeira e a classificação química e petrológica estão apresentados na Tabela 16.

6.2.1. Dique básico intrusivo em sienogranitos do maciço Rio Guaraú - Província Alcalina Arco de Ponta Grossa - (DAPGG)

O dique DAPGG é um corpo zonado, constituído por quatro regiões macroscópicas e texturalmente definidas como BE, B, I e C. Em todos os casos, as rochas são maciças e de coloração cinza escura. A zonação do corpo é definida por variação modal, principalmente pela variação da proporção de megacrístais (muito maior no centro), e granulométrica, com

Tabela 16: Relação de diques e amostras. Os códigos de identificação de dique e amostras são DAPGG (Dique básico intrusivo em sienogranitos do maciço Rio Guaraú - Província Alcalina Arco de Ponta Grossa), DSMU (Dique básico intrusivo em granitos foliados do complexo costeiro, região de Ubatuba - Província Alcalina da Serra do Mar), DSMPN (Dique básico intrusivo no maciço alcalino máfico e ultramáfico de Ponte Nova – Província da Serra do Mar) e DSMB (Diques básicos intrusivos na suíte alcalina da Ilha de Búzios - Província Alcalina da Serra do Mar). A letra C se refere ao centro, I a intermediário, B a borda e BE a borda-encaixante. São fornecidas também informações sobre a localização dos corpos em coordenada GPS, o tipo de encaixante e classificação química segundo Menezes et al. (2015), Alves (1997), Garda (1995) e Azzone et al. (2009) e classificação petrográfica de acordo com o presente trabalho.

Dique	Coordenadas	Amostras	Setor	Classificação Química	Classificação Petrográfica	Encaixante
DAPGG	22J0794101/7255729	BE	borda - encaixante	tefrito	lamprófiro (monchiquito)	biotita granito
		B	borda			
		I	borda - centro	basanito		
		C1	centro			
		C2	centro			
DSMU	23K0495405/7405428	BE1	borda - encaixante	basanito / tefrito	lamprófiro (monchiquito)	granito foliado
		BE2	borda - encaixante			
		B1	borda			
		B2	borda			
		C	centro			
DSMPN	23K422454/7478475	-	bloco	tefrito	lamprófiro (camptonito)	clinopiroxenito olivina melagabro
DSMB	23Y7368789/86199	B	borda	basanito/tefrito	olivina basalto	charnoquito ou sienito
		I	borda-centro			
		C	centro			

amostras de borda praticamente afaníticas. A região C é a mais grossa do corpo. Apresenta textura porfirítica e é composta por uma maior densidade de cristais de piroxênio, sendo estes prismáticos variando de 4,0 a 8,0 mm em suas maiores dimensões e imersos numa matriz fina. Já as amostras coletadas das zonas I possuem cristais de piroxênios prismáticos, porém mais alongados, orientados e em menor concentração em comparação aos cristais do centro do dique. Os macrocristais são maiores que 5,0 mm, em uma matriz fina. A amostra DAPGG-B apresenta a matriz levemente mais fina do que as amostras de I, porém as características e quantidades de macro e megacristais se assemelham. As amostras de borda próximas ao contato com a encaixante são afaníticas.

Em algumas porções das amostras coletadas se observam cavidades esféricas ou de forma irregular com cerca de 2,0 mm, parcialmente preenchidas com material alaranjado de alteração, podendo ser representativas de ocelos.

6.2.2. Dique básico intrusivo em granitos foliados do complexo costeiro, região de Ubatuba - província alcalina da Serra do Mar- (DSMU)

O dique DSMU foi amostrado em duas porções devido a sua longa extensão. De cada uma foram coletados amostras das bordas adjacentes e do centro, porém uma amostra de centro foi descartada devido à alta concentração de xenocristais de feldspato da encaixante. O dique apresenta cor de cinza escuro a preto e tem aspecto porfirítico. É um corpo notadamente zonado, com maior concentração de macrocristais e microestruturas no centro. A matriz é fanerítica fina e, na borda, o dique se torna afanítico. As amostras apresentaram uma espessa capa de alteração e maior concentração de fraturas com material de alteração nas amostras de borda, todavia apenas as porções frescas foram estudadas. Na capa de alteração do centro, encontram-se cavidades esféricas ou irregulares que podem ter sido locais onde se situavam cristais e ocelos mais sujeitos aos efeitos de intemperismo.

6.2.3. Dique básico intrusivo no maciço alcalino máfico e ultramáfico de Ponte Nova – província da Serra do Mar - (DSMPN)

O DSMPN apresenta estrutura maciça, coloração cinza clara e é, caracteristicamente, de textura porfirítica. Apresentam baixa densidade de mega- e macrocristais e a matriz varia de fanerítica fina a muito fina. As amostras foram coletadas de um bloco homogêneo onde nenhum zonamento modal ou granulométrico foi observado.

6.2.4. Dique básico intrusivo na suíte alcalina da Ilha de Búzios - província alcalina da Serra do Mar - (DSMB)

As amostras dos diques DSMB são porfiríticas e indicam a presença de zonalidade no corpo original. Assim, são identificadas amostras de centro e borda, com a maior concentração de macrocristais no centro. São rochas faneríticas finas e de coloração cinza escuro a preta. Apresentam fraturas com material de alteração alaranjado.

6.3. Petrografia

Na descrição petrográfica, são nomeadas três frações granulométricas sem cunho genético: megacristal, macrocristal e microcristal. Neste texto, são considerados megacristais os grãos com tamanho acima de 8,0 mm. Os macrocristais são aqueles que apresentam comprimento entre 0,5 e 8,0 mm. O valor mínimo deste intervalo foi baseado em Mitchell (1986) e o valor máximo em Ubide *et al.* (2014). Têm-se como microcristais os grãos com tamanho abaixo de 0,5 mm. Esta última fração, nas rochas porfiríticas, é formada pelos grãos da matriz, o que inclui até cristalitos e criptocristais.

As características petrográficas consideradas mais relevantes para as amostras dos diques deste estudos encontram-se resumidas na Tabela 17.

6.3.1. DAPGG

DAPGG é classificado como lamprófiro alcalino, mais especificamente como monchiquito (seguindo recomendações de Le Maitre, 2002).

O centro do dique DAPGG (DAPGG-C1) apresenta textura porfirítica, intersertal e poiquilítica (Figura 6A e 6B), melanocrático (IC ~75%). A matriz (Figura 6A e 6B) apresenta granulação fina e seriada (70% da lâmina), com variação entre 0,15 e 1,5 mm. Este setor do dique é caracterizado pela alta concentração de macrocristais de olivina euédrica a subédrica, já parcial ou totalmente substituída (Figura 6C) e de diopsídio prismático, além de biotita poiquilítica.

Os pseudomorfos de olivina variam de euédricos a subédricos, com comprimento máximo 5 mm e perfazem ~10% em volume da rocha. São preenchidos por agregados de serpentina com biotita, epídoto, muscovita, clorita e opacos (Menezes *et al.*, 2015). Os macrocristais de diopsídio são subédricos a euédricos e podem alcançar 3,0 mm. Exibem coloração pardacenta e um pleocroísmo discreto e perfazem 5% da amostra. É possível observar o zonamento composicional concêntrico e feições de reabsorção no centro dos cristais. Macrocristais de diopsídio com as mesmas características são encontrados nos demais setores do dique (Figuras 7A a 7E). Os macrocristais poiquilíticos de biotita variam de comprimento de 3,0 a 10,0 mm aproximadamente e constituem ~9% em volume da amostra. São marrons e bastante pleocróicos. O hábito da kaersutita pode ser aproximadamente hexagonal ou prismático e ocupam ~1% do volume analisado. A kaersutita, na forma prismática, pode alcançar a 2,5 mm.

Amatriz é constituída por microcristais de diopsídio, kaersutita, biotita, opacos, plagioclásio, apatita, além de mesóstase félsica formada por feldspato alcalino e analcima e vidro (já modificado para material criptocristalino). O diopsídio é prismático e de tamanho seriado. O zonamento concêntrico e feições de reações também são exibidos por grãos matriciais de clinopiroxênio. A kaersutita é prismática e é menos abundante que a biotita, o que corresponde a 4% e 10%, respectivamente, em volume de amostra (Menezes, 2013; Menezes *et al.*, 2015). A biotita da matriz é intersticial com dimensões variando entre 0,30 e 0,50 mm. Cristais de plagioclásio tabulares são encontrados em baixas concentrações.

Os opacos se encontram geralmente como inclusões nos macrocristais e na matriz. Neste último caso, pode alcançar 0,1 mm. Possui forma subédrica e, principalmente, granular e totaliza 4,7% da amostra. A apatita aparece apenas ocasionalmente e tem hábitos acicular ou granular, estando inclusas ou parcialmente inclusa em biotita. A mesóstase félsica é sempre intersticial, possivelmente relacionada a processos tardi-magmáticos ou hidrotermais de alteração de vidro.

As regiões intermediárias ainda mantêm a textura porfirítica e intersertal, mas os grãos de clinopiroxênio iniciam a disposição em subparalelo uns aos outros. Esta é uma característica que se torna mais proeminente na borda e próximo a encaixante. Deste modo, a textural passa a ser também fluidal nestes setores (Figura 6D).

Tabela 17: Características petrográficas gerais dos diques DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB. BE é a região do dique próximo a encaixante, B é a borda, I é a região intermediária entre borda e o centro e C é o centro do dique.

Dique	Seção	Texturas	Granulometria da matriz / mm	IC	Macrocristais / Megacristais	Mineralogia Principal	Acessórios	Microestruturas	Xenocristais/ xenólito	Assembléia Hidrotermal
DAPGG	C	porfírica, intersertal poiquilítica	0,15 - 1,50	75%	ol, di, Ks, bt	di, Ks, bt, mag, fsd, anl	ap	ocelo	-	spr, amp, ttn, ep, ms, cb
	I	porfírica, intersertal	0,04 - 0,65		ol, di, bt	di, Ks, bt, mag, fsd, anl	ap	ocelo	-	spr, amp, ttn, ep, ms, cb
	B	porfírica, fluidal intersertal	0,02-0,50		di, bt	di, Ks, bt, mag, fsd, anl	ap	ocelo	-	spr, amp, ttn, ep, ms, cb
	BE	fluidal	0,09 - 0,30		-	di, mag, mineral criptocristalino		-	-	
DSMU	C	porfírica e intersertal	0,04 - 0,25	75%	ol	ol, di, ill, pl, Ks	ap	ocelo	-	cb, chl, bt
	B	porfírica e intersertal	0,09 - 0,4		ol, di	ol, di, ill, pl, Ks	ap	ocelo	-	cb, chl, bt
	BE	porfírica e intersertal	0,02-0,13		ol	ol, di, ill, pl, Ks	ap	ocelo	-	cb, chl, bt
DSMPN	-	porfírica	0,27-1,40	57%	di	di, amp, pl, opaco	ap	-	-	amp
DSMB	C	porfírico, intersertal	0,04-0,40	66%	pl, di, bt, Ks	pl, di, bt, Ks, opaco	ap	-	pl, ol, di, ap	amp, chl, zeo, cb, ser
	B	subofítica e inequigranular	0,1 - 1,20	50%	-	pl, di, bt, Ks, opaco, fsp, anl	ap	ocelo		amp, chl, zeo, cb, ser

Abreviações (Whitney e Evans, 2010): amp (anfíbolio), ap (apatita), spr (serpentina), ttn (titanita), ep (epídoto), ms (muscovita), cb (carbonato), ol (olivina), Ks (kaersutita), anl (analcima), ap (apatita), fsp (feldspato), mag (magnetita), bt (biotita), di (diopsídio), ol (olivina), pl (plagioclásio), ill (ilmenita), chl (clorita), ser (sericita).

Figura 6: Fotomicrografias com aspectos texturais relevantes de DAPGG. A) Macrocrystal poikilitico de biotita, com inclusões de clinopiroxênio prismático - DAPGG-C1; B) Textura porfírica e matriz seriada - DAPGG-C1; C) Olivina alterada - DAPGG-C2; D) Textura fluidal - DAPGG-BE; E) Macrocrystal de diopsídio - DAPGG-B; F) Cristal de diopsídio com textura *cauda de andorinha* em desenvolvimento - DAPGG-I; G) Ocelo de carbonato e matriz alterada a uralita - DAPGG-I; H) Contato entre o dique e a encaixante - DAPGG - BE. Fotomicrografias obtidas com microscópio óptico de luz transmitida: A, B, D, F e H, luz polarizada; C, E e G, polarizadores cruzados. Abreviações - bt: biotita; cpx: clinopiroxênio; cb: mineral carbonático; ol: olivina; pl: plagioclásio.

Figura 7: Fotomicrografias de elétrons retroespalhados de cristais de DAPGG. A) Cristal de diopsídio com zonas concêntricas e feição de reabsorção - DAPGG-C1; B e C) Macrocristais zonados de diopsídio zonado - DAPGG-C2; D) Macrocrystal de diopsídio zonado - DAPGG-B; E) Microcrystal zonado de diopsídio e com feição de reabsorção - DAPGG-B; F) Microcristais prismáticos e alongados da matriz - DAPGG-I. Abreviações - bt: biotita; cpx: clinopiroxênio.

A granulação da matriz diminui do centro para a borda do dique. Em DAPGG-I, o tamanho dos cristais da matriz varia de 0,04 mm a 0,7 mm. Na região da borda, a granulometria é de 0,02 a 0,5 mm (Figura 6D e 7F). A quantidade de macrocristais do centro a borda do dique também diminui progressivamente de forma que, em DAPGG-B, são encontrados apenas macrocristais ocasionais de diopsídio. Também do centro para a borda, a matriz se torna mais inequigranular, e os cristais de diopsídio são os mais bem desenvolvidos (embora muito finos). Estes macrocristais são prismáticos e são proporcionalmente muito mais alongados que em outros setores do dique (Figura 6D).

Em DAPGG-I, há alguns poucos grãos de diopsídio cujas terminações apresentam a textura “cauda de andorinha” (Figura 6F), o que remete ao processo de resfriamento rápido do magma no local.

Também são observadas estruturas globulares, possivelmente ocelos, com tamanho de 0,7 a 1,4 mm parcial ou totalmente preenchidas com carbonato (Figura 6G). São identificadas principalmente nos setores intermediário e central, todavia, estão ausentes na borda. Nas amostras de borda próximas ao contato, são encontrados xenocristais da rocha encaixante que estão envoltos por um halo de reação, porém esta perturbação química do sistema aparenta ser apenas local (Figura 6H).

Segundo Menezes *et al.* (2015), a assembleia hidrotermal atinge ~8% do volume da rocha e compreende nos minerais serpentina, uralita, titanita, epídoto e analcima. Entre estes minerais, visualmente, a uralita se destaca: apresenta cor verde, é bastante fina e ocorre alterando macrocristais e cristais matriciais de clinopiroxênio (Figura 6G) dos setores de borda, intermediário e centro do dique.

6.3.2. DSMU

DSMU é classificado como lamprófito alcalino, mais especificamente como monchiquito (seguindo recomendações de Le Maitre, 2002).

O setor central de DSMU é melanocrático (IC ~75), texturalmente, porfirítico e intersertal (Figura 8A). A matriz constitui ~70% da rocha e é fina, com granulometria que varia de 0,04 a 0,4 mm, enquanto que os macrocristais (~15% em volume) variam entre 0,5 e 4,3 mm. Microestruturas globulares, identificadas como ocelos, correspondem a ~15% em volume da rocha.

A assembleia de macrocristais é constituída eminentemente por olivina subédrica a euédrica (Figuras 8B e 8C). Opticamente, não é possível reconhecer se há zonamento químico; porém é reconhecível, por imagens de elétrons retroespalhados, os zonamentos abruptos e concêntricos que subdividem os grãos entre regiões centrais e bordas (Figuras 9A, 9B e 9C).

A matriz das amostras centrais é constituída por diopsídio, kaersutita, opacos, plagioclásio e olivina. O clinopiroxênio está na forma prismática alongada e de tamanho seriado. A coloração é marrom pardacenta, fracamente pleocróico e constitui 37 % da lâmina. Às vezes, formam estruturas radiais e apresentam zonas composicionais concêntricas e setoriais (Figura 9D). Os grãos matriciais de olivina variam entre subédricos a anédricos e o comprimento está entre 0,1 mm a 0,2 mm e constituem ~10% em volume da rocha. Entre os grãos, como material de preenchimento, encontra-se uma mesóstase criptocristalina, provavelmente, vidro reequilibrado de aspecto sujo, e plagioclásio (13 %). Os grãos de opacos (7 %), por sua vez, são euédricos a subédricos com forma tendendo a retangular ou quadrático e tamanho inferior a 0,1 mm. A kaersutita é subédrica a anédrica, com tamanho médio de 0,1 mm, e perfaz 8 % da lâmina.

As estruturas oclares são constituídas por vidro de aspecto sujo e, em alguns casos, por agregados de plagioclásio, kaersutita e carbonato (Figuras 8D e 9E), ou apenas por carbonatos. Seu maior comprimento varia de 0,2 a 2 mm e apresentam formas circulares ou amebóides. Grãos de kaersutita prismáticos a aciculares que fazem parte destas estruturas são maiores e mais alongados (0,5 a 0,7 mm) que aqueles encontrados na matriz. Os glóbulos preenchidos por carbonato apresentam dimensão bastante inferior ao dos ocelos silicáticos.

Na assembleia hidrotermal, tem-se biotita (que envolve grãos de opacos), clorita e carbonatos (que substituem alguns macro e microcristais de olivina). Em alguns cristais de olivina, o processo de formação de pseudomorfos é ainda inicial/intermediária e tem como ponto de partida as fraturas curvilíneas, típicas das olivinas.

As amostras mais próximas de borda também são, caracteristicamente, porfiríticas, intersertais e seriadas. Apresentam a mesma mineralogia da amostra de centro do dique, porém divergem entre si quanto à granulometria e às proporções modais. O IC é de ~70%. Quanto à granulometria, há uma redução significativa no tamanho dos cristais da

Figura 8: Fotomicrografias com aspectos texturais relevantes de DSMU. A) Textura porfírica e intersertal - DSMU-B2; B e C) Macrocristais de olivina - DSMU-C; D) Ocelo constituído por plagioclásio, opaco, fase vítrea e kaersutita - DSMU-C; E) Macrocristais de clinopiroxênio que formam estruturas em V - DSMU-BE2; F) Contato entre o dique e a encaixante - DSMU-BE2. Fotomicrografias obtidas com microscópio óptico de luz transmitida: A, C, D, E, F - luz polarizada; B, polarizadores cruzados. Abreviações - cpx: clinopiroxênio; ks: kaersutita; ol: olivina.

Figura 9: Fotomicrografias de elétrons retroespalhados de cristais de DSMU. A, B e C) Macrocristais de olivina com distinção química entre borda e centro - DSMU-C; D) Microcristais zonados de clinopiroxênio da matriz - DSMU-C; E) Estruturas oclares preenchidas com plagioclásio, kaersutita e opaco - DSMU-C; F) Micro e macrocristais de clinopiroxênio que formam estruturas em V - DSMU-BE2. Abreviações - cpx: clinopiroxênio; ol: olivina.

matriz nas regiões mais próximas do contato, com cristais entre 0,02 mm a 0,13 mm. A quantidade de macrocristais de olivina não é homogênea e são observadas variações, embora diminuam em concentração em relação ao centro (<10% em volume).

A matriz das regiões de borda apresenta, dentro de toda heterogeneidade modal, ~5% de olivina, ~45% de diopsídio, ~10% de opacos, ~5% de kaersutita, ~10% de plagioclásio e 20% vidro (reequilibrado para mesóstase micro- a criptocristalina). O diopsídio é prismático e está distribuído aleatoriamente pela matriz. Todavia, há uma região da lâmina em que grãos de clinopiroxênios são mais desenvolvidos e se arranjam uns aos outros de modo a constituir estruturas em forma de “v” (Figura 8E e 9F). Estes grãos apresentam comprimento de 0,3 a 3,0 mm e estão dispostos perpendicularmente a uma coluna, em que há uma maior concentração de opacos. A kaersutita é subédrica a anédrica. Os opacos são anédricos e formam duas frações granulométricas de 0,02 e de 0,04 mm em DSMU-BE2. Já, em DSMU-B2, os grãos de opacos são esqueléticos de 0,02 a 0,05 mm.

A preservação dos cristais de olivina é mais prejudicada do centro em direção à borda, possivelmente, devido a maior infiltração de fluidos e ação de agentes intempéricos haja vista a maior quantidade de fraturas nestas amostras. Algumas já se encontram em condições de pseudomorfos, sendo substituídos por serpentina, carbonatos e clorofaeíta, principalmente. Também nas regiões de borda, os ocelos são mais raros e menores comparativamente ao centro do dique. Seu comprimento é de em torno de 3,5 mm e são preenchidos das mesmas formas que na região central. Os glóbulos constituem ~5% das amostras de borda e se distribuem de forma heterogênea. Seu diâmetro varia entre 0,03 e 0,2 mm. Logo na adjacência com o contato, os glóbulos são mais numerosos (25%) e são preenchidos por carbonatos e material isotrópico (provável vidro alterado) e a sua dimensão está entre 0,09 e 0,18 mm (Figura 9F). Xenólitos e xenocristais da encaixante crustal também são encontrados nas rochas dos diques.

6.3.3. DSMPN

DSMPN é classificado como lamprófiro alcalino, mais especificamente como camptonito (seguindo recomendações de Le Maitre, 2002). A textura é porfirítica, intergranular e apresenta tendência poiquilítica. A matriz apresenta granulometria entre 0,27 e 1,4 mm e os minerais mais abundantes são plagioclásio e kaersutita.

Os macrocristais prismáticos predominantes são de diopsídio (~10%), e medem de 2,5 a 7,1 mm. Estes cristais apresentam zonamento concêntrico ou setorial (Figuras 10A - 10C, 11A - 11C). No primeiro caso, o núcleo é marrom claro (diopsídio) e a borda mais rósea com um maior pleocroísmo (titanoaugita). No zonamento setorial, as zonas de faces perpendiculares ao eixo c são mais claras do que as zonas de faces paralelas ao eixo. Nota-se que há feição de reabsorção nas bordas destes cristais (Figura 11D).

A matriz é formada por kaersutita, diopsídio, plagioclásio, opacos e apatita (Figura 10D e E). A kaersutita (~40%) aparece pleocróica e de coloração marrom a marrom avermelhado. São anédricos e limitados por plagioclásio ripiforme. Ocupam regiões de até a 0,50 mm de comprimento. Cristais de diopsídio aparecem em menor frequência (~5%) na matriz e formam grãos subédricos a anédricos. Os cristais de plagioclásio (~35%) apresentam geminação Carlsbad e às vezes polissintética, e se dispõem em orientação subparalela em algumas porções. Os grãos de opacos (7 %) da matriz estão inclusos nos cristais de kaersutita e diopsídio e, em menor proporção, aparecem inclusos em grãos de plagioclásio. O tamanho dos opacos varia entre 0,05 e 0,5 mm. A apatita (~3%) ocorre com hábito acicular na matriz.

Agregados de granulação média a grossa formados por clinopiroxênio, apatita e opacos encontrados neste dique foram interpretados como xenólitos dos cumulatos máficos da hospedeira (Figura 10F).

6.3.4. DSMB

As rochas de DSMB são classificadas como olivina basalto de tendência alcalina (seguindo recomendações de Le Maitre, 2002).

O centro do dique tem aspecto porfirítico e intersertal, constituindo variedade melanocrática (IC ~66%). A matriz é seriada, e o tamanho dos cristais está entre 0,04 e 0,4 mm. Apresenta alta carga de macrocristais e são constituídos por clinopiroxênio, olivina e plagioclásio, biotita e kaersutita.

Os macrocristais de diopsídio (~25% em volume) são prismáticos com cor parda roseada. Em alguns cristais, observam-se núcleos de reabsorção e zonamento concêntrico

Figura 10: Fotomicrografias com aspectos texturais relevantes de DSMPN. A) Textura porfirítica, macrocristal de clinopiroxênio com zonamento setorial; B) Macrocristal de diopsídio com zonamento concêntrico; C) Diopsídio com feição de reabsorção; D e E) Matriz formada por kaersutita, plagioclásio (pl), opaco e apatita; F) Contato entre clinopiroxênio e opaco que incorpora parte da matriz. Fotomicrografias obtidas com microscópio óptico de luz transmitida: B, D, E e F, luz polarizada; A e C, polarizadores cruzados. Abreviações - cpx: clinopiroxênio; pl: plagioclásio; ks: kaersutita; ap: apatita.

Figura 11: Fotomicrografias de elétrons retroespalhados de cristais de DSMPN. A, B, C) Textura porfirítica com tendência a poiquilítica e intergranular, megacristais de clinopiroxênio. D) Borda de clinopiroxênio com feição de reação. Abreviações - cpx: clinopiroxênio; pl: plagioclásio; ap: apatita.

e/ou setorial (Figura 12A), e variam de 3,6 mm a 9,0 mm de comprimento. A kaersutita (~1%) e a biotita (~4%) se encontram como macrocristais prismáticos e anédricos, respectivamente, variando de 0,7 mm até 3,9 mm. Os grãos de plagioclásio (~5%) são tabulares e podem alcançar 3,0 mm. Os cristais de olivina (~10%) são euédricos, apresentam leve alteração nas bordas e nas fraturas e possuem dimensões comparadas as macrocristais de diopsídio (Figura 12B).

Alguns dos macrocristais são classificados como xenocristais, ou como constituinte de microxenólitos, quando estão agrupados (Alves, 1997). Há a ocorrência de xenocristais de plagioclásio, que apresentam uma borda de sobrecrecimento de plagioclásio limpo, com o núcleo com muitas inclusões de microlitos e alguns identificáveis, como a biotita (Alves 1997) (Figura 12C). O centro destes cristais pode estar totalmente substituído. Nota-se que grãos de clinopiroxênio em contato com este material parecem ser reabsorvidos (Figura 12D e 13A). Os microxenólitos possuem composição gabroide e são constituídos por clinopiroxênio zonado, plagioclásio, olivina e apatita (Figura 13B).

A matriz é constituída principalmente por diopsídio (~15 %), biotita (~6 %), kaersutita (~3 %), opacos (~4 %), plagioclásio (~15%) e vidro intersticial (~10 %) (Figura 12E e 12F). Na matriz, o diopsídio ocorre com zonamento concêntrico e/ou setorial (Figuras 13C – 13F). Os cristais variam entre 0,1 mm e 1,8 mm e podem ser euédricos ou subédricos. Formam três tipos de população: a primeira é euédrica e se encontra no corte próximo a seção basal, com forma hexagonal e são raros; na segunda, há cristais de hábito prismático, que podem afunilar em direção às extremidades; a terceira corresponde à fração mais fina, varia de euédrica (prismática) a anédrica. A biotita está presente livre ou associada às bordas de cristais de opaco e têm entre 0,2 mm e 0,5 mm. A kaersutita é subédrica e pode estar, aproximadamente, na forma prismática ou hexagonal. A distribuição da biotita e da kaersutita não é homogênea na rocha. Em alguns locais, estão aglomerados, ou formam fileiras. Os grãos de opacos aparecem associados ou inclusos em minerais máficos e parcialmente inclusos em plagioclásio. São subédricos a anédricos e medem de 0,1 a 0,4 mm. Grãos de plagioclásio tabulares, muitas vezes zonados, apresentam, em média, 1,2 mm de comprimento. O vidro reequilibrado (10 %) é observado em porções intersticiais, apresenta aspecto sujo e, em algumas poucas porções, é isótropo. A apatita ocorre esporadicamente e está inclusa em macrocristais ou como parte da matriz.

Figura 12: Fotomicrografias com aspectos texturais relevantes de DSMB. A) Textura porfirítica e intersertal. Macrocristal de clinopiroxênio zonado com feição de reabsorção no centro - DSMB-C; B) Macrocristal de olivina com início de alteração a partir das bordas e fraturas - DSMB-C; C) Grão de plagioclásio com núcleo substituído e sobrecrecimento de plagioclásio mais limpo - DSMB-C; D) Cristal de clinopiroxênio da matriz com zonamento setorial- DSMU-C; E e F) Matriz composta por clinopiroxênio, kaersutita, biotita, plagioclásio, opaco e vidro - DSMB-C; G e H) Ocelo constituído por feldspato e analcima - DSMB-B. Fotomicrografias obtidas com microscópio óptico de luz transmitida: B, C, F e G, luz polarizada; A, D, E e H, polarizadores cruzados. Abreviações - bt: biotita; cpx: clinopiroxênio; ol: olivina; pl: plagioclásio; ks: kaersutita; fsp: feldspato; anl: analcima.

Figura 13: Fotomicrografias de elétrons retroespalhados de cristais de DSMB. A) Interação entre cristal de diopsídio e os microlitos - DSMB-C; B) Parte de um xenólito que é constituído por plagioclásio, olivina, clinopiroxênio e apatita - DSMB-C; C) Microcristal de diopsídio com zonamento setorial - DSMB-C; D) Microcristal de diopsídio da matriz com zonas concêntricas e núcleo com feição de reabsorção - DSMB-C; E) Microcristal de diopsídio com zonamento concêntrico e setorial - DSMB-C; F) Microcristais da matriz e zonamento setorial - DSMB-C. Abreviações - cpx: clinopiroxênio; ol: olivina; pl: plagioclásio; ap: apatita.

A borda (DSMB-B) é texturalmente inequigranular, subofítica e intersertal, com diminuição da proporção de máficos (IC ~50%) e progressivo aumento do teor de félsicos (até 35% de plagioclásio). Há o predomínio de cristais bem formados e de granulação fina. Os demais constituintes apresentam distribuição e características semelhantes à matriz da porção central.

Ocupando a cerca de 15 % da área analisada, encontram-se estruturas globulares (Figura 12G e 12H), constituídas por grão tabulares de feldspato zonados e material isótropo que pode ser analcima (Alves, 1997). Alguns grãos de kaersutita, cujo hábito varia de tabular a acicular, cortam ou estão nas bordas das estruturas globulares.

6.4. Ressalvas no uso do termo porfirítico

O termo porfirítico é empregado como uma caracterização preliminar de algumas rochas no trabalho em campo ou na classificação petrográfica por microscopia. Todavia, esta classificação textural não se limita a feições essencialmente descritivas, mas apresenta certo cunho genético em sua definição. Rochas porfiríticas são aquelas constituídas por fenocristais em uma matriz de granulação mais fina. No caso em que o material que carrega os fenocristais seja vítrea, a textura passa a ser denominada vitrofírica. No entanto, os macro e megacristais, para serem considerados fenocristais, necessitam estar em equilíbrio químico com a matriz. Alguns macrocristais de clinopiroxênio e olivina dos diques DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB são zonados concêntricamente e mostram feições de reações e dissolução nas zonas centrais, o que remete que, em algum estágio do seu crescimento, houve a modificação química do líquido que os cercava. Inicia-se a formação de outra zona no cristal quando a velocidade de sobrecrecimento do cristal, porém com outra composição, é maior que a do efeito de dissolução de forma a constituir um manto após a zona mais primitiva do cristal.

Tendo em vista os processos e fracionamento mineral e da assimilação de novas fases aos quais um magma pode estar submetido, as regiões dos cristais que não estão em equilíbrio com a matriz podem ser originários de duas fontes diferentes. Cristais bem desenvolvidos e de granulação grossa de feldspato em sistemas máficos-ultramáficos, por exemplo, podem ser provenientes das rochas encaixantes das amostras estudadas. Neste caso, estes cristais são classificados como xenocristais. Outros são originados do mesmo sistema magmático, porém em etapas evolutivas anteriores ao da consolidação da rocha e que, por isso, apresentam-se em desequilíbrio químico com o magma hospedeiro. Estes

cristais são carregados pelo líquido até a consolidação da rocha de modo que passam a ser denominados antecristais (Davidson *et al.*, 2007; Larrea *et al.*, 2012).

A partir das possíveis fontes de macro e megacristais em rochas porfiríticas, é aplicado, neste trabalho, o conceito rocha porfirítica para rochas inequigranulares que apresentem ao menos duas populações de cristais com tamanhos muito contrastantes, ou seja, uma fração cristalina com tamanho de no mínimo cinco vezes maior que da outra fração, independentemente da origem.

6.5. Considerações

Os diques selecionados para este estudo se assemelham pela mineralogia típica de sistemas máficos alcalinos, com olivina, clinopiroxênio e fases hidratadas como kaersutita e biotita. Os ocelos são abundantes entre os diques, salvo em DSMPN onde é inexistente. No geral, são de dimensões maiores nas amostras de centro e se tornam menores gradualmente em direção das bordas dos corpos. O zonamento mineral de diques com a maior carga de macrocristais e ocelos no centro do corpo pode ser explicado pelo processo de resfriamento do dique que se inicia com maior velocidade no contato com a encaixante e se torna mais lento no centro. Outro fenômeno que, possivelmente, contribui para este zonamento é a segregação por fluxo, no qual a capacidade do magma em ascensão de carregar mega e macrocristais é crescente com o aumento da sua velocidade. Neste caso, a maior velocidade fluxo do magma estaria no centro do dique e, por isso, seria a região do corpo com maior carga de macro e megacristais.

Apesar de alguma alteração hidrotermal ser diagnosticada para a maioria dos diques deste estudo, esta é muito circunscrita e localizada, sendo com facilidade evitada nas etapas de preparação de amostras e de análise.

Desta forma, as amostras selecionadas destes quatro diques apresentam tanto condições globais quanto cristais bem preservados para o desenvolvimento de estudos de coeficientes de partição.

7. Composição e classificação química de rocha total e de matriz

7.1. Introdução

Como observado a partir dos dados petrográficos, os diques selecionados para esse estudo possuem heterogeneidades importantes a serem consideradas para estudos de coeficientes de partição. Citam-se, por exemplo, heterogeneidades texturais, modais e granulométricas entre regiões de centro e borda dos corpos. Além disso, diferentes populações de cristais, com variadas proporções destas entre regiões de centro e borda são complexantes em um dos principais questionamentos deste trabalho, qual seja, qual a composição do líquido.

Zonamentos texturais, modais e composicionais são comuns a diques de lamprófito alcalino (Rock, 1991; Ubide *et al.*, 2012, 2015; Menezes *et al.*, 2015). Trabalhos recentes têm demonstrado que as populações de mega- e macrocristais são representativas de antecristais máficos, e que as diferenças composicionais entre centros e bordas destes corpos guarda relação principalmente com a elevada carga de antecristais antes que a diferentes líquidos magmáticos (Ubide *et al.*, 2012, 2015; Menezes *et al.*, 2015).

Neste capítulo, são apresentados os dados geoquímicos de rocha-total obtidos para as amostras dos diques do estudo. Foram realizadas análises de rocha-total de amostras provenientes de 4 diques (Tabela 1), entre as quais são também salientadas as diferenças composicionais dos setores de um mesmo dique.

Além disso, busca-se apresentar os dados obtidos para as matrizes finas destes corpos em suas diferentes regiões de amostragem, tentando-se descontar assim as cargas de mega e macrocristais. Dois métodos principais foram escolhidos para este fim, a análise por FRX e ICP-MS de amostras que foram submetidas à catação prévia de mega- e macrocristais, bem como a análise direta das matrizes por ME. As condições específicas de preparação se encontram com detalhe no capítulo 5. Discussões sobre as dificuldades enfrentadas e avaliações de fontes de erro de cada método são apresentadas no capítulo 9. Assim, este assunto abre caminho para descrição dos resultados dos diferentes métodos aplicados para obtenção da composição de matriz. Esta última etapa é considerada a mais críticas do estudo do coeficiente de partição em rochas.

7.2. Classificação química e descrição composicional de rocha total

Os quatro diques analisados são designados alcalinos de acordo com o sistema de classificação química TAS (total álcali *versus* sílica) para rochas vulcânicas (Le Maitre, 2002) e constituem rochas ultrabásicas ($\text{SiO}_2 < 45\%$ em m/m). Os diques DAPGG, DSMB, DSMU e DSMPN se localizam no campo do basanito/tefrito do diagrama (Figura 14). Especificamente, são classificados entre os dois subcampos segundo o teor normativo de olivina (Le Maitre, 2002): se maior que 10% são denominados basanitos; se menor de 10%, passam a chamar tefritos. Deste modo, o centro de DAPGG é classificado como basanito e os demais setores (intermediário e borda) como tefritos. DSMU e DSMB são basanitos, não havendo distinção entre os setores de cada corpo. DSMPN, que foi amostrado como um bloco, sem apresentar zonamento mineralógico ou de granulação, classifica-se como tefrito.

O diagrama R1-R2 para rochas vulcânicas (De La Roche *et al.*, 1980) é abordado, pois este é um sistema de classificação que integra relações entre os principais elementos maiores por meio dos parâmetros $R1 = 4\text{Si} - 11(\text{Na}+\text{K}) - 2(\text{Fe}+\text{Ti})$ e $R2 = 6\text{Ca} + 2\text{Mg} + \text{Al}$ (Figura 14). Assim sendo, DSMPN e DSMB se classificam como tefrito e os corpos DAPGG e DSMU como basanito. Referente ao teor de álcalis, segundo o diagrama Na_2O *versus* K_2O (Middlemost, 1975), os diques pertencem à série das rochas potássicas, salvo o setor central de DAPGG que é classificado como ultrapotássico (Figura 15).

Os minerais normativos (CIPW) se encontram na Tabela 10 (Anexo) e Tabela 18. Foram calculados, na base anidra, por meio de planilha de Excel desenvolvida pela USGS, que segue as recomendações de cálculo de Le Maitre (2002). Para este cálculo, a partição entre Fe^{2+} e Fe^{3+} foi calculada com auxílio do *software Melts* (Ghiorso e Sack, 1995; Asimow e Ghiorso, 1998), fixando-se o tampão QFM para cada uma das amostras analisadas. A escolha deste tampão é congruente com a mineralogia das amostras e compatível com os testes realizados, cujas condições otimizadas para o cálculo com o programa foram 1100°C e 1000 bar.

Todos os diques estudados são *olivina (ol)* e *nefelina (ne)* normativos. No geral, os diques tendem a apresentar a norma mais enriquecida em *ol* no centro do que na borda (Tabela 18). Entre as amostras de DAPGG, a maior porcentagem encontrada é de 21,3% (DAPGG-C) e a menor de 7,2% (DAPGG-B). Nos outros diques, o mínimo e o máximo de *ol*

Figura 14: Classificação química dos diques DAPGG, DSMB, DSMU e DSMPN segundo o diagrama TAS (Le Maitre, 2002) e de acordo com o diagrama R1 e R2 (De La Roche *et al.*, 1980). Os setores estão designados pelas letras C (centro), I (intermediário), B (borda) e BE (borda-encaixante). Nos diagramas, estão incluídas as análises de matriz por Microsonda Eletrônica (terminação em ME) ou da seleção por catação (terminação em M). Os óxidos foram normalizados na base anidra e se encontram em % mm⁻¹ em A), C) e E). A quantidade de óxidos normalizados na base anidra foi transformada em 10⁶ cátions em B), D) e F). Em A) e B), estão os dados de DAPGG, em C) e D), os dados de DSMU e, em E) e F), encontram-se os de DSMB e DSMPN. Nos diagramas, também estão representados composições de olivina e de clinopiroxênio dos diques.

Figura 15: Diagrama K_2O versus Na_2O em % em massa (m/m). Os campos indicam as três séries das rochas alcalinas: ultrapotássica, potássica e sódica (Middlemost, 1975).

Tabela 18: Classificação, mineralogia normativa e dados de composição de DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB. Os elementos Cr, Ni, Co e o somatório de ETRs estão em ppm. Abreviações e legenda: B (borda), BE (borda-encaxante), M (análise de matriz separada por catação), ME (análise de matriz por amostragem direta de sólido), I (intermediário), C (centro), Di (diopsídio), Or (ortoclásio), Ne (nefelina), Il (ilmenita), An (anortita), Ol (olivina), Mt (magnetita), Ap (apatita), Ab (albita), Cs (dissilicato de cálcio), B (basanita), T (tefrito), P (potássico), UP (ultrapotássico).

		Classificação Química			Mineralogia normativa				Composição					
Diques	Setor	TAS	R1-R2	S. A.	Ne	Ol	Di	Demais	Cr	Ni	Co	ΣETR	Zr/Nb	La _N /Yb _N
DAPGG	BE(ME)	T	B	P	12,0	6,2	43,0	Di>or>Ne>Il>A n>Ol>Mt>Ap>Ab	139	97	49	502	3,7	45,7
	B	T	B	P	12,4	7,2	49,2	Di>Ne>Il>Or>Ol>Lc>Mt>Ap>A n	137	135	59	500	4,1	55,9
	BM	T	T	P	11,8	9,3	44,7	Di>Ne>Or>Il>Ol>Lc>Mt>Ap>A n	103	110	56	533	3,9	44,8
	B(ME)	B	T	P	12,6	12,6	37,1	Di>Or>Ol>Ne>Il>Mt>A n> Ap> Ab	116	83	43	439	4,2	43,1
	I	T	B	P	10,5	9,8	45,6	Di>Or>Ne>Il>Ne>Lc>Mt>Ap>A n	205	170	65	502	4,0	55,9
	IM	T	B	P	13,7	5,6	50,1	Di>Ne>Or>Il>Mt>Ap>A n>Lc	137	120	56	521	4,0	54,5
	C1	T	B	P	10,9	9,0	46,9	Di>Or>Ne>Il>Ol>Mt>Lc>Ap>A n	205	170	60	497	4,0	49,8
	C1M	T	A	P	13,2	5,6	50,7	Di>Ne>Il>Or>Lc>Ol>Mt>Ap>A n	137	120	56	377	4,0	55,9
	C2	B	B	UP	6,0	21,3	42,2	Di>Ol>Lc>Il>Ne>Mt>A n>Ap>Cs	479	460	73	377	4,0	55,9
	DSMU	BE1	B	B	P	13,8	13,9	28,2	Di>A n>Or> Ol>Ne>Il>Mt>Ap>Ab	171	135	42	306	3,7
	BE2	B	B	P	12,1	16,3	27,7	Di>A n>Ol> Or>Ne>Il>Mt>Ap>Lc	205	180	45	331	3,6	27,6
	B1	B	B	P	13,8	13,1	28,5	Di>A n>Or>Ne>Ol>Il>Mt>Ap>Ab	171	125	41	337	3,6	26,6
	B1M	B	B	P	13,3	14,2	28,2	Di>A n>Ol>Or>Ne>Il>Mt>Ap>Ab	205	140	40	324	3,5	27,5
	B2	B	B	P	12,4	18,9	26,7	Di>OL>A n>Or>Ne>Il>Mt>Ap>Lc	239	270	46	297	3,6	27,1
	B2(ME)	T	T	P	17,0	6,2	23,5	Di>A n>Or>Ne>Il>Ol>Mt>Ap>Ab	168	32	27	331	3,8	24,7
	C	B	B	P	14,2	17,0	28,5	Di>Ol> A n>Ne> Or>Il> Mt>Ap>Ab	205	250	43	447	3,6	32,7
	CM	B	B	P	13,5	16,5	30,1	Di>Ol> A n>Ne>Or> Il>Mt>Ap>Lc	239	220	39	440	3,8	34,6
DSMPN	-	T	T	P	9,5	9,1	17,2	Or > Di> A n>Ab> Ne>Ol>Il>Ap>Mt	34	<LQ	39	430	2,0	26,4
	M	T	T	P	9,3	8,8	16,4	Or>A n>Di>Ab>Ne>Ol>Il>Ap>Mt	34	<LQ	40	435	3,9	25,0
DSMB	B	B	T	P	8,1	12,7	14,3	A n>Ab>Di>Or>Ol> Il>Ne>Ap>Mt	<LQ	<LQ	32	311	3,3	22,3
	C	B	T	P	7,2	13,8	15,1	Or>A n>Ab>Di>Ol>Ne>Il>Ap>Mt	103	100	30	304	3,5	25,3

são (12,7 e 13,8%) em DSMB, (13,1 e 18,9%) em DSMU e 9,1% em DSMPN. Ao contrário da *ol*, a proporção de *ne* é mais elevada na borda do que no centro, com exceção de DSMU em que é observada a tendência oposta. Ao se considerar a média das amostras dos setores de cada dique, os valores de *ne* obtidos são 13,3 % (DSMU), 9,9 % (DAPGG), 9,5 % (DSMPN) e 7,6 % (DSMB).

Como é indicada pela quantidade de *ol* e, indiretamente, por $\text{mg\#} [100 \cdot \text{MgO} / (\text{FeO} + \text{MgO}), \text{molar}]$, as regiões centrais dos diques possuem maior carga de macrocristais máficos. Entre os diques, a média do $\text{mg\#}$ segue, na ordem crescente, os valores 43 (DSMPN), 56 (DSMB), 59 (DAPGG) e 67 (DSMU). Esta variação em $\text{mg\#}$ também é observada pela correspondente quantidade de olivina modal que aumenta de DSMPN para DSMU.

A proporção de *diopsídio* normativo (*di*) é maior na borda do que no centro em DAPGG, mas o contrário ocorre em DSMB e DSMU. Os valores médios de *di* nos corpos estudados são 14,7 % (DSMB), 17,2% (DSMPN), 27,9% (DSMU) e 46,0 % (DAPGG). A quantidade de *anortita*, *an*, é mais elevada no centro de DAPGG, no entanto, a sua porcentagem média é inferior do que ocorre nos outros corpos. Também é observada a quantidade de *an* mais baixa no centro de DSMB e DSMU do que nas bordas. Os valores médios de *an* para cada dique são 1,24 % (DAPGG), 16,3 % (DSMU), 16,8 % (DSMPN) e 24,8 % (DSMB). Apenas DAPGG-C1 apresentou *silicato de dicálcio*, *cs*, com 1,1%.

A *leucita* (*lc*) aparece somente em DAPGG e nas amostras DSMU-B2 e DSMU-BE2. No centro de DAPGG, a sua porcentagem é de 13,8. Já nas outras amostras do mesmo dique, a média é de 4,50 %. Nos setores de DSMU citados, a *lc* varia entre 0,15 e 0,76 %. Por outro lado, a quantidade de *ortoclásio*, *or*, aumenta da borda em direção ao centro de DAPGG, mas está ausente em DAPGG-C1, onde há a maior porcentagem de *lc*. O *or* médio dos corpos são 11,2 % (DAPGG), 13,9 % (DSMU), 15,7 % (DSMB) e 18,3 % (DSMPN).

A *albita*, *ab*, está ausente em DAPGG, mas em alta porcentagem nos outros diques que são mais sódicos. Este mineral normativo é mais enriquecido nos centros de DSMB do que nas bordas. Em DSMU, *ab* aparece nas amostras mais enriquecidas em Al_2O_3 e/ou Na_2O , que são DSMU-C e DSMU-BE1. A média do valor de *ab* por dique é 0,73 % (DSMU), 14,0 % (DSMPN), 15,5 % (DSMB).

Dos minerais normativos citados, observa-se que a distribuição dos elementos entre as fases ocorre de forma dependente, principalmente, dos teores de Al_2O_3 e SiO_2 . Por exemplo, entre os diques estudados, DAPGG é mais rico em CaO, porém mais pobre em Al_2O_3 , deste modo o CaO integrará de forma preferencial o *di* e não a *an*. Os baixos teores de Al_2O_3 e SiO_2 em DAPGG relativos aos dos outros diques contribuem para que, na sua norma, seja mais elevada as porcentagens dos feldspatóides *nefelina* e *leucita*. Por outro lado, os aluminossilicatos *or*, *ab* e *an* são mais abundantes na norma de DSMB, DSMU e DSMPN.

Os minerais normativos de menor abundância nos corpos em foco são a *magnetita* (*mt*), *ilmenita* (*il*) e a *apatita* (*ap*). A *mt* é mais empobrecida nos centros de DAPGG e DSMB, todavia a tendência é oposta em DSMU, com diferenças singelas entre os setores borda e centro neste último caso. A média de *mt* para cada dique é 3,07 % (DSMB), 3,23 % (DSMU), 3,49 % (DSMPN) e 4,49 % (DAPGG). Ao comparar centro e borda, a *il* é mais rica nas bordas de DAPGG e DSMB. Em DSMU, a porcentagem de *il* nas amostras de borda variam acima ou abaixo do valor encontrado para o setor central do dique. O *il* médio para cada corpo é 6,78 % (DSMU), 7,54 % (DSMB), 8,05 % (DSMPN) e 9,43 % (DAPGG). A *ap* é mais abundante no centro de DSMU e nas bordas de DAPGG e DSMB. Os valores médios de *ap* para os respectivos diques são 1,74 % (DAPGG), 2,13 % (DSMU), 3,58 % (DSMB) e 3,70 % (DSMPN).

Os minerais não silicáticos *mt*, *il* e *ap* mostram a distribuição dos cátions Fe^{2+} , Fe^{3+} , Ti^{4+} e P^{5+} . Condizente às fração mássica de FeO , Fe_2O_3 e TiO_2 da composição de rocha total, a *mt* e a *il* é mais elevada em DAPGG do que nos outros corpos. Cabe salientar que, a partir de Fe_2O_{3t} , foram calculadas as as frações mássicas de FeO e Fe_2O_3 pelo *software Melts* (Ghiorso e Sack, 1995; Asimow e Ghiorso, 1998), conforme mencionado anteriormente.

Em relação ao conteúdo de voláteis (Anexo, Tabela 1A), estas rochas são consideradas hidratadas e a porcentagem em massa varia de 0,75 % (DSMPN) a 5,24 % (DSMU-BE2). Comparativamente entre os setores de um mesmo dique, este valor é mais elevado em DAPGG-C1 (4,16%), DSMB-B (4,44 %) e DSMU-BE2.

Os elementos Cr, Ni e Co (Tabela 18) estão presentes nas rochas estudadas como elementos traços compatíveis para esses sistemas, dado que olivina e clinopiroxênio representam estágios de cristalização precoce a principal (Figura 16). Entre tais elementos, o Cr e o Ni são mais abundantes que Co e apresentam maior e menor fração mássica em DAPGG e DSMPN, respectivamente. Quanto ao zonamento composicional dos demais diques, este

Figura 16: Diagramas binários de Cr + Ni + Co em ppm (A,C) e ΣETR em ppm (B, D) versus mg# [(MgO)/(MgO + FeO)] x 100, termos em mol] para os diques DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB. Estão representadas as composições de setores dos diques e cristais de olivina e clinopiroxênio.

é mais marcante em DAPGG, no qual os três elementos estão mais concentrados no centro.

O somatório médio dos valores de ETRs (Tabela 18) mostra a sequência de empobrecimento destes elementos na seguinte ordem: DAPGG (469 ppm), DSMPN (430 ppm), DSMU (344 ppm) e DSMB (311 ppm). Em DAPGG e DSMU, os ETRs se encontram mais concentrados nas bordas do dique; em DSMB, no centro do dique. Estas relações também são observadas nos diagramas ΣETR versus mg# (Figuras 16).

Os valores da razão entre La e Yb, normalizados pelos respectivos valores no condrito (La_N/Yb_N), encontram-se na Tabela 18. Pelos valores médios entre os setores, DAPGG é o que apresenta a maior razão, 54. Já para os outros diques, La_N/Yb_N em DSMU resulta em 28, em DSMPN em 26, e em DSMB em 23. A razão é única entre os setores de DAPGG (55,9), exceto para o setor central C1, cujo valor é 49,8. Em DSMU e DSMB, a razão é maior no centro que na borda.

Na Figura 17, são apresentados os padrões de enriquecimento de elementos incompatíveis, normalizados segundo os valores médios de fração mássica do manto primitivo (pirolito) e segundo o reservatório condritico para os ETRs (McDonough e Sun, 1995). No geral, as amostras apresentam anomalias negativas de Zr, P, Th, Sm e U e positivas para Ba e Sr. São enriquecidas em cerca de 100 vezes em ETRs leves e 10 vezes em ETRs pesados em relação ao condrito. Os HFSE, tais como U, Nb, Ta e Zr são entre 10 e 100 vezes mais abundantes que a média do manto primitivo. Já Lu e Yb se encontram de 3 a 5 vezes mais concentrados nas amostras do que no manto.

Em DAPGG, o setor C1 é mais empobrecido em elementos traços que os outros setores do dique, exceto para o U (Figuras 17A e 17B). Esta observação vai ao encontro do dado de soma dos ETRs da Tabela 18. As amostras DAPGG-B, DAPGG-I e DAPGG-C2 mostram um comportamento bastante concordante entre si quanto aos elementos do diagrama. Neste caso, citam-se como exceções alguns elementos de DAPGG-B, como o Ti, Ba, U, Th e Ta que se diferenciam dos outros dois setores, I e C2. Assim, juntos aos dados de petrografia, a partir dos dados de análises químicas, conclui-se que DAPGG-C2, apesar de se localizar próximo ao centro do dique, já apresenta características das regiões intermediárias e bordas. Isto pode acontecer por uma menor carga de macrocristais máficos nesta amostra. Neste dique, as anomalias são mais acentuadas para P e U e menos para Ba e Th.

Figura 17: (A, C, E, G) Valores experimentais de fração mássica de elementos incompatíveis normalizados pelos respectivos valores no manto primitivo (pirolito). (B, D, F, H) Valores de fração mássica de ETR obtidos normalizados pelo condrito. Dados normalizadores são de McDonough e Sun (1995). Diagramas A e B (DAPGG), C e D (DSMB), E e F (DSMU) e G e H (DSMPN).

O zonamento composicional entre centro e borda é observado em DSMU (Figuras 19C e 19D). O centro é mais enriquecido em ETRs do que a borda. Esta última por sua vez pronuncia dois comportamentos, em que as amostras DSMU-B1 e DSMU-BE1 são mais enriquecidas em todos os elementos menores e traços do que DSMU-B2 e DSMU-BE2. Esta subdivisão também é mais ou menos obedecida quanto às anomalias. Por exemplo, os setores DSMU-B2 e DSMU-BE2 exibem uma anomalia negativa mais acentuada de P do que as outras duas amostras de borda (DSMU-B1 e DSMU-BE1).

O corpo DSMPN se destaca, entre os diques, pela maior fração mássica de ETRs do Sm ao Lu (Figuras 17G e 17H). O comportamento dos outros elementos é concordante com o apresentado pelos outros corpos. A anomalia negativa de Zr é acentuada, porém as positivas de Ba e Nd e as negativas de Yb, U e P são mais moderadas.

Em DSMB, a borda é ligeiramente mais enriquecida em ETRs pesados, U, Ti e P e empobrecida em Ba do que o setor central (Figuras 17B e 17C). Ambas as regiões mostram anomalia negativa de Sm em relação ao manto primitivo e expressiva anomalia positivas de Ba e negativas de Th e U. Entre os corpos estudados, este dique exibe de forma mais pronunciada as anomalias negativas e positivas citadas.

Comparação da distribuição de elementos maiores, menores e traços entre os diferentes setores de um dique e entre diques também é visualizado nas Figuras 18 e 19. A disparidade de valores de fração mássica dos elementos relativo ao mg# da borda ao centro dos diques é mais reconhecível em DAPGG e DSMB do que em DSMU. Sendo, no geral, nos dois primeiros casos, o maior enriquecimento em ETRs e HFSE nas amostras de borda. Em DSMU, o centro se diferencia mais dos demais setores quanto aos elementos Y, Ni, U, Th e terras raras.

7.3. Descrição química das matrizes obtidas pelos procedimentos de separação por catação e de análise direta

A separação por catação e/ou a análise direta da matriz foi realizada em DAPGG, DSMU e DSMPN. Em DAPGG, não se pôde aplicar tais procedimentos na região central do dique (C1) devido a alta densidade de macrocristais, pois esta característica tornaria a etapa experimental mais laboriosa. Deste modo, a investigação da composição representativa do líquido de DAPGG foi concentrada nas amostras dos setores intermediário e borda e em C2.

Figura 18: Diagramas binários de óxidos de elementos maiores e menores em % m/m versus mg# nos diques DAPGG, DSMPN, DSMBU e DSMB. O mg# foi calculado segundo a expressão $[MgO/(MgO+FeO_i)] \times 100$, com os termos em mol.

Figura 18 (continuação): Diagramas binários de óxidos de elementos maiores e menores em % m/m versus mg# nos diques DAPGG, DSPM, DSMBU e DSMB. O mg# foi calculado segundo a expressão $[MgO/(MgO+FeO_t)] \times 100$, com os termos em mol.

Figura 19: Diagramas binários de elementos traços em ppm versus $mg\#$ nos diques DAPGG, DSMU, DSMB e DSMPN. O $mg\#$ foi calculado segundo a expressão $[MgO/(MgO+FeO)] \times 100$, com os termos em mol.

Figura 19 (continuação): Diagramas binários de elementos traços em ppm versus mg# nos diques DAPGG, DSMU, DSMB e DSMPN. O mg# foi calculado segundo a expressão $[MgO/(MgO+FeO)] \times 100$, com os termos em mol.

Já, em DSMU, o procedimento de catação foi empregado tanto nas amostras de borda quanto na de centro, tendo em vista a matriz de granulação mais fina em todos os setores do dique. Por essa mesma característica, a análise direta foi aplicada somente em amostras de borda, por simplificação. A análise direta da matriz em DSMPN e de DSMB não consiste numa alternativa plausível, pois a granulação mais grossa das matrizes diminuem as chances de realizar uma amostragem por ME e LA-ICP-MS representativa (veja subitem 5.4.3.). Assim, em DSMPN, foi considerada somente a análise do material selecionado por catação manual. Por outro lado, DSMB não apresentou quantidade de amostra suficiente para a seleção de matriz por catação. Neste caso, a alternativa encontrada para o estudo da composição do líquido foi feita por meio da análise da amostra de borda (DSMB-B), já que apresenta uma baixa carga de macrocristais.

A descrição dos dados químicos de matriz obtidos através dos diferentes métodos se torna uma tarefa facilitadora para a avaliação da eficiência dos métodos adotados na determinação da composição do líquido de cada dique. A heterogeneidade mineral e de granulação entre os setores do dique por influenciar nos resultados encontrados. A comparação dos resultados de composição obtidos das análises das matrizes com os de rocha global das respectivas amostras é o ponto de partida para a escolha das análises que devem compor o resultado mais representativo do líquido, e esta discussão é realizada no subitem 9.2..

Os sistemas de classificação adotados para rocha total também foram empregados para a classificação química dos resultados de análises de matriz obtidos pelos métodos de seleção de matriz por catação e da análise direta por ME. Assim, no diagrama TAS (Figura 14), todos os resultados de matriz se situam no campo do tefrito/basanito. As matrizes de DAPGG-BE(ME), DAPGG-BM, DAPGG-IM, DAPGG-C2M, DSMU-B2(ME) e DSMPN-M são classificadas como tefritos e as matrizes DAPGG-B(ME) e DSMU-B1M, DSMU-CM como basanitos. De acordo com o diagrama R1-R2 (Figura 14), são tefritos as análises DAPGG-BM, DAPGG-B(ME), DSMU-B2(ME) e DSMPN. Já DAPGG-BE(ME), DAPGG-IM, DSMU-B1M e DSMU-CM são basanitos e DAPGG-C2M, um ankaratrito. Todas as composições obtidas fazem parte da série das rochas potássicas (Figura 15).

Quanto à norma, as matrizes são *nefelina* (*ne*) e *olivina* (*ol*) normativas. Em DAPGG, a proporção de *diopsídio* (*di*), *ne* e *ol* de DAPGG-C2M e DAPGG-IM são bastante similares entre si. Todavia, tal correspondência não foi observada entre as análises de matriz de DSMU

(Tabela 18 e Tabela 4A - Anexo). Em DAPGG, os valores de *ne* normativa variam de 11,8 a 13,7 %, de *ol* de 5,6 a 6,0 % e de *di* entre 37,1 e 50,7 %. Estes mesmos intervalos para DSMU são, respectivamente, de 13,3 a 17,0 % para *ne*, de 6,2 a 15,6 % para a *ol* e 23,5 a 30,1 % para *di*. DSMPN resultou em 9,3 % de *ne*, 8,8 % de *ol* e 16,4 % de *di*.

A *leucita* (*lc*) aparece em DAPGG-BM (4,9 %), DAPGG-IM (0,6 %), DAPGG-C2M (5,64%) e DSMU- CM (1,3 %). Estes valores são bastante discordantes daqueles calculados para os resultados de rocha total dos respectivos setores, sendo ausente nas composições obtidas por ME.

Os valores normativos dos componentes de feldspatos diferem uns em relação aos outros nas análises de matriz dos diferentes setores de DAPGG. As composições por análise direta apresentam *albita* (*ab*) na norma, porém, nas matrizes separadas por catação, este valor é nulo. O valor de *ab* em DAPGG-BE(ME) é 0,4 % e em DAPGG-B(ME) é 1,8 %. Os valores de *ortoclásio* (*or*) e *anortita* (*an*) são, respectivamente, 14,7 % e 7,4 % para DAPGG-BE(ME), 11,7 % e 0,7 % para DAPGG-BM, 16,1 % e 3,4 % para DAPGG-B(ME), 12,9 % e 0,6 % para DAPGG-IM e 7,3 % e 0,8 % em DAPGG-C2M. Estas diferenças também são apresentadas em DSMU. A porcentagem de *an*, *ab* e *or* (nesta ordem) nos resultados de análise de matriz variaram entre DSMU-B1M (16,9 %; 1,0 %; 14,1 %), DSMU-B2(ME) (22,6 %; 1,6 %; 17,3 %) e DSMU - CM (13,3 %; -; 10,6 %).

Ao contrário da observação feita para os outros minerais normativos, os valores calculados de *magnetita* (*mt*), *ilmenita* (*il*) e *apatita* (*ap*) quase não apresentam discrepâncias de valores entre métodos e entre zonas para as análises de matriz de DAPGG e DMSU. Estes valores variaram nos intervalos 4,4-4,7 % de *mt*, 9,5-10,3% de *il* e 1,9-2,2% de *ap* para DAPGG e nos intervalos 2,9-3,5% de *mt*, 6,9-8,2% de *il* e 2,1-2,6% de *ap*.

É importante notar que ocorre desigualdade entre a porcentagem de minerais máficos normativos entre as matrizes analisadas por ambos os métodos e as composições de rocha total dos setores correspondentes. DAPGG-BE(ME), DAPGG-BM e DAPGG-B(ME) apresentam menor porcentagem de *di* do que DAPGG-B. Em relação ao mineral *ol*, este é menor apenas em DAPGG-BE(ME). Nas outras duas análises, o conteúdo de *ol* é maior do que o valor encontrado em DAPGG-B. A variação da quantidade de *ol* mais *di* resulta na mudança de mg# $[100 \cdot \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO}), \text{molar}]$, sendo o valor inferior ao de DAPGG-B (55,): DAPGG-BE(ME) (52,0), DAPGG-B(ME) (49,0) e DAPGG-BM (52,2). Salienta-se que DAPGG-BE não tem análise de rocha total pelo método de digestão ácida da amostra e análise por ICP-MS, já que constitui

uma faixa bastante delgada próximo à encaixante. Por esse motivo, os resultados de análise total de DAPGG-BE(ME) são, a princípio, comparados aos de DAPGG-B. Em DAPGG-IM e DAPGG-C2M, há a diminuição de *ol*, mas o *di* aumenta em relação a DAPGG-I e DAPGG-C2. Ainda nestes casos, o valor de mg# das análises de matriz também diminui.

A variação de *di* ocorre com o aumento em DSMU-CM (30,1 %) e com diminuição em DSMU-B1M (28,2 %) e DSMU-B2(ME) (23,5 %) ao se comparar tais resultados a DSMU-C (28,5 %), DSMU-B1 (28,5 %), DSMU-B2(ME) (26,7 %). Já a *ol* diminui consideravelmente em DSMU-B2(ME), muito pouco em DSMU-CM e aumenta em DSMU-B1M. Por sua vez, o mg# sofre mudanças significativas apenas em DSMU-B2(ME), que varia de 69,2 (DSMU-B2) a 55,0 na matriz.

Das matrizes analisadas, houve o aumento dos minerais normativos *an*, *ab* e *or* em relação às composições de rocha total. Isso se deve ao aumento de Al₂O₃ e SiO₂ provocado pela retirada do material analisado de fases máficas como macrocristais olivina e clinopiroxênio. Exceção a este comportamento é notada para DSMU-B1M e DSMU-CM.

Em DSMPN-M, *ol* e *di* diminuem referente a DSMPN. O mg# assim acompanha com decréscimo de 43,1 para 41,3. Há conjuntamente o aumento da quantidade de *an*, *ab* e *or*.

Variações dos elementos compatíveis Cr, Ni e Co entre as composições da matriz e da rocha original foram observadas. As análises químicas nas matrizes DAPGG obtidas pelos dois métodos (análise direta e separação de matriz por catação) mostram que os procedimentos aplicados resultaram no empobrecimento destes três elementos em comparação à rocha original (Tabela 18). Ressalva é feita para DAPGG-BE(ME) se correlacionada com DAPGG-B, já que o Cr é encontrado mais concentrado no material matricial analisado por microsonda. Em DSMU, apenas Cr e Ni em DSMU-B1M e Cr em DSMU-C1M foram enriquecidos no material de catação em relação à composição original. Nas análises restantes para DSMU, Cr, Ni e Co seguiram o mesmo padrão de DAPGG. Já o material obtido por catação de DSMPN obteve resultado bastante similar ao do material original, uma vez que a quantidade de mega e macrocristais é bem restrita neste corpo.

O aumento ou diminuição da soma de elementos terras raras, Σ ETRs, nas matrizes em relação à composição de rocha total não seguiu um padrão e variou de amostra para amostra. DAPGG-BE(ME) teve a diminuição de 0,50 % e DAPGG-BM teve o aumento de 6,3 % comparativamente a DAPGG-B. Todavia, DAPGG-B(BE) mostrou o empobrecimento destes elementos em 12,2 %. DAPGG-IM exibiu o aumento no somatório em 3,7 % da composição de

DAPGG-I. Em DAPGG-C2M, obteve-se um valor 24,2 % menor do que em DAPGG-C2. DSMU-B1M é 3,8 % mais enriquecido em ETRs do que DSMU-B1. Já DSMU-B2(ME) indica que o enriquecimento foi de 10,2 % em relação ao DSMU-B2. Em DSMU-CM, obteve-se o empobrecimento em ETRs de 1,5 % em comparação a DSMU-C. Por último, o resultado de DSMPN-M foi 1,2 % mais rico em ETRs do que DSMPN.

Nos diagramas das Figura 20, observa-se os padrões de distribuição e enriquecimento de elementos incompatíveis normalizados pela média composicional do manto (pirolito) e pelo condrito para as matrizes obtidas (McDonough e Sun, 1995). As anomalias negativas em DAPGG-C2M de Th, U são ligeiramente menores que em DAPGG- C2 e se nota um leve enriquecimento nos elementos Nb, Ta, La e Ce. Um comportamento similar é visto entre DAPGG-IM e DAPGG-I, porém os elementos Tm e Yb estão um pouco mais enriquecidos em DAPGG-IM do que em DAPGG-I. Entre as análises de matriz de DAPGG-B, há uma maior heterogeneidade. O grau das anomalias e de enriquecimento é mais variado em relação ao do manto primitivo para os elementos Rb, Th, U, Nb, Ta, La, Ce, Pr, Dy, Y, Yb e Lu. Neste caso, foi observado também que as composições de matriz ora se tornam mais empobrecidas, ora se tornam mais enriquecidas nos elementos do que de DAPGG-B. Por exemplo, a composição de rocha total apresenta a anomalia negativa de Ti mais acentuada que as obtidas nas análises das matrizes (DAPGG- BM, DAPGG- B(ME) e DAPGG- BE)), que são coincidentes entre si. A partir do diagrama de distribuição de ETRs (Figura 20), a análise mais enriquecida nestes elementos é a de DAPGG-BE(ME) e a mais empobrecida é a de DAPGG-BM. A composição de DAPGG-B se comporta de forma mais similar aos ETRs leves da matriz DAPGG-B(ME) e aos ETRs pesados de DAPGG-BM.

DSMU-CM se mostra menos enriquecido nos elementos U, Ta e Er (Figura 20) do que DSMU-C. DSMU-B1M é mais depletado nos elementos U, Ta, Sr, P, Yb, Ti e Yb quando comparado a DSMU-B1. Das matrizes analisadas em DSMU, a matriz DSMU-B2(ME) é a mais diferenciada da respectiva análise de rocha total. A matriz DSMU-B2(ME) é mais rica nos elementos incompatíveis do que DSMU-B2, de um modo geral.

Os elementos traços de DSMPN-M exibem comportamento semelhante dos elementos de DSMPN (Figura 20). Todavia, algumas exceções merecem ser citadas: a anomalia de Zr é menos acentuada em DSMPN-M e, nesta mesma amostra, há o enriquecimento dos ETRs pesados Tm, Yb e Lu em relação a DSMPN.

A discussão sobre as diferenças entre os resultados das análises de uma mesma matriz em relação à composição referencial (química de rocha total) assim como a composição representativa do líquido, obtida por meio da análise da matriz, são realizadas no item 9.2..

Figura 20: Diagrama de elementos traços normalizados de análise de matriz e dados normalizados da rocha de partida. (A, C, E) Valores experimentais de fração mássica de elementos traços incompatíveis normalizados pelos respectivos valores no manto primitivo (pirolito). (B, D, F) Valores de fração mássica de ETR obtidos normalizados pelo condrito. Dados normalizadores são de McDonough e Sun (1995). Diagramas A e B (DAPGG), C e D (DSMU) e E e F (DSMPN).

8. Química mineral de olivina e clinopiroxênio

8.1. Introdução

Entre os macro e megacristais presentes em rochas básicas de tendência alcalina, de modo geral, o clinopiroxênio pode ocorrer como fase mais abundante e a olivina, por sua vez, é o primeiro mineral silicático a se formar do magma progenitor gerado no manto. Por esse motivo, o estudo mineralógico da olivina e/ou do clinopiroxênio de uma dada rocha é uma das alternativas que permite limitar as variações físico-químicas pelas quais o sistema passou, possivelmente, desde o início da cristalização destes cristais no magma até a consolidação da rocha.

A olivina não incorpora a maioria dos elementos traços de forma que seja detectável quantitativamente por técnicas analíticas comumente disponíveis. Embora tenha essa característica, há estudos que mostram a importância da investigação de elementos tais como Ni, Ca, Mn e Li na sua estrutura para o entendimento da composição do magma fonte (Sobolev *et al.*, 2007; Foley *et al.*, 2013).

Apesar de alguns minerais acessórios como perovskita e apatita terem um papel importante na incorporação de elementos incompatíveis nas etapas iniciais da diferenciação de magmas básicos a ultrabásicos, os clinopiroxênios, entre os minerais formadores de rochas, também são considerados um dos principais repositórios de tais elementos (Arzamastsev *et al.*, 2009). Além disso, os clinopiroxênios se destacam por apresentarem amplo campo de estabilidade no manto superior e crosta (Green e Ringwood, 1967; Gallahan e Nielsen *et al.*, 1992; Thompson e Malpas, 2000) e por isso é intensificada a sua relevância como registro das diferentes etapas de evolução magmática.

Dado o papel relevante da mineralogia de clinopiroxênio e olivina no estudo petrológico, o desenvolvimento do tema partição de elementos entre estes cristais e o magma é muito bem contextualizado e sua importância evidenciada. Assim, este capítulo é destinado à classificação e descrição química dos cristais de olivina e/ou o clinopiroxênio presentes em DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB com intuito de subsidiar as discussões realizadas a cerca do tema principal no Capítulo 9.

8.2. DAPGG

Em DAPGG, para o estudo de partição de elementos traços entre fases coexistentes, são alvo desta investigação os cristais de clinopiroxênio. Os cristais de olivina, também constituintes deste dique, apresentam-se bastante alterados e, em alguns casos, apenas com núcleo requilizar. Por isso, os dados químicos da olivina de DAPGG não são trabalhados neste texto.

8.2.1. Clinopiroxênio

São distinguidas duas frações granulométricas de clinopiroxênio em DAPGG, que são indicadas no texto por macrocristais e microcristais (veja Capítulo 6). Alguns cristais de clinopiroxênio de 0,7 e 0,8 mm de DAPGG, apesar de serem macrocristais, tem seus dados químicos tratados juntos aos dos microcristais, pois também apresentam formas e feições texturais com os demais componentes da matriz bastante semelhantes aos dos microcristais.

8.2.1.1. Classificação química de clinopiroxênio e soluções sólidas

Tanto macrocristais quanto microcristais apresentam zonamento composicional concêntrico. A complexidade da disposição e o número de zonas variam de grão para grão. Deste modo, são estabelecidos nomes para identificação dessas diferentes zonas utilizadas nas descrições e discussões que se procedem. Regiões centrais e euédricas que, geralmente, perfazem maior parte do grão são chamadas de centro (c). Os locais de zonamento mais complexos, que antecedem a borda (b), são denominadas zonas intermediárias (i). Estas zonas estão exemplificadas na Figura 21.

Segundo o sistema de classificação de Morimoto *et al.* (1988), os cristais de clinopiroxênio em DPAGG são considerados cálcicos. A composição dos cristais está inserida no campo de solução sólida do diopsídio-hedenbergita (Di-Hd) (Figura 22), de modo que o maior teor molecular de Hd se encontra nas bordas dos cristais. Assim, as porcentagens moleculares estão inseridas no intervalo de 42,2 a 48,9% para Wo, de 25,8 a 45,9% para En e de 6,9 a 29,6 % para Fs ($\text{En}_{25,8-45,9}\text{Wo}_{42,2-48,9}\text{Fs}_{6,9-29,6}$).

Na Figura 23, são indicadas tendências de evolução composicional de clinopiroxênio de séries alcalinas de diferentes complexos (Barbieri *et al.*, 1987). Os dados de DAPGG estão

Figura 21: Denominações e identificações por textura de zonas em cristais de clinopiroxênio de DAPGG com zonamento concêntrico. As siglas c, i e b na fotomicrografia produzida por MEV indicam centro, intermediário, borda, respectivamente. As zonas internas são limitas por linhas pontilhadas.

Figura 22 : Diagrama de classificação de piroxênio cálcico ferromagnesiano de DAPGG por Morimoto *et al.* (1988), onde $\text{Ca} + \text{Mg} + (\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}) = 100\%$, sendo Ca equivalente a Wo, Mg a En e $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}$ a Fs, em apfu. Na legenda, b é a borda, i é a região intermediária e c é o centro.

localizados nas regiões do diagrama cujos cristais de clinopiroxênio são provenientes das rochas mais primitivas das séries. Esses cristais de clinopiroxênio são mais ricos no componente Di, representado pelo eixo do Mg em apfu normalizado. São mais empobrecidos em Hd relativamente ao componente Di e apresentam baixo teor de piroxênio sódico (egirina-Ae e jadeíta - Jd).

De forma a visualizar a relação da ocupação do sítio M1 nos cristais de clinopiroxênio de DAPGG com as séries de soluções sólidas, a Figura 24 é apresentada. Há o alinhamento dos dados e se observa que do centro à borda dos cristais há o enriquecimento dos teores moleculares de Ae, Hd e da componente de Tschermak cálcica em detrimento do diopsídio, que é o principal componente para todos os casos.

8.2.1.2. Composição química de elementos maiores e menores em clinopiroxênio

A variação da composição química de elementos maiores e menores dos cristais de clinopiroxênio é representada por meio dos diagramas de binários (proporção catiônica em apfu *versus* $mg\#_{cpx}$) na Figura 25. Nestes diagramas, os valores são totais, ou seja, não há distinção entre íons que integram sítios diferentes como, por exemplo, o Fe^{2+} (M2 e M1), porém são identificados valores correspondentes às zonas centro, intermediário e borda e aos micro e macrocristais. O $mg\#_{cpx}$ foi calculado de acordo com a expressão $[Mg / (Mg + Fe^{2+}_{total})] \times 100$, com os termos em apfu.

Nota-se que os valores de análise de borda se agrupam na região do diagrama oposta da do conjunto de dados de centro, podendo haver sobreposição de parte dos dois conjuntos de dados. Os dados das regiões intermediárias dos cristais se alocam entre os outros dois grandes grupos de dados. Nota-se, por meio dos diagramas, que há uma relação linear entre os cátions dos elementos Si, Ti, Al, Mn, Na e Fe, seja este último na forma de Fe^{3+} ou Fe^{2+} , e o $mg\#_{cpx}$.

No geral, as bordas dos grãos são mais empobrecidas em Si^{4+} do que o centro dos cristais. O valor composicional encontrado nos grãos de clinopiroxênio de DAPGG está inserido no intervalo entre 1,766 e 1,960 apfu. Observa-se que há sobreposição dos intervalos de valores dos setores borda, intermediário e centro e também de valores entre zonas de cristais com granulação diferente (micro e macrocristais). Esta sobreposição se estende aos outros elementos representados na Figura 25.

Figura 23: Diagrama ternário Mg - Na - ($\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} - \text{Na} + \text{Mn}$), onde constam dados de clinopiroxênio de DAPGG. São indicadas tendências composicionais de clinopiroxênio dentro de algumas séries de rochas alcalinas pertencentes às seguintes localidades: A=Morotu; B=Uganda; C=Itapirapuã; D= Iron Hill; E= South Qôroq Centre. Diagrama retirado de Barbieri *et al.* (1987).

Figura 24: Diagrama de $\text{Fe}^{3+} + \text{Ti}^{4+} + \text{Al}^{3+}$ no sítio M1 e em apfu versus Mg^{2+} em M1 de clinopiroxênios de DAPGG. Destaca-se a proporção de membros finais em função da ocupação catiônica em M1. Veja legenda da Figura 23.

Figura 25: Diagrama binário de elementos maiores e menores de clinopiroxênio de DAPGG em apfu versus $mg\#_{cpx}$. O $mg\#_{cpx}$ foi calculado na forma $[(Mg)/(Mg+Fe^{2+})] \times 100$, com os termos em apfu.

O Ti^{4+} está mais presente nas bordas dos grãos do que no centro, embora haja ampla dispersão de valores e zonas de sobreposição. A distribuição compreende entre 0,020 e 0,109 apfu.

As bordas são também, na média, mais ricas em Al^{3+} do que a região intermediária e do centro, de forma que o valor está entre 0,043 e 0,186 apfu. Os dados de Al^{3+} são mais dispersos para a borda dos microcristais do que para a mesma região dos macrocristais.

As regiões de borda apresentam, na média, quantidades mais elevadas de Fe^{2+} e Fe^{3+} , cujos valores estão entre 0,144 e 0,214 apfu e entre 0,022 e 0,170 apfu, respectivamente.

O Mn^{2+} se mostra mais enriquecido nas bordas dos cristais de clinopiroxênio e está entre 0,003 e 0,007 apfu. O Mg^{2+} , da mesma forma como ocorre para o Si^{4+} , é mais empobrecido na borda. Está compreendido no intervalo de 0,464 a 0,900 apfu. É observado que o elemento com distribuição mais homogênea, com menor diferencial entre bordas, setores intermediários e centros é o Ca (Figura 25G). Este elemento se encontra entre 0,871 e 0,938 apfu predominantemente.

O Cr^{3+} está mais concentrado nas regiões intermediárias e centrais de macrocristais. Os valores alcançados na região central estão entre 0,001 e 0,010 apfu, correspondendo a 92 % dos dados deste setor. Nas demais regiões dos cristais, poucos dados foram obtidos, já que, na maioria das análises, o Cr estava abaixo do limite de quantificação da técnica analítica (Figura 25H).

No geral, as bordas são mais enriquecidas em Na^+ do que o centro dos cristais. O Na^+ está compreendido entre 0,014 e 0,046 apfu nos cristais de clinopiroxênio.

A relação entre $na = \text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})$ e $mg\#_{\text{cpx}} = [(\text{Mg})/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}_{\text{t}})] \times 100$, como termos em apfu, pode ser utilizada para classificar o tipo de zonamento químico em piroxênio (Rock *et al.*, 1994). Nos grãos de clinopiroxênio de DAPGG, o comportamento dos dois parâmetros mostra, no sentido do centro para a borda, que conforme o $mg\#_{\text{cpx}}$ diminui, o na aumenta (Figura 26). De acordo com Rock *et al.* (1994) este é um zonamento do tipo normal, que reflete o processo de cristalização fracionada. Ainda, nos grãos onde há zonamento oscilatório, este é classificado como oscilatório normal.

Figura 26: Diagrama de $na = Na/(Na+Ca)$ versus $mg\# = [(Mg)/(Mg+Fe^{2+})] \times 100$, como termos em apfu. Relação utilizada para classificar o tipo de zonamento químico em clinopiroxênio de DAPGG segundo Rocket *et al.* (1994).

8.2.1.3. Variações catiônicas em clinopiroxênio

As variações lineares entre os elementos encontradas nos diagramas binários (Figura 25) estão relacionadas a trocas catiônicas dos sítios T, M1 e M2. Assim, as substituições acopladas sugeridas em Morimoto *et al.* (1988) são investigadas nos clinopiroxênios de DAPGG. Na Figura 27, são apresentados diagramas que auxiliam na determinação das trocas catiônicas ocorridas dentro dos sítios M1 e M2 a partir da composição padrão para estes sítios, que implica na ocupação de íons com carga 2+. Segundo a fórmula estrutural unitária, entre os íons de elementos maiores e menores com carga diferente de 2+, o Na^+ substitui os íons do tipo R^{2+} (Ca^{2+} , Fe^{2+} e Mn^{2+}) em M2 e, em M1, Fe^{3+} , Al^{3+} , Ti^{4+} e Cr^{3+} substituem os íons R^{2+} (Fe^{2+} e Mg^{2+}) de acordo com a suas proporções catiônicas. Deste modo, observa-se que a entrada de Ti^{4+} e Fe^{3+} em M1 está melhor relacionada com a saída de Mg^{2+} do que de Fe^{2+} no mesmo sítio (Figura 27A - 27F). Já o Al^{3+} em M1 integra poucas zonas e, por isso, o Al^{3+} em M1 é desconsiderado neste estudo das variações catiônicas nos cristais de clinopiroxênio de DAPGG. O Cr^{3+} se concentra mais nas zonas internas dos cristais, mas não se verifica alguma dependência linear entre este íon e o Fe^{2+} e/ou o Mg^{2+} em M1 (Figura 27). Em M2, a entrada do Na^+ está relacionada apenas à saída de Fe^{2+} (Figura 27G-27I). Para os outros íons, a proporção de Na^+ é crescente com a proporção de Mn^{2+} e o Ca^{2+} é praticamente constante em todo o intervalo composicional de Na^+ nos cristais de clinopiroxênio.

Dentro das equações sugeridas de troca catiônica (Morimoto *et al.*, 1988), na alocação de íon Ti^{4+} em M1, é esperada a atuação de um ou dois mecanismo de balanço de carga. Para a entrada de Fe^{3+} ou Cr^{3+} , dois mecanismo são também indicados. Nota-se que para a incorporação de Ti^{4+} em M1, o mecanismo de incorporação de Na^+ em M2 concomitantemente com a incorporação de um íon R^{3+} em T são plausíveis, já que, nos diagramas A e B (Figura 28), há uma relação linear e crescente entre os íons envolvidos. Por sua vez, na incorporação de Fe^{3+} , a entrada de Na^+ em M2 e de Fe^{3+} ou Al^{3+} em T são atuantes, porém há uma dispersão de dados maior no primeiro mecanismo (Figura 28B e 28C). Os diagramas de $\text{Al}^{3+} + \text{Ti}^{4+}$ em T *versus* os valores de Cr^{3+} em M1 ou Na^+ em M2 *versus* Cr^{3+} indicam um comportamento aproximadamente parabólico e com amplitude baixa ($\sim 0,1$ apfu).

Figura 27: Estudo de variações catiônicas de elementos maiores e menores nos sítios M1 e M2 em clinopiroxênio de DAPGG.

8.2.1.4. Elementos traços em clinopiroxênio

Os elementos traços se mostram no geral mais enriquecidos nas bordas, podendo ocorrer alguma sobreposição entre valores de fração mássica de regiões distintas dos cristais. Na Figura 29, o diagrama A corresponde às frações mássicas dos elementos incompatíveis normalizados pelos valores no manto primitivo (pirolito) (Sun e McDonough, 1995). O intervalo de valores indica a variação de 0,06 (para Ba) a 28,5 (para Nd) vezes em relação a este reservatório, sem considerar raras exceções, e mostra as anomalias negativas de Ba, Nb, Eu, Sr, Zr e Y. Os dados de bordas se dispõem mais próximos para Ti, Y e ETRs pesados e são mais dispersos para Rb, Ba, Th, U e Nb. O diagrama B (Figura 29) apresenta as frações mássicas dos ETRs normalizados pelo reservatório condritico (Sun e McDonough, 1995). A forma das curvas é do tipo côncavo para baixo e o enriquecimento varia de 1,8 (para Lu) a 77,5 (para Nd) vezes.

Nos diagramas binários da Figura 30 (elementos traços em ppm *versus* $mg\#_{cpx} = [(Mg)/(Mg+Fe^{2+}_t)] \times 100$), os dados constituem dois grupos principais (borda e centro). Apesar do espalhamento de alguns dados, uma tendência levemente crescente ou decrescente na relação entre $mg\#$ para alguns elementos é notada. Assim, conforme o $mg\#_{cpx}$ diminui dos centros para as bordas, os elementos La, Zr, Hf e Y aumentam.

8.3. DSMU

8.3.1. Olivina

8.3.1.1. Classificação de olivina e composição química de elementos maiores e menores

Os cristais de olivina de DSMU são divididos em micro e macrocristais de acordo com a granulometria. Estes cristais apresentam zonamento químico concêntrico de forma que são distinguidas duas regiões denominadas borda (b) e centro (c) (Figura 31). São cristais com predomínio de forsterita (Fo) em relação à faialita (Fa), com Fo entre 82,6 e 88,1% (Figura 32).

Em proporções catiônicas, o Si^{4+} está entre 0,981 a 1,007 apfu nos cristais de olivina de DSMU e há sobreposição de valores entre os dados dos centros e das bordas dos cristais. O Fe^{2+} está mais concentrado nas bordas do que nos centros e varia de 0,237 a 0,344 apfu.

Figura 28: Estudo variações catiônicas entre os sítios T e M1 em clinopiroxênio de DAPGG.

Figura 29: Diagrama multielementar de fração mássica de elementos traços em clinopiroxênio de DAPGG normalizadas pelos respectivos valores encontrados no manto primitivo (A) e no condrito (B), de acordo com os valores normalizadores de McDonough e Sun (1995).

Figura 30: Diagramas binários dos elementos traços em ppm em clinopiroxênios *versus* $mg\#_{cpx}$ de DAPGG. O $mg\#_{cpx}$ foi calculado segundo a expressão $[(Mg)/(Mg+Fe^{2+})] \times 100$, com termos em apfu.

Figura 31: Localização de zonas em olivina de DSMU por textura em fotomicrografia por microsonda eletrônica - elétron retroespalhado. A letra b indica a borda e c é o centro. As zonas são separadas pela linha pontilhada no cristal.

Figura 32: Solução sólida de forsterita (Mg_2SiO_4), Fo, e faialita (Fe_2SiO_4), Fa, em cristais de olivina de DSMU. No diagrama, são identificados as zonas e os dados de micro e macrocristais.

O Mn^{2+} se apresenta mais concentrado nas bordas do que nos centros e varia de 0,003 a 0,007 apfu (Figura 33A). Por outro lado, os centros são mais enriquecidos em Mg^{2+} do que as regiões de borda (Figura 33) e a proporção deste elemento está entre 1,636 e 1,772 apfu.

O Ca^{2+} está compreendido no intervalo de 0,003 a 0,014 apfu e sua proporção é crescente dos centros para as bordas dos cristais de olivina (Figura 33B). Já a proporção catiônica de Ni^{2+} está entre 0,002 e 0,007 apfu e é decrescente em direção às bordas (Figura 33C).

8.3.1.2. Variações catiônicas em olivina

A partir da composição de elementos maiores e da distribuição catiônica entre os sítios T e M em apfu, foram verificadas as possíveis variações catiônicas nas olivina de DSMU no decorrer a sua cristalização. Na Figura 34, são apresentados os diagramas binários em que os dados de elementos maiores e alguns menores em apfu.

O íon Mg^{2+} apresenta relações importantes com os íons Mn^{2+} , Ca^{2+} , Ni^{2+} e Fe^{2+} (Figuras 33A-33C e 34A). Conforme o Mg^{2+} diminui em direção à borda, há o aumento no sítio M de Ca^{2+} , Mn^{2+} e Fe^{2+} e o decréscimo de Ni^{2+} . O coeficiente angular de Fe^{2+} versus Mg^{2+} de -0,77 indica que o decréscimo de Mg^{2+} pode estar diretamente relacionado ao aumento de Fe^{2+} em M (Figura 34A). Por outro lado, a quantidade de Ni^{2+} que decresce do centro para a borda não é o suficiente para permitir a incorporação total de $Ca^{2+} + Mn^{2+}$. De acordo com a regressão linear de Ni^{2+} versus $Ca^{2+} + Mn^{2+}$ (Figura 34B), o coeficiente angular expressa que, aproximadamente, 40% do $Ca^{2+} + Mn^{2+}$ que foi incorporado pelo cristal pode ter sido por troca catiônica com o Ni^{2+} .

8.3.1.3. Elementos traços em olivina

A descrição dos elementos traços em olivina se limitou aos elementos detectados acima do limite de quantificação do LA-ICP-MS (Cr, Co, Zn, Na, P, V, Ti, Sc e Cu). Ainda que,

Figura 33: Diagramas binários da proporção catiônica de Mn^{2+} (A), Ca^{2+} (B) e Ni^{2+} (C) em apfu de olivinas de DSMU versus $mg\#_{ol}$, sendo que $mg\#_{ol}$ é igual a $[Mg / (Mg + Fe^{2+}_t)] \times 100$, com os termos em apfu.

Figura 34: Diagramas binários em apfu que representam as variações catiônicas, A) Fe^{2+} x Mg^{2+} e B) Ni^{2+} x $\text{Ca}^{2+} + \text{Mn}^{2+}$, nos cristais de olivina de DSMU. O coef. ang. é o coeficiente angular da curva de regressão linear dos pontos experimentais e r^2 é o coeficiente de determinação.

em algumas análises, foram detectados Li, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, ETRs e Hf de forma a atender a especificação acima, estes elementos não entram nesta descrição, pois aparecem em um número bastante restrito de análises. No entanto, estes dados são apresentados na Tabela 7A (Anexo).

Os valores de fração mássica em ppm dos elementos traços Cr, Co, Zn, Na, P, V, Ti, Sc e Cu e dos menores Mn e Ni normalizados pelos respectivos valores encontrados no manto primitivo (McDonough e Sun, 1995) se encontram representados na Figura 35. Observa-se que os cristais de olivina de DSMU são de 1 a 3 vezes mais enriquecidas nos elementos Mn, Co, Zn e P do que o manto primitivo. Em relação ao Ni, a razão é maior que 1, não alcançando 2, para o centro dos cristais, mas menor que 1 para as bordas. Já os elementos Cr, Na, V, Ti, Sc, e Cu estão mais empobrecidos nos cristais de olivina relativamente ao manto primitivo numa ordem de 10^{-2} a 10^{-1} vezes.

Na Figura 36, são apresentados diagramas binários de elementos Cr, Co, Zn, Na, V, Ti, Sc e Cu *versus* $mg\#_{ol}$. Dados de fração mássica de bordas e de centros estão separados em função do $mg\#_{ol}$. É nítido que, nos centros, para dados com $mg\#_{ol}$ bastante próximos ($\sim 87,8$), há uma variação de composição dos elementos traços, isto é, não são coincidentes, principalmente, para Co, Cu, Zn e P. Já os elementos traços na borda se mostram mais dispersos e estão no intervalo de $mg\#_{ol}$ entre 84 e 86. Inferir se há o aumento ou a diminuição de fração mássica dos elementos traços dos cristais de olivina de DSMU dos centros em direção às bordas se torna uma tarefa difícil devido à sobreposição dos intervalos composicionais de ambas as zonas. Apenas é possível verificar que as bordas estão mais enriquecida em Sc e Ti e mais empobrecida em V do que os centros.

8.3.2. Clinopiroxênio

Os cristais de piroxênio de DSMU são zonados concêntrica e setorialmente. Por se tratarem de micro a macrocristais de no máximo 0,5 mm de comprimento, as análises pontuais por LA-ICP-MS foram realizadas apenas nas regiões centrais dos cristais (Figura 37).

8.3.2.1. Classificação química de clinopiroxênio e soluções sólidas

Os cristais de clinopiroxênios de DSMU são cálcicos e situam no campo de solução sólida do Di-Hd do diagrama de classificação En-Wo-Fs (Figura 38) (Morimoto *et al.*, 1988). A

Figura 35: Valores dos elementos menores (Mn, Ni e Ca) e traços (Cr, Co, Zn, Na, P, V, Ti, Sc, Cu) normalizados pelos respectivos valores no manto primitivo (McDonough e Sun, 1995) nas olivinas de DSMU.

Figura 36: Diagramas binários da fração mássica de elementos traços (Cr, Co, Zn, Cu, Na, P, V, Ti, Sc) em ppm *versus* $mg\#_{ol}$ dos cristais de olivina de DSMU. O $mg\#_{ol}$ foi calculado segundo a expressão $[Mg / (Mg + Fe^{2+})] \times 100$, com os termos em apfu.

Figura 37: Grãos de clinopiroxênio de DSMU. As regiões centrais dos cristais, c, são limitados por linha pontilhada branca. A borda, b, é indicada por seta.

Figura 38: Diagrama de classificação dos cristais de piroxênios cálcicos ferromagnesianos de DSMU. Tem-se que $\text{Ca} + \text{Mg} + (\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}) = 100\%$, sendo Ca equivalente a Wo, Mg a En e $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}$ a Fs. Na legenda, b é borda e c é o centro.

variação da proporção molecular destes membros finais é $\text{En}_{33,1-42,6}\text{Wo}_{46,9-52,0}\text{Fs}_{11,7-13,9}$. Nas zonas centrais, o intervalo constatado é de $\text{En}_{33,1-42,7}\text{Wo}_{47,5-51,4}\text{Fs}_{10,3-16,2}$ e, nas bordas, é de $\text{En}_{34,1-38,9}\text{Wo}_{47,9-52,0}\text{Fs}_{13,2-13,9}$.

Na Figura 39, é possível visualizar o posicionamento dos dados dos cristais de clinopiroxênio de DSMU frente à tendência composicional dos clinopiroxênios de algumas séries alcalinas de diferentes complexos. A composição dos clinopiroxênios de DSMU referentes a $\text{Mg-Na-Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}-\text{Na}+\text{Mn}$ é compatível com os cristais formados no início das séries. Este diagrama também permite inferir parte do que já foi observado na Figura 48. São mais ricos em Di pela proporção relativa de Mg e, em relação a este último, mais empobrecidos $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}$, o que remete a Hd. Por último, esses clinopiroxênios apresentam baixa proporção molecular de piroxênios sódicos (Ae/Jd).

A ocupação catiônica em M1 e a sua influência na proporção de membros finais Ae, componente de Tschermak cálcica, Hd e Di são representadas na Figura 40, com o diagrama de $\text{Fe}^{3+} \text{ M1} + \text{Ti}^{4+} \text{ M1} + \text{Al}^{3+} \text{ M1}$ versus $\text{Mg}^{2+} \text{ M1}$ em apfu. É mostrada a tendência da composição do centro para borda de micro e macrocristais, no qual se progride, nesta ordem, para composições com maior proporção molecular Hd, componente de Tschermak cálcica e Ae em detrimento do Di.

8.3.2.2. Composição química de elementos maiores e menores em clinopiroxênio

Nos diagramas da Figura 41 (elementos maiores e menores versus $\text{mg\#}_{\text{cpx}} [(\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}_{\text{t}})]*100$ em apfu, nota-se que há uma sobreposição parcial de valores das análises de borda e de centro. Os valores de $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$ estão entre 68,6 e 75,2 nas bordas e entre 67,4 e 80,6 nos centros. São observadas também tendências lineares da proporção catiônica de Si^{4+} , Ti^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} e Na^{+} em função do $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$.

Em relação os Si^{4+} , no geral, as bordas alcançam valores mais baixos do que os centros, porém há valores coincidentes entre as duas zonas. O intervalo composicional do Si^{4+} está entre 1,538 e 1,830 apfu. Para o Ti^{4+} , há o aumento da proporção catiônica conforme o $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$ diminui e os dados de borda fazem parte do intervalo dos valores mais elevados de Ti^{4+} , junto a alguns dados do centro. O intervalo composicional do Ti^{4+} nos clinopiroxênio de DSMU compreende de 0,065 a 0,161 apfu. Os teores de Al^{3+} estão entre 0,193 e 0,498 apfu e aumenta à medida que o valores de $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$ diminuem.

Figura 39: Diagrama ternário Mg - Na - ($\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} - \text{Na} + \text{Mn}$), onde constam dados de clinopiroxênio de DSMU. As tendências composicionais de clinopiroxênio dentro da evolução de magmas alcalinos pertencem às rochas alcalinas das seguintes localidades: A=Morotu; B=Uganda; C=Itapirapuã; D= Iron Hill; E= South Qôroq Centre . Diagrama retirado de Barbieri *et al.* (1987).

Figura 40: Diagrama de $\text{Fe}^{3+} + \text{Ti}^{4+} + \text{Al}^{3+}$ no sítio M1 *versus* Mg^{2+} no sítio M1 em apfu nos clinopiroxênios de DSMU. Destaca-se a proporção de membros finais em função da ocupação catiônica em M1.

Figura 41: Diagrama binário de elementos maiores e menores em clinopiroxênios de DSMU em apfu versus $mg\#_{cpx}$. O $mg\#_{cpx}$ foi calculado na forma $[(Mg)/(Mg + Fe^{2+})] \times 100$, com os termos em apfu. Os dados iguais a zero são resultados que ficaram abaixo do limite de quantificação da técnica analítica.

O intervalo composicional de Fe^{2+} nas bordas é mais amplo do que o apresentado nos centros dos cristais de clinopiroxênio. Os valores de Fe^{2+} na borda variam de 0,123 a 0,201 apfu e, no centro, de 0,136 a 0,182 apfu. A proporção catiônica do Fe^{3+} aumenta com a diminuição do $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$ e está entre 0,025 e 0,129 apfu.

Para o Mn^{2+} , não é observado algum padrão de variação da proporção catiônica em função do $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$ e os valores fazem parte do intervalo de 0,002 a 0,005 apfu. Os valores de Ca^{2+} também estão bastante dispersos em função do $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$ e fazem parte do intervalo de 0,870 a 0,914 apfu.

O Cr^{3+} atinge a valor máximo de 0,013, porém se encontra abaixo do limite de quantificação em 31,7 % das análises realizadas. Os valores de Cr^{3+} obtidos variam de <0,01 a 0,013 apfu. Já a proporção de Na^{+} conforme o $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$ diminui e os valores estão entre 0,023 a 0,048 apfu.

O tipo zonamento químico no clinopiroxênio de DSMU é investigado na Figura 42. O $na = [\text{Na}/(\text{Na}+\text{Ca})]$ que aumenta enquanto o $\text{mg\#} = [(\text{Mg})/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}_{\text{t}})] \times 100$ diminui em direção à borda indica que o zonamento é do tipo normal de acordo com Rock *et al.* (1994).

8.3.2.3. Variações catiônicas em clinopiroxênio

Com objetivo de investigar os possíveis mecanismos da variação catiônica nos cristais de clinopiroxênio de DSMU, inicialmente, foram verificadas as trocas ocorridas em cada sítio (M2, M1 e T) ao longo do processo de cristalização. Na Figura 43, são apresentados diagramas binários nos quais se observa que, em M1, o enriquecimento de Al^{3+} , Ti^{4+} e Fe^{3+} é concomitante à diminuição de Mg^{2+} deste mesmo sítio. Os diagramas Al^{3+} , Ti^{4+} e Fe^{3+} versus Fe^{2+} em M1 não mostram dependência entre os primeiros íons e o Fe^{3+} quanto à ocupação em M1. Apesar de alguns dados de fração mássica de Cr^{3+} estarem abaixo do limite de quantificação (Figura 43), os demais dados mostram que o Cr^{3+} diminui conforme o Mg^{2+} em M1 também diminui, todavia são notadas duas tendências: uma para a borda e outra para o centro. O Fe^{2+} e o Mg^{2+} em M1 apresentam comportamentos inversamente proporcionais, mas o coeficiente de determinação, r^2 , do diagrama $\text{Mg}^{2+}\text{M1}$ versus $\text{Fe}^{2+}\text{M1}$ é baixo (0,14) e o coeficiente angular é muito menor que -1.

Em M2, a proporção de Na^{+} apresenta uma correlação linear com a do Ca^{2+} , no qual ambas aumentam as suas dos centros para as bordas dos cristais. No entanto, as quantidades

Figura 42: Diagrama de $na = Na/(Na+Ca)$ versus $mg\# = [(Mg)/(Mg+Fe^{2+})] \times 100$, com os termos em apfu. Relação utilizada para classificar o tipo de zonamento químico em clinopiroxênio de DSMU segundo Rock *et al.* (1994).

Figura 43: Estudo de variações catiônicas em clinopiroxênio de DSMU entre cátions de elementos maiores e menores nos sítios M1 e M2.

de Na^+ e Ca^{2+} são inversamente proporcionais as de Fe^{2+} em M2. Os dados de Mn^{2+} , por sua vez, apresentam certo grau de espalhamento, sem mostrar alguma dependência com os dados de Na^+ em M2.

Em T, a relação é linear e inversamente proporcional entre Al^{3+} e Si^{4+} . A tendência observada é que há o aumento de Al^{3+} dos centros para as bordas conforme o Si^{4+} diminui.

A incorporação de íons com carga diferente de 2+ em M1 e M2 exige mecanismos que permitam o balanço da carga da estrutura cristalina. Dos mecanismos de troca catiônica apresentados em Morimoto *et al.* (1988), foram verificadas as atuações da incorporação de Al^{3+} em T e de Na^+ em M2 que justificassem a entrada de Ti^{4+} em M1. A alocação de Na^+ em M2 contribui para o balanço de carga de Ti^{4+} em M1, mas é a entrada de Al^{3+} em T que gera uma resposta mais linear (Al^{3+}T versus Ti^{4+} M1 – Figura 44). Já a variação do Cr^{3+} não mostrou ser sustentada por nenhum dos mecanismos propostos (Figura 44). Na incorporação de Al^{3+} e Fe^{3+} em M1, os dois mecanismos parecem contribuir para balanço, mas o r^2 mais próximos de 1 foi atingido nas relações de $\text{Na}^+\text{M2}$ versus Al^{3+} M1 e de Al^{3+}T versus Fe^{3+} M1.

8.3.2.4. Elementos traços em clinopiroxênio

Os resultados das análises químicas de elementos traços foram normalizados pelos valores dos elementos correspondentes no manto primitivo e no condrito, de acordo com a Figura 48. Em ambos os diagramas, a disposição dos dados forma uma curva do tipo parábola com concavidade para baixo. O ponto de máximo da curva ocorre aproximadamente no Nd (Figura 45A), quando normalizado pelo manto primitivo e, no Ce, pelo condrito (Figura 45B).

Observa-se que o Ba é o único elemento representado que, em algumas análises, está mais empobrecido no cristal comparativamente ao manto primitivo. Neste caso, o grau de enriquecimento/empobrecimento dos elementos varia de 0,1 (Ba) a 57 (Nd) vezes, com maioria acima de 10 vezes. Anomalias negativas de Sr e Ti são ressaltadas em todos os dados obtidos para clinopiroxênio de DSMU (Figura 45). No diagrama dos valores de fração mássica dos ETRs normalizados pelo condrito, o enriquecimento mínimo foi de 7 vezes para o Lu e 158 vezes para o Ce.

Figura 44: Estudo de variações catiônicas entre os sítios T e M1 em clinopiroxênios de DSMU. Nos diagramas, os cátions estão em apfu.

Figura 45: Diagrama multielementar de fração mássica de elementos traços em clinopiroxênio de DSMU normalizadas pelos respectivos valores encontrados no manto primitivo (A) e no condrito (B), de acordo com os valores de McDonough e Sun (1995).

8.4. DSMPN

Na amostra de DSMPN, não foram observados cristais de olivina, portanto o estudo mineralógico para este dique se concentrou apenas nos cristais de clinopiroxênio.

8.4.1. Clinopiroxênio

8.4.1.1. Classificação química de clinopiroxênio e soluções sólidas

Foram analisadas regiões de centro e de borda de 4 cristais de piroxênio de DSMPN. Zonas setoriais foram identificadas como centro 1 (c1) e centro 2 (c2). Cada zona dos cristais cpx 3, 4, 5 e 3' é identificada individualmente nos diagramas que se seguem.

Os dados de piroxênio de DSMPN estão apresentados na Figura 46 e são classificados segundo Morimoto *et al.* (1988). Os cristais são clinopiroxênios cálcicos e se situam no campo de solução sólida do Di-Hd, sendo que a proporção dos membros finais varia dentro dos intervalos: $\text{En}_{33,9-43,9}\text{Wo}_{47,0-49,0}\text{Fs}_{9,4-18,0}$.

Na Figura 47, é apresentada a tendência evolutiva de cristais clinopiroxênios em séries alcalinas de diferentes localidades. Os cristais de DSMPN são comparáveis aos cristais das rochas mais primitivas das séries. São mais ricos no componente Di do que em clinopiroxênios sódicos e Hd. A proporção molecular de membros finais e a ocupação catiônica em M1 estão relacionadas na Figura 48 e indica o Di como principal componente, com substituições de componente de Tschermak cálcica.

8.4.1.2. Composição química de elementos maiores e menores em clinopiroxênio

Os valores de $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$, de acordo com a expressão $[(\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}_{\text{t}})] \times 100$ (com termos em apfu), inserem-se no intervalo de 67,1 a 85,9 nos centros. Na Figura 49, são apresentados diagramas da proporção catiônica de elementos maiores e menores *versus* $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$. Os valores de proporção de Si^{4+} aparecem entre 1,75 a 1,87 apfu. A zona setorial c1 do cristal cpx 4 está mais enriquecida em Ti^{4+} que as demais análises. No geral, o Ti^{4+} está entre 0,038 e 0,102 apfu. Os valores de proporção de Al^{3+} são bastante dispersos em função do $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$ e permeiam o intervalo de 0,171 a 0,304 apfu.

As proporções de Fe^{2+} estão restritas ao intervalo de 0,131 a 0,207 apfu e as do Fe^{3+} estão inseridas no intervalo de 0,012 a 0,099 apfu. Os teores de Mg^{2+} , por sua vez, estão confinados entre 0,626 e 0,827 apfu.

Figura 46: Diagrama de classificação de clinopiroxênio (Morimoto *et al.*, 1988) com dado mineral de clinopiroxênio de DSMPN. Tem-se que $\text{Ca} + \text{Mg} + (\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}) = 100\%$, sendo Ca equivalente a Wo, Mg a En e $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}$ a Fs. Na legenda, b é borda e c é o centro.

Figura 47: Diagrama ternário Mg - Na - ($\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} - \text{Na} + \text{Mn}$), onde constam dados de clinopiroxênio de DSMPN. As tendências composicionais de clinopiroxênio dentro da evolução de magmas alcalinos pertencem às rochas alcalinas das seguintes localidades: A=Morotu; B=Uganda; C=Itapirapuã; D= Iron Hill; E= South Qôroq Centre. Diagrama retirado de Barbieri *et al.* (1987).

Figura 48: Diagrama de $Fe^{3+} + Ti^{4+} + Al^{3+}$ no sítio M1 versus Mg^{2+} em M1 e em apfu de clinopiroxênios de DSMPN. Destaca-se a proporção de membros finais em função da ocupação catiônica em M1.

Figura 49: Diagrama binário de elementos maiores e menores de clinopiroxênios de DSMPN em apfu versus mg#_{cpx}. O mg#_{cpx} foi calculado na forma $[(Mg)/(Mg+Fe^{2+})] \times 100$, com os termos em apfu.

O Mn^{2+} varia entre 0,003 e 0,009 apfu e o Ca^{2+} entre 0,874 e 0,896 apfu. Já o Cr^{3+} se encontra abaixo do limite de quantificação em parte das análises. Todavia, nas análises em que o Cr^{3+} é detectado acima desse limite, a sua proporção está em torno de 0,002 e 0,005 apfu. O Na^+ encontra-se entre 0,022 e 0,083 apfu.

A partir da Figura 49, observa-se que os dados não tendem a se alinhar, a não ser as análises dos cristais cpx 3 e 3' para os cátions Si^{4+} , Ti^{4+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} e Na^+ . Nestes dois cristais, há o empobrecimento de Si^{4+} e Mg^{2+} e o enriquecimento de Fe^{3+} , Ti^{4+} e Na^+ do centro em direção à borda. Os dados das zonas setoriais do cpx 4, centro 1 e centro 2, não coincidem quanto à composição de maiores e menores. Por exemplo, o $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$ médio do centro 2 (c2) é de 73,9 e do centro 1 (c1) é de 67,3. O centro do cpx 5 se assemelha mais, composicionalmente, à análise cpx-3-b2 no que se refere ao Na^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} e Mg^{2+} .

O tipo de zonamento composicional é melhor diagnosticado no cpx 3 (Figura 50), devido à quantidade de análises neste cristal. No diagrama *na versus mg\#_{cpx}*, nas análises do centro em direção à borda de cpx 3, há o aumento da razão *na* e a diminuição de $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$, o que caracteriza um zonamento do tipo normal (Rock *et al.*, 1994).

O zonamento setorial do cristal cpx 4 segue a tendência descrita em Lofgren *et al.* (2006). Os setores {010}, apresentados como c1, são mais ricos em Al e Ti do que os setores adjacentes. Os dois setores também mostram diferenças quanto aos elementos maiores onde a proporção catiônica de Si^{4+} e Mg^{2+} é menor em c1 do que em c2.

8.4.1.3. Variações catiônicas em clinopiroxênio

Na Figura 51, são visualizados diagramas que mostram as variações catiônicas de elementos maiores e menores em apfu nos sítios M1 e M2 dos clinopiroxênios de DSMPN. Nos cristais cpx 3 e cpx 3', o comportamento dos cátions difere daquele observado nos cristais cpx 4 e cpx 5, ou seja, não há alinhamento entre todos os dados apresentados. Nota-se que, numa visão mais geral, há um aumento dos cátions Fe^{3+} e Ti^{4+} em M1 do centro para a borda. Por meio dos diagramas, percebe-se que a diminuição do Mg^{2+} de M1 melhor corresponde ao aumento de Fe^{3+} e Ti^{4+} neste mesmo sítio. Dos diagramas dos cátions Cr^{3+} e Al^{3+} *versus* Mg^{2+} ou Fe^{2+} , não é possível reconhecer de trocas iônicas plausíveis. Já o Na^+ parece ser incorporado em M2 em detrimento do Fe^{2+} , pois para este par há uma resposta inversamente linear mais perceptível do que entre os pares Mn^{2+} e Na^+ , e Ca^{2+} e Na^+ (Figura 51).

Figura 50: Diagrama de $na = Na/(Na+Ca)$ versus $mg\# = [(Mg)/(Mg + Fe^{2+})] \times 100$, com os termos em apfu. Relação utilizada para classificar o tipo de zonamento químico em clinopiroxênio de DSMPN segundo Rock *et al.* (1994).

Figura 51: Estudo de variações catiônicas em clinopiroxênio de DSMPN entre cátions de elementos maiores e menores nos sítios M1 e M2.

Relações de variações catiônicas que justifiquem a alocação crescente de Fe^{3+} e Ti^{4+} nos clinopiroxênios de DSMPN são testadas na Figura 52. É evidente que a entrada de Ti^{4+} em M1 é acompanhada pela entrada de Al^{3+} no sítio T de modo que a neutralidade do cristal seja mantida. Todavia, esta investigação não revela uma conclusão no que diz respeito à variação de Cr^{3+} e Al^{3+} em M1. Os dados de Fe^{3+} estão igualmente dispersos nos diagramas de Al^{3+}T versus $\text{Fe}^{3+}\text{M1}$ e $\text{Na}^+\text{M2}$ versus $\text{Fe}^{3+}\text{M1}$.

8.4.1.4. Elementos traços em clinopiroxênio

Os valores de fração mássica dos elementos Ba, Rb, Nb, Ta, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Zr, Ti, Hf, Eu, Gd, Tb, Dy, Y, Er, Tm, Yb e Lu nos clinopiroxênios estão normalizados pelos respectivos valores no manto primitivo e dos ETRs pelos valores no condrito (Figura 53). Nos dois diagramas, os dados se dispõem formando uma parábola com concavidade para baixo. Em relação ao manto primitivo, a maior variação é de 88 vezes (Hf) e a menor é de 0,02 vezes (Ba). Os elementos Ba, Cs e Rb não foram detectados no cristal cpx 4, mas sim no cpx 3. O U foi determinado apenas em uma das zonas do cristal cpx 4. Observam-se algumas anomalias negativas comuns aos dois cristais: Nb, Sr, Ti. A anomalia negativa de Eu é mais acentuada em uma das zonas setoriais de cpx 4. No diagrama dos ETRs normalizado pelo condrito, o maior enriquecimento é de 198 vezes (Nd) e o menor é de 4 vezes (Lu). O Eu se apresenta com anomalia negativa e é mais proeminente na zona c2 do cristal cpx 4.

Do cristal cpx 3, observa-se que o centro é mais empobrecido nos elementos representados nos diagramas do que a borda do cristal. Da mesma forma, uma das zonas (c1) do cristal cpx 4, mais rica em Al e Ti, é mais rica em elementos traços do que em c2. Os ETRs estão mais enriquecidos nos setores {010} de 1,9 a 7,1 vezes e os elementos Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs e Ba estão de 2,4 a 4,2 vezes.

8.5. DSMB

8.5.1. Olivina

8.5.1.1. Classificação e descrição composicional de elementos maiores e menores

As olivinas de DSMB não são visivelmente zonadas de acordo com imagens de elétrons retroespalhados (Figura 13B). Assim, com o objetivo de se certificar desta observação, as

Figura 52: Estudo de variações catiônicas entre os sítios T e M1 em clinopiroxênios de DSMPN. Os dados estão em apfu.

Figura 53: Diagrama multielementar de frações mássicas de elementos traços em clinopiroxênio de DSMPN normalizadas pelos respectivos valores encontrados no manto primitivo (A) e no condrito (B), de acordo com os valores de McDonough e Sun (1995).

análises realizadas nas regiões centrais dos cristais são identificadas pela letra c e, nas regiões periféricas, pela letra b e comparadas.

As olivinas de DSMB são magnesianas, com conteúdo de Fo entre 75,5 e 76,3%. A proporção de Si^{4+} está entre 0,983 e 0,997 apfu (Figura 54). O Fe^{2+} varia de 0,472 a 0,491 apfu e os valores de Mn^{2+} pertencem ao estreito intervalo de 0,010 a 0,011 apfu. Os valores de proporção catiônica do Ca^{2+} estão entre 0,005 e 0,007 apfu. Finalmente, a presença do Ni^{2+} é heterogênea na olivina, pois, em algumas análises, encontra-se abaixo do limite quantificação da técnica analítica e, em outras, a proporção catiônica está abaixo de 0,001 apfu. Por meio destes dados de composição de elementos maiores e menores, nota-se que não há variações significativas composicionais entre regiões de borda e de centro dos cristais de olivina de DSMB e que os valores de proporção catiônica se inserem num relativo restrito intervalo.

8.5.1.2. *Variações catiônicas em olivina*

Devido ao alto grau de homogeneidade química e ao restrito número de dados químicos dos cristais de olivina de DSMB em relação à quantidade obtida a partir das amostras de DSMU, podem-se inferir poucas e imprecisas relações de variações catiônica de elementos maiores e menores nos sítios dos cristais de olivina. Na Figura 55, são mostradas algumas variações composicionais. No diagrama de Fe^{2+} versus Mg^{2+} , a relação entre as proporções catiônicas dos dois cátions não indica uma relação linear entre os dados. Entre Ca^{2+} versus Mn^{2+} , o coeficiente angular é de -1,16, o que indicaria a interdependência dos dois cátions, mas se nota que as variações são quase desprezíveis destes cátions no cristal de olivina (Figura 55B).

8.5.1.3. *Elementos traços em olivina*

Foram obtidas análises de traço de dois cristais de olivina de DSMB por LA-ICP-MS pelas quais foram caracterizadas borda e centro. Poucos dados de ETRs estiveram acima do limite de quantificação da técnica de LA-ICP-MS e são indicados na Figura 56. O Yb foi o único ETR a ser

Figura 54: Solução sólida de forsterita (Mg_2SiO_4), Fo, e faialita (Fe_2SiO_4), Fa, em cristais de olivina de DSMB. No diagrama, são identificadas as zonas centro e borda.

Figura 55: Estudo de variações catiônica em olivinas de DSMB. Os dados estão em apfu. O coef. ang. é o coeficiente angular da reta de regressão linear dos dados experimentais e r^2 é o coeficiente de determinação desta mesma reta.

Figura 56: Elementos menores e traços de cristais de olivina de DSMB normalizados pelos elementos correspondentes no manto primitivo. Os valores normalizadores são de McDonough e Sun (1995).

detectado de forma consistente em três regiões analisadas. O Cr esteve também abaixo do limite de quantificação da técnica. Já o Mn, Ni, Co, Zn, Na, Ti, V, Sc e Y foram determinados com melhores níveis de confiabilidade, sendo, portanto, utilizados para o estudo de coeficiente de partição. Assim, na Figura 56, são apresentados tais elementos traços normalizados pelos respectivos valores encontrados no manto primitivo (Donough e Sun, 1995). Observa-se que estes elementos se encontram na olivina de 10^{-2} a 50 vezes a fração mássica dos mesmos no manto primitivo. Dos elementos citados, Ni, V, Ti, Ca e Sc são mais enriquecidos nas bordas do que nos centros.

Observa-se que, quanto aos elementos traços apresentados na Figura 56, a distinção química entre bordas e centros não é possível, sendo, portanto, estes cristais considerados quimicamente homogêneos. Entre os elementos maiores também não há uma variação de fração mássica marcante entre bordas e centros, exceto de Fe^{3+} e Si^{4+} . Somado a esta característica, a baixa quantidade de dados químicos de olivina de DSMB não possibilitou uma investigação mais extensa quanto as trocas catiônicas envolvidas entre os sítios M e T.

8.5.2. Clinopiroxênio

As regiões, ou zonas, de micro e macrocristais de piroxênio de DSMB são designados pelos termos borda e borda de sobrecrecimento (b), intermediário (i) e centro (c). A região intermediária se localiza entre borda e centro e, geralmente, é constituído pelo zonamento oscilatório. Essas regiões estão identificadas na Figura 57.

8.5.2.1. Classificação química de clinopiroxênio e soluções sólidas

Os cristais de piroxênio foram classificados por meio do diagrama ternário En-Wo-Fs (Figura 58), de acordo com Morimoto *et al.* (1988). Estes cristais são clinopiroxênio cálcicos e se localizam no campo da solução sólida Di-Hd. Em termos de membros finais representados no diagrama, o intervalo de proporção molecular da borda é $\text{En}_{31,2-44,3}\text{Wo}_{45,3-50,5}\text{Fs}_{12,0-18,3}$. Nota-se, por meio da Figura 58, que as bordas de microcristais tendem a ser mais ricas na componente molecular Hd.

Na Figura 59, é representada, por meio do diagrama ternário Mg-Na-($\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ -Na+Mn), a variação composicional de cristais de clinopiroxênio ao longo de séries alcalinas de diferentes complexos. Neste diagrama, os cristais de clinopiroxênio de DSMB

Figura 57: Fotomicrografias de cristais de clinopiroxênio de DSMB obtidas por MEV que exemplificam denominações de regiões: borda (b), centro (c) e região intermediária (i).

Figura 58: Diagrama de classificação dos cristais de piroxênios cálcicos ferromagnesianos de DSMB. Tem-se que $\text{Ca} + \text{Mg} + (\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}) = 100\%$, sendo Ca equivalente a Wo, Mg a En e $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn}$ a Fs. Na legenda, b é borda e c é o centro.

correspondem aos clinopiroxênios das rochas mais primitivas das séries. Estes cristais são mais ricos em Mg (Di), menos em Hd e bastante empobrecidos em componentes moleculares sódicos.

A proporção de membros finais tais como Hd, Di, Ae e na componente de Tschermak cálcica é relacionada à ocupação catiônica no sítio M1 do clinopiroxênio na Figura 60. Observa-se que os dados se alinham em direção ao aumento da Hd, Ae e Ca componente de Tschermak, conforme diminui o componente Di.

8.5.2.2. Composição química de elementos maiores e menores em clinopiroxênio

Nesta descrição composicional, as zonas internas como os centros e regiões intermediárias são tratadas conjuntamente como regiões centrais. Na Figura 61, são apresentados digramas da proporção catiônica de elementos maiores e menores em apfu em função do $mg\#_{cpx}$ $[(Mg/(Mg+Fe^{2+}_t))] \times 100$, com os termos em apfu. Nota-se que há sobreposição de valores entre as zonas de borda e de centro (Figura 61).

Os clinopiroxênios de DSMB apresentam conteúdo de Si^{4+} que varia de 1,689 a 1,858 apfu. O Ti^{4+} se encontra entre 0,041 e 0,197 e o Al entre 0,207 e 0,527 apfu. Os intervalos em que as proporções catiônicas de Fe^{2+} e Fe^{3+} estão inseridas, respectivamente, são de 0,135 a 0,210 apfu e de 0,036 a 0,145 apfu.

Os valores de Mn^{2+} nas bordas e nos centros estão dispersos num intervalo bastante similar entre si (entre 0,003 e 0,008 apfu). O Ca^{2+} está mais concentrado nas bordas (0,824-0,901 apfu) do que nos centros (0,802-0,878 apfu). O Cr^{3+} está abaixo do limite de quantificação da técnica analítica ME, para a maioria dos dados, com valores máximos quantificáveis atingindo 0,006 apfu (Figura 61). Por sua vez, as proporções de Na^+ varia de 0,023 a 0,052 apfu nos clinopiroxênios de DSMB.

Na Figura 61, observa-se que, em alguns diagramas, os dados se comportam linearmente (Si^{4+} , Ti^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} *versus* $mg\#_{cpx}$). A relação é linear crescente entre Si^{4+} e $mg\#_{cpx}$, mas é decrescente entre Ti^{4+} , Al^{3+} e Fe^{3+} .

Em *na versus* $mg\#_{cpx}$ (Figura 62), não há um alinhamento claro dos dados, mas, aparentemente, as bordas são mais empobrecidas em $mg\#$ e enriquecidas em *na* do que dos dados de centros, o que caracteriza um zonamento químico normal segundo Rock *at al.* (1994). Todavia, há um grupo de dados de centros que não correspondem a este perfil.

Figura 59: Diagrama ternário Mg - Na - ($\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} - \text{Na} + \text{Mn}$), onde constam dados de clinopiroxênio de DSMB. As tendências composicionais de clinopiroxênio dentro da evolução de magmas alcalinos pertencem às rochas alcalinas das seguintes localidades: A=Morotu; B=Uganda; C=Itapirapuã; D= Iron Hill; E= South Qôroq Centre. Diagrama retirado de Barbieri *et al.* (1987).

Figura 60: Diagrama de $\text{Fe}^{3+} + \text{Ti}^{4+} + \text{Al}^{3+}$ no sítio M1 *versus* Mg^{2+} em M1 de clinopiroxênios de DSMB. Ambos os eixos se encontram em apfu. Destaca-se a proporção de membros finais em função da ocupação catiônica em M1. Veja legenda na Figura 59.

Figura 61: Diagrama binário de elementos maiores e menores de clinopiroxênios de DSMB em apfu versus $mg\#_{cpx}$. O $mg\#_{cpx}$ foi calculado na forma $[(Mg)/(Mg+Fe^{2+})] \times 100$, com os termos em apfu. Os dados iguais a zero são resultados que ficaram abaixo do limite de quantificação da técnica analítica.

Figura 62: Diagrama de $na = Na/(Na + Ca)$ versus $mg\# = [(Mg)/(Mg+Fe^{2+})] \times 100$, com os termos em apfu. Relação utilizada para classificar o tipo de zonamento químico em clinopiroxênio de DSMB segundo Rock *et al.* (1994).

8.5.2.3. Variações catiônicas em clinopiroxênio

Foram investigadas as possíveis variações catiônicas dentro dos sítios M1, M2 e T ao longo do processo de cristalização de clinopiroxênios de DSMB. Na Figura 63, observa-se que em M1 o aumento de Ti^{4+} e Fe^{3+} dos centros para as bordas é acompanhada pela diminuição de Mg^{2+} nos sítios M1. Já a variação de Al^{3+} e Cr^{3+} em M1 não mostra uma correlação linear com Fe^{2+} e/ou Mg^{2+} em M1. O Na^+ em M2 aparenta diminuir em direção às bordas dos cristais, conjuntamente, com o Mn^{2+} . Também é possível verificar que conforme o Na^+ diminui dos centros para as bordas, o Ca^{2+} tende a aumentar, apesar de certo grau de dispersão dos dados.

O mecanismo da incorporação de cátions trivalentes em M1 tais como Al^{3+} e Fe^{3+} é melhor explicado, segundo a Figura 64, pela entrada de Al^{3+} em T, tendo em vista o balanceamento de carga elétrica do cristal. Já para a incorporação de Cr^{3+} não foi observada relação desta com a entrada de Al^{3+} em T ou Na^+ em M2. A alocação de Ti^{4+} em M1, entre os dois mecanismos sugeridos em Morimoto *et al.* (1988) (Figura 64), é também apoiada pela a incorporação de Al^{3+} no sítio T, mas se nota também que há uma tendência a linearização dos dados no diagrama Na^+M2 versus $Ti^{4+}M1$ para alguns dados.

8.5.2.4. Elementos traços em clinopiroxênio

Na Figura 65, são apresentados valores de fração mássica de alguns elementos traços normalizados pelo manto primitivo ou pelo condrito. Nota-se que a menor e a maior razão entre a amostra e o manto primitivo é de 0,6 (Ba) a 60 (Sm) vezes. O formato das curvas dos diagramas A e B é côncavo de boca para baixo. São observadas na Figura 65 A anomalias negativas mais profundas de Sr, Hf e Zr. Em relação aos valores normalizados pelo condrito, os ETRs apresentam enriquecimento entre 9 (Lu) a 165 vezes (Sm), e as curvas não apresentam anomalias.

8.6. Considerações

Os cristais de olivina de DSMU e DSMB apresentam alto teor molecular de forsterita, sendo este maior, no geral, nos cristais de DSMU em relação aos de DSMB. O zonamento composicional é marcado pela diminuição de Mg^{2+} e o enriquecimento de Fe^{2+} do centro para a borda nos cristais de olivina de DSMU. Em DSMB, os cristais são homogêneos com

Figura 63: Estudo de variações catiônicas em clinopiroxênio de DSMB entre cátions de elementos maiores e menores nos sítios M1 e M2.

Figura 64: Estudo de variações catiônicas entre os sítios T e M1 em clinopiroxênios de DSMB. Nos diagramas, os cátions estão em apfu.

Figura 65: Diagrama multielementar de frações mássicas de elementos traços em clinopiroxênio de DSMB normalizadas pelos respectivos valores encontrados no manto primitivo (A) e no condrito (B), de acordo com os valores de McDonough e Sun (1995).

desprezível zonalidade. Foram poucos os elementos traços detectados acima do limite de quantificação pela técnica LA-ICP-MS em comparação à quantidade detectada em cristais de clinopiroxênio. Assim, os elementos traços em olivina que participam deste estudo de partição são Na, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn e Y. Ressalta-se que alguns desses elementos não foram detectados simultaneamente nas olivinas de ambas as amostras (DSMU e DSMB).

Os cristais de clinopiroxênio estudados apresentam zonas concêntricas e/ou setoriais. O critério textural foi considerado na separação de dados de borda e centro. Os clinopiroxênios estudados são cálcicos e são classificados como diopsídio. Os zonamentos concêntricos foram designados como normais de acordo com parâmetros *na* e *mg#* de Rock *et al.* (1994) e há o enriquecimento de elementos traços em direção da borda. No zonamento setorial em clinopiroxênio de DSMPN, há o aumento da incorporação de elementos incompatíveis nas zonas mais ricas em Fe.

A descrição detalhada composicional de cristais de olivina e clinopiroxênio de cada corpo é fundamental para o desenvolvimento de discussão da obtenção de coeficiente de partição. Essas descrições permeiam parte do processo da análise dos dados que possam integrar o cálculo do coeficiente junto às discussões de equilíbrio químico entre zonas cristalinas e o líquido.

9. Discussão

9.1. Algumas observações de química de rocha total e química mineral

A variação de elementos maiores entre borda e centro em DAPGG foi estudada com mais detalhes em Menezes *et al.* (2015). A maior concentração de macrocristais máficos, classificados como antecristais/xenocristais, situa-se no centro do dique. Este processo faz com o que o setor central tenha característica de um magma mais primitivo com teor de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O_{3t} e Na₂O relativamente menor e maior fração mássica de MgO do que a borda e região intermediária (Figura 18).

O zonamento composicional de Cr, Ni e Co entre centro e borda em DAPGG está relacionado à carga de macrocristais máficos no setor central do dique. De acordo com Adam e Green (2006), o coeficiente de partição entre clinopiroxênio e o líquido em sistema basanítico a 1075 °C e 1 GPa dos elementos Cr, Co e Ni são 26; 1,1 e 10, respectivamente. Em olivina, os valores relativos aos mesmos elementos correspondem a 1,3; 6,6 e 47, na mesma ordem. Para biotita em sistema álcali basalto, os coeficientes de partição de Cr, Co e Ni foram 5,4, 23 e 1,3 (Villemant *et al.*, 1981). Portanto, estes elementos são compatíveis nas estruturas de tais cristais em sistemas máficos alcalinos de modo que a maior moda destes cristais pode tornar a região do dique mais rica nestes metais de transição. Na Figura 16, observa-se que os centros dos micro e macrocristais de clinopiroxênio são mais ricos em Cr+Ni+Co, sendo estes dados mais próximos do dado de rocha total do centro de DAPGG (C1). O intervalo composicional de Cr+Ni+Co nos setores mais evoluídos do dique e a matriz se incluem no intervalo composicional das bordas dos cristais de clinopiroxênio. Apesar da Figura 16 não representar um balanço de massa propriamente dito, é possível acessar a influência de macrocristais no zonamento composicional de DAPGG, referente aos elementos Cr, Ni e Co.

Ainda na Figura 16, encontra-se o somatório da fração mássica dos ETRs (Σ ETRs) *versus* mg#. Nota-se que há uma tendência na qual o centro do dique mais empobrecido em ETRs se aproxima da composição dos cristais de clinopiroxênio, enquanto as regiões com menor mg# se afastam. Devido à incompatibilidade desses elementos em fases como olivina e clinopiroxênio (Adam e Green, 2006), a borda e o líquido tendem a ficar mais ricos em ETRs tendo em vista a menor carga de macrocristais máficos do local.

Por outro lado, o dique DSMU não mostra uma tendência nítida de variação composicional entre a amostra de centro e as de borda da mesma forma que DAPGG. Há uma

complexidade ou heterogeneidade mineralógica nas bordas em que uma das regiões amostradas deste setor (DSMU-B2), não diretamente em contato com a encaixante, possui as características de magma mais primitivo do que as encontradas em amostras do centro (DSMU-C). Se for adotada a lógica usada em DAPGG, apesar de DSMU-B2 apresentar uma matriz mais fina do que DSMU-C, a carga de macrocristais de olivina é mais elevada e mais grossa. Isso faz com que a amostra tenha mg# maior (69 *versus* 68) e os teores de Fe_2O_{3t} , Al_2O_3 , TiO_2 menores. Na Figura 16, é a amostra DSMU-B2 que mais se aproxima em composição ($\text{Cr}+\text{Ni}+\text{Co}$ e ΣETRs) da olivina e do clinopiroxênio.

DSMPN não foi amostrado como um corpo setorizado. Mesmo assim, observações importantes quanto a contribuição dos macrocristais máficos na química de rocha podem ser extraídas. Inicialmente, foi mostrado no Capítulo 8 que DSMPN carrega macrocristais de clinopiroxênio que diferem quimicamente entre si. Nota-se nos diagramas da Figura 16, que entre o cpx 3 e o cpx 4, é o segundo que está quimicamente mais próximo da rocha. Assim, é relevante apontar que o cpx 4 é tão empobrecido em Cr, Ni e Co quanto a rocha. A rocha em si é mais rica em ETRs do que os cristais apresentados, mas se localiza mais próximo dos cristais de cpx 4.

Em DSMB, estão apenas disponíveis análises químicas de rocha total das porções da borda e do centro do dique. Entre estes dois setores, observa-se que a borda é mais pobre em MgO e mais rica em Fe_2O_{3t} . No entanto, ao contrário do que foi verificado em DAPGG, a borda está empobrecida em SiO_2 em relação à região central. A maior fração mássica deste óxido no centro de DSMB pode estar relacionada a macrocristais de plagioclásio, interpretados como xenocristais (Alves, 1997). O centro ainda mantém maior teor de MgO em relação à borda, provavelmente, pela presença na região central de macrocristais máficos, inclusive a olivina, sendo alguns também caracterizados como xenocristais (Alves, 1997). De acordo com a tendência observada nos dois primeiros diques, o centro do dique é mais rico nos elementos Cr, Ni e Co, do que a borda, mas a fração mássica encontrada ultrapassa a observada nos cristais de clinopiroxênio e olivina (Figura 16). O somatório da fração mássica de ETRs é maior na borda de DSMB do que nos cristais de clinopiroxênio, porém, diferentemente da tendência observada anteriormente, esta fração mássica é ainda maior no centro do dique.

A comparação da fonte mantélica entre os diques estudados (DAPGG, DSMU, DSMB e DSMPN), tendo em vista a variação química na seção transversal em função da quantidade de

antecristais e xenocristais, pode ser realizada a partir das amostras de borda. A relação $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ empregada por Menezes *et al.* (2015), baseado nos trabalhos de Dalton e Wood (1993) e Gibson *et al.* (1999), foi utilizada com este propósito. Nestes trabalhos, estabeleceu-se que razões $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ acima de 1 podem ser indicação de elevada quantidade de clinopiroxênio de procedência metassomática na rocha fonte. Nos diques estudados, considerando-se apenas os dados de borda ou dos resultados das matrizes analisadas (mais próximas de composições dos líquidos), somente em DAPGG, encontram-se valores maiores que 1 (Figura 66). Nos demais, observa-se semelhança entre os diques de DSMPN e DSMB, sendo o DSMU intermediário entre esses últimos e o DAPGG.

A mesma razão de elementos maiores apresenta a influência dos macrocristais na química de rocha total nos diferentes setores dos diques. Na Figura 66, são os centros dos cristais de clinopiroxênio que apresentam a razão $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ mais elevada, e sua maior carga nos centros dos diques também eleva esta razão na região central do corpo.

A razão Zr/Nb é uma outra alternativa para acessar informação sobre a rocha fonte das amostras. A partição de elementos HFSE é controlada por fases como anfibólio, granada e zircão que apresentam baixa solubilidade em fluidos hidratados (Pearce e Peate, 1995). Na Tabela 18, é mostrado que a razão Zr/Nb , especificamente, nas amostras de borda são 4,1 em DAPGG; 3,3 em DSMB; 3,6 em DSMU e 3,9 na análise DSMPN-M.

A razão $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ indica o grau de fracionamento entre ETRs leves e pesados e é indicativa se, na geração do magma progenitor, houve a formação de granada residual, pois este é um mineral que tende a incorporar mais ETRs pesados do que leves (Kamgang *et al.* 2013). Na Tabela 18 e Figura 19, a comparação entre as razões nas amostras de borda e das análises de matriz dos quatro diques pode ser melhor avaliada. DAPGG é o dique com maior valor de $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$, sendo os dos outros diques mais próximos entre si. Os valores médios são 50,0 (DAPGG); 22,3 (DSMB-B); 26,7 (DSMU) e 25,0 (DSMPN).

Enfim, por meio dos índices $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$, foi verificado que, possivelmente, ou o magma do formador de DAPGG é proveniente de uma rocha fonte de composição não

Figura 66: A) Diagrama $\text{CaO} / \text{Al}_2\text{O}_3$ versus mg# para os dados de rocha total e análise de matriz dos corpos DAPGG, DSMU, DSMB e DSMPN. B) Diagrama $\text{CaO} / \text{Al}_2\text{O}_3$ versus mg# com dados de rocha total, matriz e de clinopiroxênio de cada dique. O termo mg# foi calculado de acordo com a relação $[(\text{MgO})/(\text{MgO}+\text{FeO}) \times 100]$.

comum dos outros diques estudados, ou o magma progenitor de DAPGG passou por processos de evolução diferentes das etapas sofridas pelos magmas progenitores de DSMU, DSMPN e DSMB. É relevante mencionar a composição de DAPGG se destaca, pois apresenta o mg# intermediário entre o dique mais (DSMU) e o menos máfico (DSMPN), mas é o mais enriquecido em elementos incompatíveis.

9.2. Composição representativa do líquido

O procedimento de separação de matriz por catação e de análise *in situ* resultou numa diferenciação composicional para elementos maiores e traços no material final, cujo grau dependeu de amostra para amostra e do método experimental adotado. Dos métodos utilizados, podem ser apontadas algumas vantagens e possíveis erros sistemáticos.

Na seleção de fragmentos de rocha, as chances de algum macro e megacristal estar totalmente incluso em um fragmento e, conseqüentemente, não visível, crescem com o aumento do tamanho do fragmento. Há um tamanho mínimo a ser utilizado de modo que este procedimento se torne praticável, considerando possibilidade de visualização dos detalhes do fragmento e a manipulação do mesmo sob a lupa. Por isso, caso o tamanho dos macrocristais seja menor que ao do fragmento, a aplicação deste método será passível de questionamento.

Em Nakada e Motomura (1999), os macrocristais de tamanho médio menor que 5 mm de comprimento foram manualmente retirados de um material fragmentado com tamanho menor que 1 mm. Todavia, no material remanescente, constataram que ainda restavam 7,9 % de macrocristais. Neste trabalho, os macrocristais apresentam tamanho entre 0,5 e 0,8 mm e os fragmentos analisados tiveram de 0,07 a 0,18 mm de comprimento. Considera-se, assim, que a maior razão tamanho de macrocristal/tamanho de fragmento possa aprimorar os resultados de seleção de matriz.

As análises por método químico analítico de amostragem direta da matriz diminuem a probabilidade de se amostrar mega e macrocristais, tendo em vista a capacidade de análise superficial da microsonda eletrônica e, em LA-ICP-MS, da aplicação do *raster* preferencialmente. No entanto, por amostrarem quantidades mínimas de material, estas técnicas podem não garantir a homogeneidade do material analisado, devido ao fator granulação da matriz. Por isso, podem resultar em análises com alto desvio padrão. Esta problemática não é tão evidente no método da obtenção de matriz por catação, já que um volume maior de matriz é gerado e este volume passa por etapas de homogeneização.

As análises de matriz em DAPGG, DSMU e DSMPN se mostraram pouco ou mais diferenciadas das de rocha total e discordâncias foram também observadas entre análises de matriz do mesmo dique (Capítulo 7). Com intuito de avaliar a eficácia dos procedimentos experimentais adotados, junto aos dados já discutidos, os resultados de química de DSMU e DAPGG para elementos maiores, menores e traços de matriz e rocha total foram expostos em gráfico do tipo barra (Figuras 67 e 68).

Do material originado na retirada de macrocristais máficos, espera-se que a composição resultante apresente menor valor de $mg\#$ (e.g., Menezes *et al.*, 2015) e seja mais rica em elementos incompatíveis (e.g., Ubide *et al.*, 2014). A norma, já descrita, também facilita na averiguação da eficácia dos procedimentos pela variação dos minerais máficos *di* e *ol* e aluminossilicáticos.

Todas as análises de matriz de DAPGG (Figura 67) tiveram $mg\#$ abaixo dos valores de rocha total. O valor de DAPGG-BE(ME) é concordante com o de DAPGG-BM. No entanto, nota-se que a variação relativa de valores entre as matrizes separadas por catação (DAPGG-BM, DAPGG-IM, DAPGG-C2M) ainda segue aquela existente entre análises de rocha total (DAPGG-B, DAPGG-I e DAPGG-C2).

Houve diminuição na norma de *di* e/ou *ol* tanto nas matrizes separadas por catação quanto naquelas analisadas *in situ*. Todavia, o aumento do somatório $or + ab + an$ não ocorreu em DAPGG-C2M em relação à DAPGG-C2. Este resultado pode estar vinculado a uma baixa eficácia do processo de catação nesta amostra. Outra característica que põe mais uma vez em prova os resultados de DAPGG-C2M é o empobrecimento de elementos incompatíveis (ETRs, Zr, Nb, Y e Hf) em comparação ao determinado em DAPGG-C2.

DAPGG-IM e DAPGG-BM apresentam a sobreposição entre si do intervalo composicional dos seguintes elementos: V, Zr, Sr, Ba, Nb, La, Ce, Nd, Sc, Co, Pr, Sm, Gd, Hf, Th, Eu e Lu. A média de DAPGG-BE(ME), por sua vez, aparenta mais com DAPGG-IM nos elementos Ba, Cr, La, Y, Pr, Hf, Th, Eu e Lu e com DAPGG-BM nos elementos La, Sc e Pr. As três análises (DAPGG-IM, DAPGG-BM e DAPGG-BE(ME)) mostraram enriquecimento para a maioria dos elementos traços em relação aos materiais de partida (Figura 67).

Figura 67: Fração mássica, x, em m/m (salvo mg#) de óxidos de elementos maiores e menores (B, C, D) ou elementos menores e traços (de E a M) em ppm em rocha total e matriz de DAPGG. São mostrados os resultados das análises de material matricial separado por catação (final M) e de análise direta por ME ou LA-ICP-MS (final ME). As razões da escolha das análises para compor a média da matriz estão discutidas no texto.

Figura 67 (continuação).

Figura 67 (continuação).

Figura 68: Fração mássica, x, em m/m (salvo mg#) de óxidos de elementos maiores e menores (B, C e D) ou de elementos menores e traços (de E a L) em ppm em rocha total e matriz de DSMU. São mostrados os resultados das análises de material matricial separado por catação (final M) e de análise direta por ME (final ME). As razões da escolha da análise DSMU-B2(ME) como representativa da matriz estão discutidas no texto.

Figura 68 (continuação).

Figura 68 (continuação).

DAPGG-B(ME), além de exibir empobrecimento relativo a DAPGG-B dos elementos traços V, Ce, Gd, Eu, Tb, U e Lu, teve desvios padrões relativos (DPR) altos de n-plicatas se comparados com os resultados de DAPGG-BE(ME) e DSMU-B2(ME) (subitem 5.4.3.). Por esses motivos, a análise de DAPGG-B(ME) foi descartada para a composição da média final da matriz de DAPGG.

Das análises matriciais de DSMU, é esperado que elementos compatíveis em olivina como Cr e Ni tenham um decréscimo acentuado em composição em relação à análise de rocha total. Já que o macrocristal principal de DSMU é a olivina e em menor proporção o clinopiroxênio, é aguardado também que haja o enriquecimento em elementos incompatíveis na matriz da rocha.

O cálculo da mineralogia normativa dos materiais selecionados por catação de DSMU (DSMU-B1M e DSMU-C1M) apresenta o enriquecimento ou um empobrecimento considerado desprezível de *ol* e *di*. Além disso, o somatório *or + ab + an* diminui e a fração mássica de elementos menores e traços se mostra bastante similar à da rocha original (Figura 68). Estes resultados indicam que o processo de catação foi ineficaz e que as análises DSMU-B1M e DSMU-C1M não devam integrar a composição representante do líquido de DSMU.

Por outro lado, DSMU-B2(ME) exibe todas as características esperadas para a composição da matriz. O valor do mg# é mais baixo que de DSMU-B2, o que é acompanhado pela diminuição na norma dos minerais, *di* e *ol*, sendo mais pronunciada para este último, e o aumento no somatório de *or + ab + an*. Adicionalmente, há o empobrecimento dos elementos bastante compatíveis na estrutura da olivina como Ni e Cr (Figura 68). Os elementos ETRs, entre outros traços, são enriquecidos no líquido, conforme é previsto. A análise direta por ME e LA-ICP-MS da matriz de DSMU forneceu valores de desvio padrão relativo das n-plicatas satisfatórios (subitem 5.4.3.), o que mostrou que a granulação desta matriz foi favorável à análise representativa do material. Deste modo, conclui-se que a análise DSMU-B2(ME) fornece os valores mais aceitáveis para a matriz de DSMU.

A análise direta da matriz de DSMPN não trouxe resultados aceitáveis que pudessem ser aplicados a este estudo (subitem 5.4.3.). Todavia, o material matricial selecionado por catação (DSMPN-M) obedeceu às tendências composicionais esperadas relativas a DSMPN: menor mg#, menores porcentagens de *ol* e *di*, aumento no somatório *or + ab + na* e o leve enriquecimento de incompatíveis (Y, Zr, Nb, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Ho, Er, Yb, Lu, Hf, Th e U). Apenas não houve mudança quanto aos valores de elementos compatíveis Cr e Ni.

Menciona-se que o tamanho e o formato prismático dos macrocristais de DSMPN podem ter auxiliado na identificação deles por lupa.

A composição representativa da matriz do dique DAPGG (média final) é, na Figura 67, indicada pela barra incolor, junto à barra de erro. Neste caso, a média final foi construída pelas análises DAPGG-IM, DAPGG-BM e DAPGG-BE(ME). A composição das matrizes de DSMU e DSMPN, que são representadas por DSMU-BE(ME) e DSMPN-M, nesta ordem, estão também na Tabela 19 .

Em DSMB, tendo em vista do fracionamento mineral, com a baixa quantidade de macrocristais máficos na amostra de borda e das características químicas como menor conteúdo de MgO e maior de Na₂O, Al₂O₃ e Fe₂O_{3t} a composição de amostra de borda é selecionada para ser representante da composição do líquido de DSMB.

Após tais considerações, um dos aspectos principais deste estudo, referente às composições mais próximas de líquido de cada um dos diques, é apresentado na Tabela 19. É a partir destes dados que serão aplicados os cálculos de coeficientes de partição.

9.3. Equilíbrio químico entre cristal e o líquido hospedeiro e coeficiente de partição de elementos traços entre o cristal e o líquido

A seleção de coeficientes de partição a partir da literatura deve ser uma tarefa bastante criteriosa, uma vez que a simplificação no emprego desse parâmetro nas construções dos modelos de evolução magmática é considerada. É admitido que o coeficiente de partição não varie ao longo de um processo de diferenciação. Esta condição é válida quando as condições de temperatura, pressão e composição não apresentam elevada amplitude de variação. Porém, essa simplificação passa a constituir um limite do modelo quando não se reconhece a extensão das mudanças das variáveis físico-químicas durante a cristalização. Assim, é de extrema importância que os coeficientes de partição utilizados no curso de uma investigação tenham sido obtidos de sistemas geológicos ou até mesmo sintéticos com características compatíveis com as do alvo de estudo.

Tabela 19: Composição de elementos maiores, menores e traços, x, dos líquidos de DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB. DP é o desvio padrão. A composição do líquido de DAGG é a média dos resultados de DAPGG-BE(ME), DAPGG-BM e DAPGG-IM.

	DAPGG		DSMB-B		DSMPN-N		DSMU- B2(ME)	
	X	DP	X	DP	X	DP	X	DP
Óxido	% m/m							
SiO ₂	41,19	1,20	41,05	0,82	43,84	0,88	43,61	1,43
TiO ₂	5,11	0,01	4,18	0,08	4,20	0,08	3,58	0,39
Al ₂ O ₃	8,07	1,36	14,86	0,30	15,38	0,31	17,67	1,35
Fe ₂ O ₃ t	16,10	0,21	12,58	0,25	13,43	0,27	10,40	0,73
MnO	0,92	0,72	0,17	0,00	0,20	0,00	0,16	0,02
MgO	7,34	0,26	5,62	0,11	3,93	0,08	5,21	0,95
CaO	12,49	0,89	9,37	0,19	9,31	0,19	11,49	1,48
Na ₂ O	2,63	0,20	3,37	0,07	3,69	0,07	3,85	0,69
K ₂ O	2,50	0,35	2,10	0,04	2,99	0,06	2,89	0,59
P ₂ O ₅	0,82	0,08	1,65	0,03	1,58	0,03	0,91	0,14
Elemento	ppm							
Sc	37,4	0,7	15,8	0,0	6,3	0,1	22,5	3,3
V	417	33	293	6	167	3	209	12
Cr	126	20	<LQ		34	1	168	84
Co	53,9	3,9	31,5	0,6	39,9	0,8	26,8	3,1
Ni	109	11	<LQ		<LQ		31,6	4,3
Zn	108	13	100	2	130	3	84,0	9,0
Rb	108	15	44	2	68	1	46,9	7,6
Sr	1189	63	1805	6	1407	17	1316	194
Y	25,4	4,4	27,0	0,0	37,4	1,5	27,6	2,4
Zr	417	24	151	0	358	11	312	26
Nb	109	11	45,3	0,1	91,3	2,0	82,9	16,6
Cs	47,7	6,5	0,4	0,0	0,9	0,1	4,9	1,0
Ba	1562	38	2348	109	1268	57	999	150
La	114	0,9	57,8	0,2	90,1	2,1	70,7	7,5
Ce	235	16,5	125	0	182	5	134	11
Pr	26,4	0,3	16,4	0,1	21,7	0,5	17,2	1,3
Nd	99,2	2,5	69,9	0,1	86,9	2,5	69,0	4,8
Sm	15,3	0,5	12,8	0,0	16,4	0,3	12,5	0,8
Eu	4,09	0,09	4,57	0,01	5,00	0,08	3,78	0,23
Gd	11,7	1,0	10,0	0,4	14,2	0,4	9,5	0,7
Tb	1,37	0,15	1,33	0,00	1,83	0,03	1,14	0,09
Dy	6,59	0,66	6,31	0,02	8,94	0,18	6,49	0,47
Ho	1,05	0,13	1,09	0,01	1,47	0,11	1,12	0,08
Er	2,49	0,36	2,61	0,01	3,56	0,14	2,63	0,21
Tm	0,290	0,036	0,306	0,005	0,449	0,021	0,319	0,031
Yb	1,61	0,16	1,76	0,03	2,45	0,06	1,94	0,19
Lu	0,216	0,014	0,258	0,002	0,340	0,019	0,268	0,027
Hf	10,3	0,4	3,55	0,22	7,95	0,25	7,11	0,54
Ta	7,07	0,96	2,70	0,05	5,60	0,11	5,26	0,65
Th	11,1	0,27	3,39	0,01	9,62	0,24	8,05	1,43
U	2,15	0,43	0,80	0,00	2,29	0,10	1,77	0,28

Três aspectos importantes no estudo de coeficiente de partição são a aquisição da composição do líquido, a identificação da região do cristal que esteja em equilíbrio químico com o líquido e se há obediência da lei de Henry. O estado de equilíbrio químico pode ser verificado por meio da constante de troca catiônica dos íons Mg^{2+} e Fe^{2+} , $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$, entre o cristal e o líquido. Das trocas iônicas possíveis para este fim, esta é a que apresenta maior quantidade de estudos relacionados, com o desenvolvimento de ferramentas como as equações termobarométricas, cuja sensibilidade do par catiônico às condições de T e P auxilia na investigação do equilíbrio. Por ser um sistema natural, ao contrário dos estudos experimentais nos quais há adição e enriquecimento de elementos traços, pode-se inferir que o sistema se encontra sujeito à lei de Henry para os elementos traços.

A constante de partição é obtida a partir de um sistema ideal ou não ideal em equilíbrio. A não idealidade do sistema faz com que uma variável adicional influencie o comportamento de partição do elemento. Em sistema ideal, o coeficiente de partição é dependente das condições de temperatura, pressão e composição do sistema. Fora da idealidade, a concentração do elemento em foco passa também a condicionar a partição (Watson, 1985). O equilíbrio químico entre duas fases coexistentes, em corpos sub-vulcânicos a vulcânicos, deve ser investigado, dada que a taxa de resfriamento é mais elevada que em corpos plutônicos e, por isso, a condição de equilíbrio entre as fases pode não ser alcançada pelos constituintes químicos. Em corpos rasos, uma zona de sobrecrecimento é observada nos cristais, sejam eles micro, macro ou megacristais. Nos cristais de DAPGG, por exemplo, bordas de sobrecrecimento foram detectadas, principalmente, nas amostras DAPGG-B e DAPGG-BE, onde a taxa de resfriamento é mais elevada. Elas se caracterizam por apresentarem um avanço composicional, ou seja, não contribuem para o padrão de variação gradativa inerente a própria evolução composicional do cristal em sistema fechado.

Uma exceção é citada em Scarlato *et al.* (2014) que não considera o equilíbrio químico de maiores como uma condição imprescindível no estudo de partição de elementos traços entre cristal e líquido. Em clinopiroxênio em uma matriz essencialmente vítrea, a borda de sobrecrecimento está adjacente a uma camada micrométrica de vidro, não homogênea, constituída por um gradiente composicional. Neste trabalho, foi possível acessar a composição de elementos traços na borda de sobrecrecimento e da porção mais próxima da camada vítrea adjacente e pode-se constatar que a partição de elementos traços obedece ao

comportamento previsto pelo modelo *Lattice Strain*. Porém, nos diques estudados neste trabalho, esta abordagem não foi aplicada, já que o material matricial é hipocristalino a cristalino.

9.3.1. Determinação de zonas dos cristais de olivina e clinopiroxênio em equilíbrio com o líquido

9.3.1.1. Olivina

O valor de $0,30 \pm 0,03$ para $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ obtido em sistema basáltico a 1 atm (Roeder e Emslie, 1970) recebeu inúmeras aplicações em estudos dirigidos à investigação da evolução magmática em sistemas básicos e ultrabásicos em diferentes condições físicas. Trabalhos posteriores procuraram melhor compreender a dependência $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ com as variáveis físico-químicas (*e.g.*, Sack *et al.*, 1987; Matzen *et al.* 2011). Em Kushiro e Walters (1998), esforços foram realizados para encontrar uma relação empírica que expressasse $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ em olivinas em função da propriedade do líquido hospedeiro, sendo a variável empregada o NBO/T. Também direcionada a sistemas máficos e ultramáficos, esta última abordagem é aqui trabalhada para obtenção de $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ de olivina nos líquidos de DSMU e DSMB (Tabela 20).

O termo NBO/T (oxigênio não ligante por cátion tetraedricamente coordenado) mede o grau de polimerização do líquido silicático e é calculado através da composição do líquido convertido em proporção catiônica. A expressão que designa NBO/T é dada por $\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n nM_i^{n+}$ (Tabela 20), onde M_i^{n+} é a proporção dos cátions modificadores de cadeia, representados por *i*, *n+* é a carga elétrica do cátion e o *T* é a proporção de cátions tetraédricos no líquido (Mysen, 1988). Os cátions modificadores são responsáveis por despolimerizar a cadeia tetraédrica e a sua abundância é calculada pela subtração da proporção de cátions que balanceiam as Al^{3+} e Fe^{3+} em *T* da soma total dos cátions não tetraédricos no líquido. Seguindo o procedimento de cálculo de NBO/T em Mysen *et al.* (1985) e Mysen (1988), Si^{4+} , Ti^{4+} , P^{5+} , Al^{3+} e Fe^{3+} integram o somatório de cátions constituintes da rede tetraédrica do líquido. Nesta configuração, os cátions com carga diferente de 4+ em *T* são balanceados pelos cátions de metais alcalinos e alcalinos terrosos. No balanceamento de carga de Al^{3+} , são adotados os cátions na seguinte ordem: K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} . Esta ordem é em função da estabilidade decrescente dos

complexos de aluminato (Mysen *et al.*, 1981). No entanto, o Fe^{3+} é contabilizado em sítio tetraédrico apenas quando $\text{Al}^{3+} < \text{K}^+ + \text{Na}^+$ (Mysen *et al.*, 1981), caso contrário o Fe^{3+} desempenha papel de cátion modificador de rede. Já a carga de P^{5+} , como PO_4^{3-} , é balanceada pelo Ca^{2+} .

Deste modo, na Tabela 21, são apresentados os resultados do cálculo de NBO/T e $K_D^{\text{Mg}^{2+}-\text{Fe}^{2+}}$ para o líquido de DSMU e DSMB. Nota-se que para o cálculo de NBO/T em Kushiro e Walter (1998) foi considerado Fe^{2+} como Fe_{total} já que as condições experimentais aplicadas foram bastante reduzidas, apesar de reconhecerem a possível presença de Fe^{3+} abaixo de 5%. Por este motivo, o cálculo de NBO/T para o líquido de DSMB e DSMU foi efetuado considerando as duas situações para comparação (Tabela 21). Os dois resultados de NBO/T diferem em 1% entre si. Isso implica na variação de K_D de um cálculo para o outro na terceira e quarta casa, respectivamente, após da vírgula (Tabela 21), e se encontra dentro da margem de erro de K_D de $\pm 0,02$ fornecida em Kushiro e Walter (1998).

Na construção dos diagramas de equilíbrio mg# da olivina ($\text{mg}\#_{\text{ol}}$) *versus* mg# do líquido ($\text{mg}\#_{\text{l}}$) (Figura 69), foi empregado $K_D^{\text{Mg}^{2+}-\text{Fe}^{2+}}$ e, assim, $\text{mg}\#_{\text{l}}$ e $\text{mg}\#_{\text{ol}}$ foram calculados de acordo com $[\text{Mg}/(\text{MgO}+\text{FeO})]*100$ e $[\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})]$, respectivamente, onde na primeira expressão os termos estão em mol e, na segunda, em proporção catiônica (apfu). Nestes diagramas, os dados de zonas cristalinas que se localizam dentro da região limitada por linhas tracejadas (campo de equilíbrio) estão em equilíbrio com o líquido cujo valor de mg# é observado pela projeção dos dados no eixo da abscissa.

Nota-se que, em DSMB (Figura 69A e 69B), as regiões dos cristais em equilíbrio com o líquido de $\text{mg}\#_{\text{l}}$ 51,6 constituem centros e bordas, já que estes cristais apresentam composição bastante homogênea. Dos pontos analisados por ME nas olivinas de DSMB, encontram-se análises de elementos traços por LA-ICP-MS correspondentes de centro e borda dos cristais ol A1 e ol A2, que estão em equilíbrio com o líquido, de acordo com a $K_D^{\text{Mg}^{2+}-\text{Fe}^{2+}}$.

Este resultado parece não corresponder a uma questão apontada pelo estudo petrográfico de Alves (1997) nesta mesma amostra, que tais grãos de olivina seriam parte de

Tabela 20: Equação para o cálculo de $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ para a olivina em função de NBO/T (oxigênio não ligante por cátion tetraedricamente coordenado) e a equação de NBO/T. T é a proporção catiônica de tetraedros no líquido silicático, M é a proporção de cátions modificadores de rede, n é a carga do cátion e i é o elemento/cátion.

Equação	Referência
$K_D = 0,235 + 0,120 \left(\frac{NBO}{T} \right) - 0,031 \left(\frac{NBO}{T} \right)^2$	Kushiro e Walters (1998)
$\frac{NBO}{T} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^i nM_i^{n+}$	Mysen (1988)

Tabela 21: Valor de NBO/T, para DSMB e DSMU, considerando o Fe_{total} como Fe^{2+} em (1), o resultado do cálculo de NBO/T distinguindo as proporções catiônicas entre Fe^{2+} e Fe^{3+} (2) e o valores de $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$.

Amostra	NBO/T (1)	NBO/T (2)	$K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$
DSMB	0,724	0,716	$0,31 \pm 0,02$
DSMU	0,675	0,671	$0,30 \pm 0,02$

Figura 69: Diagramas de equilíbrio mg# de olivina *versus* mg# do líquido. As linhas contínuas foram calculadas por meio do $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ para os respectivos diques e as linhas pontilhadas através de $\pm \Delta K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ (Tabela 21). Os diagramas A e B correspondem aos dados de DSMB, com mg# do líquido de 51,6 e os diagramas C, D, E e F aos dados de DSMU cujo mg# do líquido é de 55,0.

um microxenocristal. Por esse motivo, à primeira vista, os cristais ol A1 e A2 não poderiam estar em equilíbrio com o líquido, como indicado pela aplicação de $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$. Por outro lado, a taxa de difusão de cátions Fe^{2+} e Mg^{2+} e de ETRs, por exemplo, em cristais de olivina é considerada alta se comparada a respectiva taxa em clinopiroxênio (Winpenny e MacLennan, 2011). Esta propriedade abre caminho à discussão de uma hipótese em que os xenocristais de olivina ol A1 e ol A2 em contato com o líquido de DSMB teriam passado pelo processo de difusão com o líquido até o alcance da condição de equilíbrio químico entre as duas fases. Ao considerar os coeficientes de difusão para cátions de elementos maiores, menores e traços em olivina e inclusões magmáticas, Spandler e O'Neill (2010) concluiu que a olivina de 1 mm e a inclusão de 50 μm de diâmetros entrariam em reequilíbrio em relação aos cátions V^{4+} , Na^+ e Ti^{4+} dentro de 10 a 100 anos em condições de 1 bar e 1330 °C. Sabendo que Fe^{2+} e Mg^{2+} apresentam taxa de difusão semelhante ao dos cátions citados e que os grãos ol A1 e ol A2 de 3 a 6 mm de comprimento estão em contato com o material hospedeiro ao menos 50 milhões de anos, torna-se plausível que os grãos estejam reequilibrados com a rocha hospedeira.

Para as olivinas de DSMU, nos diagramas de C a F da Figura 69, observa-se que não há dados no campo de equilíbrio com o líquido de $mg\#_l$ 55,0. As regiões mais próximas do limite tracejado são as bordas dos cristais de olivinas com $mg\#_{ol}$ entre 0,84 e 0,86, que estariam em equilíbrio com um líquido mais primitivo de $mg\#_l$ de 64,0. Este resultado se contrasta com feições texturais entre a maioria dos cristais de olivina de DSMU e a matriz circundante, no qual parece ocorrer uma borda em equilíbrio com o líquido. A hipótese levantada para este caso pode ser também baseada no coeficiente de difusão intracristalino ou de trocas com o líquido. Assim, supõe-se ou que a borda está em processo de reequilíbrio com a matriz hospedeira.

Na Figura 70, são apresentados resultados de dados de fração mássica de elementos traços em olivina de DSMB e DSMU divididos pelas respectivas frações nos líquidos correspondentes. Os dados gerados de relações de equilíbrio de acordo com $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ entre zonas cristalinas e o líquido estão identificados pela cor preta. É evidente que, nos cristais de DSMB, os valores resultantes para o centro e borda são bastante similares. Isso leva ao questionamento quanto ao efeito difusivo dos elementos maiores e traços em olivina. Já no diagrama de DSMU são destacados os resultados de borda dos

Figura 70: Diagramas multielementares de fração mássica de elementos traços, i , em olivina dividida pela fração mássica dos mesmos elementos no líquido: pares em equilíbrio, x_i^{ol} / x_i^l , e pares em desequilíbrio, $x_i^{ol'} / x_i^{l'}$. Os símbolos em preto em A) são razões construídas com composições dos cristais de olivina em equilíbrio químico com o líquido hospedeiro de DSMB, de acordo com a Figura 69. Em B), os símbolos pretos são razões com composições das zonas da olivina mais próximas do equilíbrio com o líquido em DSMU.

cristais de olivina mais próximos do campo de equilíbrio (Figuras 69C e 69E). Observa-se que a maior dispersão de dados ocorre para o Cr, Ti e P. Detalhes do estudo de partição de elemento traços entre os cristais de olivina de DSMU e DSMB são discutidos no subitem 9.3.2.2. deste capítulo.

9.3.1.2. Clinopiroxênio

A alternativa encontrada para a averiguação da condição de equilíbrio entre clinopiroxênio e o líquido é realizada por meio da comparação de dados da literatura de constante de equilíbrio de troca catiônica de Mg^{2+} e Fe^{2+} entre as fases e da razão $\frac{x_l^{Mg^{2+}} \cdot x_{cpx}^{Fe^{2+}}}{x_{cpx}^{Mg^{2+}} \cdot x_l^{Fe^{2+}}}$ calculada a partir dos dados experimentais. Em Akinin *et al.* (2005) e, posteriormente, utilizado por Larrea *et al.* (2012), a $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ de $0,26 \pm 0,05$ foi obtida por meio da média da compilação de resultados da literatura, porém esta não se restringiu a constantes obtidas de rochas de mesma composição a do estudo.

A utilização de geotermobarômetro constitui um segundo meio de se adquirir a $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ e que se adeque à amostra estudada. Em Putirka (1999, 2008), a regressão de múltiplos dados experimentais resultou em equações que relacionam T, P e a composição. De fato, esta é uma abordagem passível de erros, porém é escolhida para o desenvolvimento deste trabalho, haja vista que se julga mais apropriada a obtenção da constante em função das condições físico-químicas das amostras. Assim, foram utilizados geotermobarômetros de saturação de clinopiroxênio em sistemas vulcânicos no estudo de equilíbrio químico entre clinopiroxênio e o líquido de DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB (Tabela 22).

Ao considerar que a cristalização das zonas em equilíbrio dos cristais de clinopiroxênio tenha ocorrido em regiões rasas da crosta a, aproximadamente, 1 kbar, a equação (1) (Putirka, 1999; Tabela 22) forneceu a temperatura de saturação do mineral para o sistema anidro. Entretanto, Putirka (2008) apresenta a equação do cálculo da T considerando a componente H_2O do líquido (equação (2) da Tabela 22), de modo que se optou pela média entre os valores de temperatura gerados pelas duas equações. A porcentagem em massa de H_2O não foi adquirida experimentalmente para as amostras estudadas. Visto que a perda ao fogo (PF) inclui outros componentes além da água, a média entre as duas soluções levaria a um resultado mais próximo do valor real, diferentemente do caso em que apenas uma das duas

equações fosse optada. Finalmente, a constante $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ foi calculada por meio da equação (3) (Putirka, 1999; Tabela 22).

A composição representante do líquido no último estágio da evolução magmática dos diques foi discutida no item 9.2.. A partir deste resultado, pode-se aplicar as equações citadas para o cálculo de T em sistema anidro e hidratado, assim como para a equação de $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$. Estes valores estão apresentados na Tabela 23. No cálculo do $mg\#_l$ do líquido, foi apenas considerada a fração mássica de FeO, a qual foi obtida por meio da relação FeO/Fe₂O₃ adquirida através do software MELTS (Ghiorso e Sack, 1995; Asimow e Ghiorso, 1998).

A respeito da pressão única adotada para os diferentes diques, a distribuição de Al entre os sítios T e M1 fornece um referencial relativo quanto à profundidade de cristalização dos clinopiroxênios. Os diagramas Al em M1 (Al^{VI}) *versus* Al em T (Al^{IV}) em apfu das Figuras 71 e 72, baseados em Aoki e Kushiro (1968), indicam o possível ambiente onde os clinopiroxênios são provenientes. A composição da maior parte das zonas analisadas dos clinopiroxênios de DAPGG mostra que, pela ocupação nula de Al em M1, a cristalização ocorreu a baixas profundidades (Figura 71A). Os clinopiroxênios analisados de DSMPN mostram maior enriquecimento de Al em M1, se comparados aos clinopiroxênios de DAPGG. Algumas zonas centrais dos cristais de DSMPN estão no campo do granulito e inclusões em rochas basálticas (Figura 71B), o que atribui a cristalização destas zonas às regiões ainda mais profundas.

Na Figura 72A, os dados dos clinopiroxênios de DSMU se encontram dispersos no campo das rochas ígneas, com o conteúdo de Al em M1 diferente de zero. O espalhamento de dados na vertical, como neste caso, sugere que a cristalização ocorreu em condições polibáricas. Esta mesma característica é observada no diagrama B da Figura 72. Neste último, as composições das regiões centrais dos clinopiroxênios de DSMB são observadas na região do granulito principalmente. A maioria das análises de borda dos cristais se localiza no campo das rochas ígneas. As análises de zonas de borda localizadas no campo do granulito podem ser consideradas decorrentes de alterações químicas ou ainda de erro analítico. Algumas zonas de clinopiroxênio tanto de DSMU quanto de DSMB podem ter se formado em profundidades maiores em relação aos cristais de DAPGG e DSMPN (Figura 71).

Tabela 22: Equações termobarométricas de Putirka (1999) e Putirka (2008) empregadas neste estudo, onde T (K) é a temperatura, P (bar) é a pressão, X é a fração molar catiônica dos elementos indicados no índice e a fase é mencionada no expoente. O liq se refere a líquido, cpx a clinopiroxênio, $T^{\text{sat cpx}}$ a temperatura de saturação do clinopiroxênio, Fm a $Fe + Mg$ e H_2O_{liq} é a porcentagem em massa de H_2O no líquido.

Nº	Equação	Referência
(1)	$\frac{10^4}{T^{\text{sat cpx}}} = 3,12 - 2,59 \times 10^{-2} P - 0,37 \ln(mg\#^{liq}) + 0,47 \ln \left[x_{Ca}^{liq} x_{Fm}^{liq} \left(x_{Si}^{liq} \right)^2 \right] - 0,78 \ln \left[\left(x_{Fm}^{liq} \right)^2 \left(x_{Si}^{liq} \right)^2 \right] - 0,34 \ln \left[x_{Ca}^{liq} \left(x_{Al}^{liq} \right)^2 x_{Si}^{liq} \right]$	Putirka (1999)
(2)	$\frac{10^4}{T} = 6,39 - 0,076 (H_2O^{liq}) - 5,55 (x_{Ca}^{liq} x_{Si}^{liq}) - 0,386 (x_{Mg}^{liq}) - 0,0496 P + 2,2 \times 10^{-4} P^2$	Putirka (2008)
(3)	$\ln \left(\frac{x_{Fe}^{cpx} x_{Mg}^{liq}}{x_{Fe}^{liq} x_{Mg}^{cpx}} \right) = 31,8 - 36,8 (x_{Si}^{liq}) - 4,76 (x_{Na}^{liq}) + 17,0 \ln (x_{Si}^{liq}) - \frac{3879}{T} - 0,014 \frac{P}{T}$	Putirka (1999)

Tabela 23: Soluções das equações apresentadas na Tabela 22. T^{anidro} é a temperatura obtida em (1), $T^{\text{hidratado}}$ é a temperatura fornecida pela equação (2) e $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ é a solução de (3) ao empregar o valor de temperatura $T^{\text{média}} \pm DP$ (desvio padrão). Para a pressão, foi fixado o valor de 1000 bar. O erro de 0,4 (Putirka, 1999) para K_D foi utilizado como estimativa.

Amostra	T^{anidro} / K	$T^{\text{hidratado}} / K$	$T^{\text{média}} / K$	$K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$
DAPGG	1396	1390	1393 ± 4	$0,23 \pm 0,04$
DSMU	1418	1403	1411 ± 10	$0,23 \pm 0,04$
DSMPN	1386	1373	1380 ± 9	$0,22 \pm 0,04$
DSMB	1414	1348	1381 ± 46	$0,20 \pm 0,04$

Figura 71: Diagramas de Al^{3+} no sítio M1 (Al^{VI}) versus Al^{3+} no sítio T (Al^{IV}), ambos em apfu, em clinopiroxênio de DAPGG (A) e DSMPN (B). Os campos representados nos diagramas são baseados em Aoki e Kushiro (1968).

Figura 72: Diagramas de Al^{3+} no sítio M1 (Al^{VI}) versus Al^{3+} no sítio T (Al^{IV}), ambos em apfu, em clinopiroxênio de DSMU (A) e DSMB (B). Os campos representados nos diagramas são baseados em Aoki e Kushiro (1968).

É possível que as composições em equilíbrio com o líquido estejam nas zonas centrais mais externas a regiões de borda dos cristais, formadas nos últimos estágios de cristalização, ou seja, nas profundidades mais rasas indicadas de forma indireta nos diagramas das Figuras 71 e 72. O valor de pressão de 1 kbar fixada para o cálculo de $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ também está inserido no intervalo de pressão calculado em Larrea *et al.* (2012) e Ubide *et al.* (2014) para a cristalização de clinopiroxênio de diques de lamprófito alcalino, no qual a pressão máxima inicial foi de 5 kbar e variou até, aproximadamente, 0,5 kbar.

Segundo as equações (1) e (2) de Putirka (1999, 2008, Tabela 22), a variação de temperatura entre 0,5 e 5 kbar é de 23 K para o sistema anidro e de 40 K para o sistema hidratado. Neste mesmo intervalo de pressão, da temperatura mais baixa para a mais alta, $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ sofre o aumento de 0,0001 em sistema anidro e de 0,008 em sistema hidratado. Esta variação nos valores da constante de equilíbrio da troca catiônica é menor que o valor de SEE (*standard error of the estimate*) fornecido pelas equações de partida (Putirka, 1999 e 2008). Portanto, a escolha da pressão de 1 kbar para os quatro sistemas estudados constitui uma opção aceitável.

Putirka (1999) define SEE como um intervalo ($\pm n$) no qual o valor obtido estará inserido dentro de 68% de probabilidade do fornecido pelo modelo. Deste modo, foi adotado como uma estimativa do desvio de $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ o SEE de 0,04 gerado na correlação linear entre os valores da equação (3) e os valores medidos (Putirka, 1999), já que o resultado da propagação do erro por meio da relação $\sigma = \left[\left(\frac{\partial K_D}{\partial T} \right)^2 (\sigma_T)^2 \right]^{0,5}$ é em média 10 vezes inferior ao SEE.

A média da temperatura de saturação do clinopiroxênio a 1 kbar (Tabela 23) apresenta desvio padrão relativo de 0,3 a 3,4 %. Isso indica que não há mudanças significativas desta temperatura ao considerar o sistema anidro ou o sistema com % m/m de H₂O igual a LOI total. Os valores médios de temperatura obtidos por meio das equações diferem de +68 a +98 K do valor de T ajustado pelo *software* MELTS (Ghiorso e Sack, 1995; Asimow e Ghiorso, 1998) a 1 kbar.

A construção de um diagrama $mg\#_{cpx}$ versus $mg\#_l$ por meio do uso $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ (Tabela 23) e a interpolação dos dados experimentais permitem uma visualização mais clara das zonas dos cristais que estão em equilíbrio com a matriz. Dados que se localizam abaixo da curva são composições de zonas que estariam em equilíbrio com um líquido mais evoluído. Em

contrapartida, acima da curva, estão regiões dos cristais formados a partir de um líquido de composição mais primitiva (Larrea *et al.*, 2012).

Nas Figuras 73 e 74, encontram-se diagramas de $mg\#_{cpx}$ versus $mg\#_l$ para DAPGG, DSMPN, DSMB e DSMU. Para estes diques, o $mg\#_l$ calculado por meio da expressão $[MgO/(MgO+FeO)] \times 100$ com os termos em mol é, respectivamente, 52,7; 41,3; 51,6 e 55,0. São distinguidos os valores de $mg\#_{cpx}$ de bordas e de setores intermediários + centros de micro- e macrocristais. Nota-se, na maioria dos casos, que há pontos analisados tanto de borda quanto de regiões centrais dos cristais inseridos no intervalo de equilíbrio.

O líquido com $mg\#_l$ 52,7 de DAPGG está em equilíbrio com clinopiroxênios cujo intervalo de valores de $mg\#_{cpx}$ varia de 0,80 a 0,85. De 18 análises disponíveis de bordas de microcristais, 67% se encontram no intervalo citado (Figura 73A). O restante das análises apresenta $mg\#_{cpx}$ entre 0,79 e 0,80, cuja composição estaria em equilíbrio com um líquido de $mg\#_l$ médio de 46,5 de acordo com o diagrama. Das 37 análises da borda de macrocristais, 62 % tem valores de $mg\#_{cpx}$ entre 0,80 a 0,85, com maior frequência entre 0,81 e 0,83 (Figura 73C).

Foram obtidas 14 análises de elementos maiores em zonas intermediárias + centros de microcristais. Destas, 63 % se inserem na curva de equilíbrio, em que o valor médio de $mg\#_{cpx}$ é de 0,84 (Figura 73B). As demais análises se encontram acima da curva de equilíbrio. Nas zonas intermediárias e centrais de macrocristais, de 45 análises, 33 % se encontram em equilíbrio com o líquido segundo diagrama da Figura 73D. As outras análises estão acima do intervalo de equilíbrio com valor máximo de $mg\#_{cpx}$ de 0,89.

Apesar de alguns pontos analisados das regiões centrais de macrocristais estarem, de acordo com a Figura 73, em equilíbrio com a matriz, devem ser considerados os aspectos texturais dos cristais estudados. O discreto núcleo do cristal cpx 10 com $mg\#_{cpx}$ de 0,84, por exemplo, mesmo estando no intervalo de equilíbrio (Figura 73D), mostra feições de reabsorção e, por isso, pode ser atribuído a sua formação a um estágio mais precoce da do equilíbrio. As regiões centrais dos cristais cpx 47 e cpx 48 não são quimicamente homogêneas, com indícios de reabsorção. Deste modo, estas regiões também não são consideradas em equilíbrio com a matriz do último estágio de consolidação da rocha.

Figura 73: Diagramas de equilíbrio $mg\#$ do clinopiroxênio *versus* $mg\#$ do líquido. As linhas contínuas foram calculadas por meio do $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ para os respectivos diques e as linhas pontilhadas através de $\pm \Delta K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ (Tabela 23). Os diagramas A, B, C e D correspondem aos dados de DAPGG, com $mg\#$ do líquido de 52,7 e os diagramas E e F aos dados de DSMPN, cujo $mg\#$ do líquido é de 41,3.

Figura 74: Diagramas de equilíbrio mg# do clinopiroxênio *versus* mg# do líquido. As linhas contínuas foram calculadas por meio do $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ para os respectivos diques e as linhas pontilhadas através de $\pm \Delta K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ (Tabela 23). Os diagramas A, B, C e D correspondem aos dados de DSMB, com mg# do líquido de 51,6 e os diagramas E e F aos dados de DSMU, cujo mg# do líquido é de 55.

Deste modo, as regiões dos cristais com mg# de 0,80 a 0,85 sob análise textural apresentam as composições de maior interesse para o desenvolvimento do estudo de partição dos elementos traços em DAPGG. Das análises disponíveis por ME que se adequem a esta condição, um número restrito apresenta também análises por LA-ICP-MS. Estas análises distribuem-se entre os quatro setores do dique e incluem, principalmente, resultados de centros de microcristais e bordas de macrocristais.

Quanto ao diagrama de DSMPN (Figura 73E e 73F), os valores de $mg\#_{cpx}$ que estariam em equilíbrio com $mg\#_l$ (41,3) estão entre 0,73 a 0,80. Os dados de borda apresentam mg# de 0,73 a 0,83. Isto representa cerca de 40% dos dados disponíveis (Figura 73E). Dos dados de centros, que estão inseridos no intervalo de mg# de 0,67 a 0,87, 40 % dos pontos de análise se situam no campo de equilíbrio. Estes últimos pontos são provenientes dos cristais cpx 4 e cpx 5. A análise de elementos traços por LA-ICP-MS da borda do cristal cpx 5 não resultou em um dado de qualidade satisfatória de acordo com as regras estabelecidas de avaliação de análise (subitem 6.4.). Por esse motivo, apenas o setor c2 do cristal cpx 4 fornece resultados para o estudo de coeficiente de partição de elementos traços entre clinopiroxênio e o líquido de DSMPN.

As características químicas encontradas para os setores do cpx 4 (veja Capítulo 8) vai ao encontro da tendência química dos cristais de piroxênios setorizados descritos na literatura (Skulski *et al.*, 1994; Schawandt e McKay, 2006; Lofgren *et al.*, 2006), onde, no setor mais rico em Al, Ti e Fe, há também a maior fração mássica de elementos incompatíveis. A formação dos setores é explicada ou pelo modelo em que a incorporação dos elementos depende da geometria dos protosítios que diferem entre as superfícies dos cristais (*e.g.*, Nakamura, 1973) ou ainda pela concorrência entre as taxas de crescimento do cristal e da difusão dos elementos no líquido (*e.g.*, Paterson and Stephens, 1992). Neste último caso, diz-se que a presença de zonamento setorial é um indício de desequilíbrio na cristalização (Leung, 1974; Shimizu, 1982), o que levaria a resultados equivocados no presente estudo de coeficiente de partição. No entanto, Jensen (2000) defende que o estado de equilíbrio é possível para clinopiroxênios setorialmente zonados, sendo que a incorporação de traços por ambas as zonas é controlada pelo mesmo princípio que consiste na influência da carga e do tamanho do sítio na estrutura.

Referente ao cristal cpx 4 de DSMPN, a zona setorial c2, além de indicar equilíbrio químico com o líquido através da $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$, apresenta proporção catiônica de Al^{3+} e Ti^{4+}

concordante com aquela observada na região central do cpx 5, cuja composição está também em equilíbrio com o líquido segundo a mesma avaliação. Deste modo, o presente estudo estende a discussão para a validade do cálculo do coeficiente de partição a partir de c2 tendo como ponto de partida o diagrama de Onuma.

Para o líquido de DSMB com $mg\#_l$ de 51,6, estão em equilíbrio, segundo a constante de troca catiônica de Mg^{2+} e Fe^{2+} em clinopiroxênio, as zonas cristalinas com $mg\#_{cpx}$ de 0,80 a 0,86 (Figura 74). Deste modo, são encontrados neste intervalo de equilíbrio com o líquido dados de bordas e centros de micro- e macrocristais. No entanto, o aspecto textural e a pressão relativa atuante na cristalização (Figura 74B) devem ser critérios também a considerar na seleção de zonas cristalinas para o cálculo do coeficiente de partição em DSMB. Inicialmente, o cpx A1lat formado, na verdade, por um conjunto de três cristais, tem um macrocristal com feições dos cristais da matriz. Por isso, os pontos analisados de centro deste macrocristal dentro do equilíbrio químico em foco passam a ser considerados válidos para o estudo. Este mesmo raciocínio é também aplicado aos cristais cpx F e cpx A2lat. Todavia, as outras zonas internas dos cristais A2, A3 e A4, aparentemente, em equilíbrio com o líquido final podem ser descartadas deste estudo de coeficiente. Por meio da Figura 72B, observa-se que essas zonas se cristalizaram em outro contexto físico-químico da formação do líquido estabelecido para o último estágio de cristalização de DSMB, no qual, pelo menos, há a indicação de uma condição de pressão mais alta. Assim, para DSMB, apenas dados de bordas com $mg\#_{cpx}$ de 0,80 a 0,86 foram selecionadas para os cálculos de coeficiente.

Em DSMU, o líquido de $mg\#_l$ igual a 55 se encontra em equilíbrio com zonas/cristais cujo $mg\#_{cpx}$ varie de 0,82 a 0,87 (Figura 74E). Os clinopiroxênios de DSMU são, na maioria, microcristais e constituem a matriz. Por meio do $mg\#_{cpx}$, nota-se que estão em equilíbrio com o líquido zonas centrais (37 % das análises) e regiões de borda (25% das análises), sendo que o número total de análises foi 30 e 12 para cada região, respectivamente. Dos dados disponíveis, as regiões em equilíbrio apresentam maior $mg\#$ que aquelas consideradas em desequilíbrio.

Na Figura 75, há diagramas que mostram a razão entre as frações mássicas, x , dos elementos traços i , $\frac{x_i^{cpx}}{x_i^l}$, no clinopiroxênio e no líquido nos diferentes cristais analisados dos quatro diques estudados. Estão indicados em preto os dados de composições cristalinas em equilíbrio com o líquido, de acordo como a constante $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$. Por meio destes diagramas,

é possível observar o número de dados disponíveis para o cálculo de coeficiente de partição para cada dique e a dispersão destes dados. Em DAPGG e DSMB, há o maior número de dados de zonas cristalinas em equilíbrio com o líquido para a construção de $D_i^{cpx/l}$. Já DSMU e DSMPN apresentam de 1 a 3 dados de composição de elementos traços das zonas em equilíbrio, por esse motivo, os valores de $D_i^{cpx/l}$ obtidos (veja subitem 9.3.2.) para estes dois diques possuem menor confiabilidade estatística que os de DAPGG e DSMB.

9.3.2. Coeficiente de partição e o modelo lattice Strain

9.3.2.1. Coeficiente de partição entre clinopiroxênio e o líquido, $D_i^{cpx/l}$, e o modelo Lattice Strain

O coeficiente de partição foi calculado segundo a relação, $\frac{x_i^{cpx}}{x_i^l}$, na qual foram utilizadas as frações mássicas no numerador e no denominador em ppm. Os resultados estão apresentados na Tabela 24, assim como, os respectivos desvios padrões. A quantidade de números significativos no resultado não excedeu a quantidade dos números significativos do denominador e numerador. Vale ressaltar que, quando havia mais de uma análise química efetuada numa mesma zona cristalina, foi feita a média dos valores destas análises. Os números de análises totais de elementos maiores, menores e traços utilizados na caracterização da composição em equilíbrio estão apresentados na Tabela 25. Lembra-se de que os números de análises por ME e LA-ICP-MS não diz respeito ou equivalem a área analisada, por isso não podem ser diretamente comparados a partir dos dados da tabela. Os valores em negrito correspondem a resultados cujos desvios padrões relativos estão acima de 30%, decorrentes da heterogeneidade dos elementos no cristal. No caso de $D_{Tm}^{cpx/l}$, $D_{Yb}^{cpx/l}$ e $D_{Lu}^{cpx/l}$ em DAPGG, estes resultados possuem maiores erros, já que das 14 zonas cristalinas em equilíbrio com o líquido apenas uma zona apresentou fração mássica de Tm, Yb e Lu acima do limite de quantificação da técnica analítica.

Figura 75: Diagramas multielementares de fração mássica de elementos traços, i , em clinopiroxênio dividida pela fração mássica dos mesmos elementos no líquido: x_i^{cpx}/x_i^{liq} , pares em equilíbrio; x_i^{cpx}/x_i^{liq} , pares em desequilíbrio. Os símbolos em preto são composições de regiões em equilíbrio químico dos cristais de acordo com as Figuras 73 e 74 com o líquido hospedeiro.

Tabela 24: Coeficientes de partição, $D^{cpx/l}$, de elementos traços entre clinopiroxênio e os líquidos de DAPGG, DSMB, DSMPN e DSMU. DP é o desvio padrão. Na Tabela 25, constam os números de análises utilizadas para cada corpo. Campos sem valor são de elementos que não puderam ser detectados acima do limite de quantificação e os números em negritos são valores com erros maiores.

Elementos	DAPGG		DSMB		DSMPN		DSMU	
	$D^{cpx/l}$	DP	$D^{cpx/l}$	DP	$D^{cpx/l}$	DP	$D^{cpx/l}$	DP
Sc	2,97	0,93	5,67	1,34	5,62	0,24	6,10	1,10
V	0,328	0,089	0,835	0,095	0,731	0,058	1,29	0,10
Cr	9,15	8,54	-	-	-	-	4,63	2,84
Mn	0,089	0,073	0,97	0,15	0,60	0,04	0,55	0,07
Co	0,612	0,119	0,576	0,071	0,676	0,036	0,936	0,118
Ni	1,75	0,59	-	-	-	-	2,74	0,94
Zn	0,183	0,055	0,298	0,055	0,255	0,023	0,271	0,055
Rb	0,027	0,024	-	-	-	-	0,048	0,008
Sr	0,20	0,09	0,17	0,02	0,13	0,01	0,15	0,02
Y	0,280	0,084	1,40	0,23	0,905	0,057	1,09	0,14
Zr	0,242	0,083	0,84	0,14	0,567	0,029	1,11	0,10
Nb	0,008	0,003	0,032	0,008	0,014	0,001	0,052	0,019
Cs	0,006	0,002	-	-	-	-	-	-
Ba	0,004	0,004	-	-	-	-	0,005	0,003
La	0,0964	0,0241	0,269	0,063	0,148	0,006	0,234	0,049
Ce	0,124	0,028	0,409	0,124	0,195	0,013	0,373	0,037
Pr	0,191	0,039	0,669	0,125	0,345	0,018	0,529	0,044
Nd	0,262	0,058	0,852	0,204	0,525	0,031	0,718	0,080
Sm	0,327	0,056	1,38	0,26	0,731	0,048	1,03	0,14
Eu	0,360	0,101	1,21	0,23	0,600	0,045	1,08	0,08
Gd	0,325	0,080	1,49	0,27	0,885	0,059	1,31	0,16
Tb	0,306	0,079	1,34	0,24	0,845	0,062	1,33	0,24
Dy	0,316	0,077	1,69	0,25	0,931	0,061	1,20	0,17
Ho	0,276	0,077	1,69	0,28	0,851	0,083	1,33	0,31
Er	0,286	0,077	1,40	0,17	0,838	0,075	1,06	0,22
Tm	0,418	0,052	1,27	0,21	0,746	0,087	1,35	0,19
Yb	0,276	0,027	1,52	0,37	0,939	0,112	1,07	0,14
Lu	0,208	0,014	1,33	0,23	0,721	0,108	1,37	0,14
Hf	0,447	0,127	1,69	0,31	1,01	0,10	1,93	0,42
Ta	0,029	0,009	0,15	0,05	0,047	0,006	0,21	0,03
Th	0,045	0,028	0,046	0,018	0,016	0,002	0,073	0,033
U	0,033	0,032	-	-	-	-	-	-

Tabela 25: Número total de análises realizadas nas matrizes e nas zonas cristalinas utilizadas no cálculo dos coeficientes de partição de elementos traços entre clinopiroxênio e o líquido de DAPGG, DSMB, DSMPN e DSMU.

Diques	líquido				clinopiroxênio		
	FRX	ME	ICP-MS	LA-ICP-MS	zonas em equilíbrio	ME	LA-ICP-MS
DAPGG	1	52	7	13	14	23	17
DSMB	1	0	3	0	7	11	11
DSMPN	1	0	3	0	1	2	1
DSMU	1	25	0	11	3	5	3

Das zonas que, de acordo com $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$, indicaram a relação de equilíbrio com o líquido, foi construída uma composição média (Tabela 26). Este valor foi dividido pela concentração do elemento no líquido (Tabela 19), cujo valor foi proveniente da média de n-plicatas ou de resultados da combinação de uma ou mais análises químicas realizadas em amostras ou por procedimentos diferentes (veja subitem 9.1.). O desvio padrão relativo, DPR, do coeficiente foi calculado por meio da propagação de erro para divisões: $\frac{\Delta D_i^{cpx/l}}{D_i^{cpx/l}} = \left[\left(\frac{\Delta x_i^l}{x_i^l} \right)^2 + \left(\frac{\Delta x_i^{cpx}}{x_i^{cpx}} \right)^2 \right]^{1/2}$, onde $\frac{\Delta x_i^l}{x_i^l}$ é o DPR/100 da fração mássica do elemento i no líquido e $\frac{\Delta x_i^{cpx}}{x_i^{cpx}}$ é o DPR/100 da composição do clinopiroxênio referente aos elementos i.

A representação gráfica dos coeficientes de partição de elementos traços entre clinopiroxênio e o líquido na Figura 76 permite uma melhor comparação relativa entre os dados obtidos dos quatro diques. Nota-se que o padrão de distribuição dos coeficientes nas curvas tanto no diagrama A quanto no B remete a um formato côncavo para baixo. Os maiores valores de coeficiente de partição para um dado elemento foram obtidos para DSMB e DSMU. Os valores intermediários são de DSMPN e os mais baixos, de DAPGG. Ao considerar as barras de erros, os intervalos de valores de $D_i^{cpx/l}$ se sobrepõem entre vários elementos de DSMU e DSMB, porém não entre DSMPN e DAPGG. Algumas feições das curvas são comuns aos quatro diques, por exemplo, como a existência das anomalias negativas de Nb, Zr, Eu e Hf, sendo a primeira mais acentuada. Por outro lado, a anomalia negativa de Sr não aparece em DAPGG, mas é bastante expressiva nos demais diques.

Dos dados obtidos (Tabela 24 e Figura 76), pode-se agrupar os coeficientes de partição em três diferentes grupos de acordo como grau de compatibilidade dos elementos. Os elementos compatíveis são aqueles com coeficiente acima de 1, os incompatíveis apresentam valores de $D_i^{cpx/l}$ entre 0,1 e 1 e os ultraincompatíveis, menor que 0,01. No primeiro grupo, estão os elementos Sc, Cr, Ni, V (DSMU), Y (DSMB e DSMU), Hf e os ETRs a partir do Sm em DSMB e DSMU. Dos incompatíveis, fazem parte o V, Mn, Co, Zn, Sr, Zr, Ta (DSMB e DSMU), ETRs em DAPGG e DSMPN e apenas os ETRs leves (La a Nd) em DSMB e DSMU. No grupo dos ultraincompatíveis, estão o Mn (DAPGG), Rb (DAPGG e DSMU), Nb, Cs (DAPGG), Ba (DAPGG e DSMU), Ta, Th, e U (DAPGG).

Tabela 26: Composição média de elementos maiores, menores e traços, x , das zonas em equilíbrio com o líquido (Tabela 19) dos diques DAPGG, DSMB, DSMPN e DSMU. DP é o desvio padrão.

	DAPGG		DSMB		DSMPN		DSMU	
	X	DP	X	DP	X	DP	X	DP
Óxido	% m/m							
SiO ₂	49,45	1,10	46,63	1,34	49,48	0,02	47,36	1,76
TiO ₂	2,58	0,43	3,25	0,63	2,22	0,04	2,98	0,67
Al ₂ O ₃	3,01	0,72	7,36	1,14	4,55	0,06	5,90	1,30
Cr ₂ O ₃	0,28	0,28	0,04	0,01	<LQ		0,20	0,19
FeO	7,60	0,78	7,81	0,23	8,09	0,49	6,95	0,72
MnO	0,12	0,03	0,16	0,03	0,20	0,01	0,11	0,00
MgO	13,84	0,67	12,75	0,51	12,84	0,03	13,43	0,85
CaO	23,02	0,23	21,84	0,51	22,07	0,24	22,33	0,20
Na ₂ O	0,40	0,08	0,54	0,08	0,67	0,22	0,38	0,07
Elemento	ppm							
Sc	111	35	90	21	35	1	137	14
V	137	35	245	27	122	9	270	14
Cr	1153	1060	170	278	<LQ		776	274
Co	33,0	6,0	18,1	2,2	27,0	1,3	25,1	1,1
Ni	191	61	33,8	20,6	<LQ		86,5	27,2
Zn	19,7	5,4	29,8	5,5	33,1	2,9	22,7	3,9
Rb	2,97	2,54	<LQ		<LQ		2,25	
Sr	244	103	310	27	188	9	193	8
Y	7,11	1,74	37,9	6,2	33,9	1,7	30,1	3,0
Zr	101	34	126	22	203	9	346	13
Nb	0,89	0,27	1,4	0,4	1,3	0,1	4,3	1,3
Cs	0,30	0,07	<LQ		<LQ		<LQ	
Ba	6,5	6,0	<LQ		<LQ		4,9	3,1
La	10,9	2,7	15,6	3,6	13,3	0,5	16,5	3,0
Ce	29,2	6,2	51,4	15,6	35,5	2,1	50,1	2,8
Pr	5,04	1,04	11,0	2,0	7,49	0,36	9,12	0,36
Nd	26,0	5,7	59,5	14,3	45,6	2,3	49,5	4,3
Sm	4,99	0,84	17,7	3,4	12,0	0,8	12,9	1,6
Eu	1,47	0,41	5,51	1,03	3,00	0,22	4,07	0,17
Gd	3,80	0,88	14,9	2,6	12,6	0,8	12,5	1,3
Tb	0,419	0,099	1,79	0,32	1,55	0,11	1,52	0,25
Dy	2,09	0,46	10,6	1,6	8,32	0,52	7,81	0,97
Ho	0,290	0,072	1,84	0,31	1,25	0,07	1,49	0,32
Er	0,714	0,160	3,65	0,46	2,98	0,24	2,80	0,52
Tm	0,121	-	0,389	0,064	0,335	0,036	0,431	0,042
Yb	0,443	-	2,66	0,65	2,30	0,27	2,09	0,18
Lu	0,045	-	0,343	0,058	0,245	0,034	0,368	-
Hf	4,62	1,30	6,19	1,15	8,01	0,78	13,7	2,8
Ta	0,20	0,06	0,41	0,13	0,26	0,03	1,1	0,1
Th	0,50	0,31	0,16	0,06	0,15	0,02	0,59	0,24
U	0,072	0,067	<LQ		<LQ		<LQ

Figura 76: Coeficiente de partição de elementos traços entre clinopiroxênio e a matriz de DAPGG, DSMPN, DSMB e DSMU. Estão representadas barras de erros cujo cálculo é descrito no texto.

Os pontos máximos nas curvas da Figura 76A correspondem a $D_{Hf}^{cpx/l} = 0,45$ (DAPGG), $D_{Hf}^{cpx/l} = 1,93$ (DSMU), $D_{Hf}^{cpx/l} = 1,69$ e $D_{Dy}^{cpx/l} =$ (DSMB) e $D_{Hf}^{cpx/l} = 1,01$ (DAPGG). A maior ausência de dados está entre Cs e U e, quando presentes (DSMU e DAPGG), têm os DPR mais elevados. Na figura 76B, observa-se uma oscilação de valores após o Gd, provavelmente, devido a erros experimentais, o que torna mais difícil a identificação do ponto de máximo da curva a partir dos dados apresentados. Todavia, pode-se citar do La ao Lu, o coeficiente a partir do qual, aparentemente, os valores começam a decrescer: $D_{Eu}^{cpx/l} = 0,36$ (DAPGG), $D_{Tb}^{cpx/l} = 1,33$ (DSMU), $D_{Gd}^{cpx/l} = 1,49$ (DSMB) e $D_{Gd}^{cpx/l} = 0,88$ (DSMPN). Outro parâmetro comparativo utilizado entre as curvas da Figura 76B é a razão $\frac{D_i^{cpx/l}}{D_j^{cpx/l}}$, com i e j os elementos dos extremos detectados da série dos lantanídeos, neste caso, o La e o Lu. Deste modo, os valores encontrados para $\frac{D_{La}^{cpx/l}}{D_{Lu}^{cpx/l}}$ foram 0,46 (DAPGG), 0,17 (DSMU), 0,20 (DSMB) e 0,20 (DSMPN). Se for considerada a razão $\frac{D_{La}^{cpx/l}}{D_{Er}^{cpx/l}}$ já que os coeficientes de Tm, Yb e Lu em DAPGG não constituem valores de alta confiabilidade, os valores passam a ser 0,34 (DAPGG), 0,22 (DSMU), 0,19 (DSMB) e 0,18 (DSMPN). Das características citadas dos perfis das curvas, nota-se que o comportamento dos elementos em DAPGG difere substancialmente daquele mostrado em DSMU, DSMB e DSMPN.

Estas mesmas características podem ser comparadas a de outros dados de coeficiente de partição de trabalhos experimentais de simulação de cristalização ou de análise de materiais geológicos (Figura 77). Das curvas que apresentam o $D_{Hf}^{cpx/l}$ (Figura 77A), os pontos máximos da curva são $D_{Hf}^{cpx/l} = 1,08$ (Arzamastsev *et al.*, 2009), $D_{Hf}^{cpx/l} = 0,98$ (Arzamastsev *et al.*, 2009), $D_{Hf}^{cpx/l} = 0,63$ (Thompson e Malpas, 2000), $D_{Dy}^{cpx/l} = 1,51$ (Wood e Trigila, 2001), $D_Y^{cpx/l} = 0,379$ (Green *et al.*, 2000), $D_{Hf}^{cpx/l} = 1,01$ (Adam e Green, 2003), $D_{Hf}^{cpx/l} = 1,35$ (Ubide *et al.*, 2014), $D_{Eu}^{cpx/l} = 6,5$ (Olin e Wolff, 2010), $D_{Hf}^{cpx/l} = 2,72$ (Hill *et al.*, 2000), $D_Y^{cpx/l} = 1,27$ (Blundy *et al.*, 1998), $D_{Dy}^{cpx/l} = 0,77$ (Gaetani *et al.*, 2003). Já na Figura 77B, no qual apenas constam ETRs, os pontos máximos das curvas são $D_{Gd}^{cpx/l} = 0,72$ (Arzamastsev *et al.*, 2009), $D_{Dy}^{cpx/l} = 0,59$ (Arzamastsev *et al.*, 2009), $D_{Gd}^{cpx/l} = 0,58$ (Thompson e Malpas, 2000), $D_{Gd}^{cpx/l} = 0,30$ (Foley *et al.*, 1996), $D_{Tb}^{cpx/l} = 0,97$ (Onuma *et al.*, 1968), $D_{Tb}^{cpx/l} = 0,33$ (Green

et al., 2000), $D_{Tb}^{cpx/l} = 1,06$ (Ubide *et al.*, 2014), $D_{Eu}^{cpx/l} = 6,5$ (Olin e Wolff, 2010), $D_{Ho}^{cpx/l} = 0,94$ (Hill *et al.*, 2000). Em relação à razão $\frac{D_{La}^{cpx/l}}{D_{Lu}^{cpx/l}}$, tem-se 0,32 (Arzamastsev *et al.*, 2009), 0,24 (Arzamastsev *et al.*, 2009), 0,082 (Foley *et al.*, 1996), 0,088 (Onuma *et al.*, 1968), 0,27 (Adam e Green, 2003), 0,22 (Ubide *et al.*, 2014), 0,16 (Olin e Wolff, 2010) e 0,060 (Blundy *et al.*, 1998). Das anomalias mais acentuadas observadas nas rochas estudadas neste trabalho, podem ser citadas por comparação a de Sr nos trabalhos de Arzamastsev *et al.* (2009), Wood e Trigila (2001), Ubide *et al.* (2014), Hill *et al.* (2000) e Thompson e Maplas, a de Zr em Arzamastsev *et al.* (2009), Wood e Trigila (2001), Ubide *et al.* (2014) e Green *et al.* (2000).

As composições do líquido em equilíbrio com os cristais de clinopiroxênio são indicadas nos diagramas B e D da Figura 77. Nota-se que os líquidos estão compreendidos num intervalo composicional mais estreito do que os D_i dos diagramas A e C.

O ponto de máximo na curva dos coeficientes de partição de ETR depende das condições de T, P e da composição do clinopiroxênio (Cameron e Papike, 1981; Liu *et al.*, 1992) de modo que o volume de M2 varie. Em Liu *et al.* (1992), justificou que a variação sensível de ponto máximo (~de 0,88 a 1,06Å) de incorporação de ETRs está mais relacionada à variação de pressão do sistema (~de 0 a 30 kbar) do que à de temperatura e de composição do cristal. Dos dados disponíveis das referências discutidas, não é possível verificar a correlação do tamanho do sítio cristalino com a temperatura e pressão devido à escassez de dados, já que os trabalhos de partição realizados a partir do material geológico, geralmente, ou não restringem T e P, ou estimam os valores. No entanto, nota-se que, entre os resultados das referências gerados de rochas subvulcânicas máficas e dos resultados deste trabalho, cujos últimos processos de cristalização ocorreram a profundidades rasas, os pontos de máximo de ETR variam de $D_{Eu}^{cpx/l}$ a $D_{Ho}^{cpx/l}$.

A variação de La relativo a Lu na estrutura cristalina, $\frac{D_{La}^{cpx/l}}{D_{Lu}^{cpx/l}}$, mostra se o sítio M2 passa a priorizar a incorporação de cátion com raio iônico maior ou menor dentro da série dos lantanídeos. A diminuição ou o aumento de M2-O está relacionado à variação composicional de elementos maiores e menores no cristal. Por exemplo, o conteúdo de Al^{3+} em M1, por ser um cátion de raio iônico menor que Fe^{2+} e Mg^{2+} , faz com que as ligações O-M1 e O-M2

Figura 77: Em A e C, coeficientes de partição de elementos traços entre clinopiroxênio e o líquido de DAPGG, DSMPN, DSMB, DSMU e dados da literatura. Em B, são representados dados composicionais de alguns elementos traços do líquido normalizados pelos respectivos valores no manto primitivo e, em D, estão os dados de ETRs no líquido normalizados pelos valores no condrito. Os valores normalizadores são de Dounough e Sun (1995). As abreviações são basanito/tefrito (B/T), traquiandesito basáltico (BTA), fonolito (F) e traquibasalto (TB).

- DAPGG ■ DSMPN ■ DSMU ■ DSMB
○ Olin *et al.* (1968) ■ Foley *et al.* (1996) ◇ Blundy *et al.* (1998)
◇ Green *et al.* (2000) ■ Hill *et al.* (2000) △ Thompson e Malpas (2000)
○ Wood e Trigila (2001) ◇ Gaetani *et al.* (2003) ◇ Gaetani *et al.* (2003)
▲ Arzamastsev *et al.* (2009)a ● Arzamastsev *et al.* (2009)b □ Olin e Wolff (2010)
△ Larrea *et al.* (2014)

Figura 78: Diagramas binários de A) D_{La} / D_{Er} em M2 em clinopiroxênio *versus* $Al^{3+}M1$ em apfu, B) D_{Nb} / D_{Ta} *versus* D_{Hf} / D_{Zr} em clinopiroxênio, C) D_V / D_{Ho} *versus* D_{Hf} / D_{Zr} em clinopiroxênio, D) $Cr^{3+}M1 + Al^{3+}M1 + Ti^{4+}M1 + Fe^{3+}M1$ em apfu *versus* $Al^{3+}T$ em apfu E) D_{Hf} / D_{Zr} *versus* $Cr^{3+}M1 + Al^{3+}M1 + Ti^{4+}M1 + Fe^{3+}M1$ em M1 (apfu).

diminuam (Cameron e Papike, 1981; Gaetani e Grove, 1995). Assim, há o enriquecimento no cristal de Lu relativo a La. O diagrama D_{La}/D_{Er} versus M1Al (Figura 78A) mostra essa relação com dados gerados nestes trabalhos e dos compilados da literatura, no qual é sugerida uma dependência inversamente proporcional entre os dois parâmetros, mesmo com certo grau de espalhamento.

9.3.2.1.1. Razões entre coeficientes de partição

Outras razões podem ser utilizadas para se verificar o padrão de fracionamento dos elementos entre o cristal e o líquido e inferir quais variáveis podem influenciar o padrão de partição naquele sistema (Olin e Wolff, 2010). As razões $\frac{D_Y^{cpx/l}}{D_{Ho}^{cpx/l}}$, $\frac{D_{Hf}^{cpx/l}}{D_{Zr}^{cpx/l}}$ e $\frac{D_{Nb}^{cpx/l}}{D_{Ta}^{cpx/l}}$ são pares de coeficiente de partição entre elementos HFS com comportamento parecido devido às cargas iguais e aos raios iônicos semelhantes (Olin e Wolff, 2010) ($r_Y^{VIII} = 1,019 \text{ \AA}$ x $r_{Ho}^{VIII} = 1,015 \text{ \AA}$, $r_{Hf}^{VI} = 0,71 \text{ \AA}$ x $r_{Zr}^{VI} = 0,72 \text{ \AA}$, $r_{Nb}^{VI} = 0,64 \text{ \AA}$ x $r_{Ta}^{VI} = 0,64 \text{ \AA}$; Shannon, 1976). Na Figura 78, nota-se que, para a maior parte dos resultados, o fracionamento de Nb relativo a Ta é o mesmo, ou seja, independem dos fatores físico-químicos ao qual cada sistema esteve submetido. Todavia, como este valor médio de $\frac{D_{Nb}^{cpx/l}}{D_{Ta}^{cpx/l}}$ ($\sim 0,27$) se distancia de 1, conclui-se que Nb e Ta sofrem influência das variáveis envolvidas na partição em grau diferente. Já entre Y e Ho (Figura 78C), há uma maior dispersão de dados; no entanto, os valores de $\frac{D_Y^{cpx/l}}{D_{Ho}^{cpx/l}}$ se localizam próximos de 1. Neste caso, o comportamento de partição de Y e Ho se assemelham. Em contrapartida, o fracionamento de Hf relativo a Zr varia expressamente de uma rocha para a outra (Figura 78B, 78C).

O volume do sítio M1 pode ser reduzido com o aumento da proporção de cátions com raio iônico menor que Fe^{2+} e Mg^{2+} em M1. Por exemplo, a substituição de Al^{3+} no lugar de Mg^{2+} em M1 e o aumento de Al^{3+} em T contribuem para diminuição do volume em M1 (Dal Negro *et al.*, 1984). Assim, foi verificada se a presença de cátions tais como Al^{3+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} e Ti^{4+} com raios iônicos menores que Mg^{2+} e a introdução de Al^{3+} em T estariam relacionadas com a variação de $\frac{D_{Hf}^{cpx/l}}{D_{Zr}^{cpx/l}}$, já que o raio iônico de Hf é ligeiramente menor que o de Zr. O aumento de Al^{3+} em apfu em T é acompanhado pelo aumento de cátions com carga maior que 2+ em M1

(Figura 85D). Por sua vez, no diagrama de $\text{Fe}^{3+} + \text{Cr}^{3+} + \text{Al}^{3+} + \text{Ti}^{4+}$ em M1 *versus* $\frac{D_{\text{Hf}}^{\text{cpx/l}}}{D_{\text{Zr}}^{\text{cpx/l}}}$, verifica-se uma tendência de dados que podem contribuir o comportamento de $\frac{D_{\text{Hf}}^{\text{cpx/l}}}{D_{\text{Zr}}^{\text{cpx/l}}}$. Observa-se que resultados de $\frac{D_{\text{Hf}}^{\text{cpx/l}}}{D_{\text{Zr}}^{\text{cpx/l}}} < 1$ tendem a ter valores de $\text{Fe}^{3+} + \text{Cr}^{3+} + \text{Al}^{3+} + \text{Ti}^{4+}$ menores que aqueles com $\frac{D_{\text{Hf}}^{\text{cpx/l}}}{D_{\text{Zr}}^{\text{cpx/l}}} > 1$, ou seja, julga-se que a crescente introdução de cátions com carga maior que 2+ caminhe para a ocorrência de $D_{\text{Hf}}^{\text{cpx/l}} > D_{\text{Zr}}^{\text{cpx/l}}$, porém, devido a alta dispersão de dados, acredita-se que outros fatores composicionais do cristal tenham influenciado estes resultados.

Figura 85E, ou mesmo outros condicionantes relacionados ao líquido. Em relação a $\frac{D_{\text{Nb}}^{\text{cpx/l}}}{D_{\text{Ta}}^{\text{cpx/l}}}$ de aproximadamente 0,27, fortalece-se o uso de valores de raio iônico para os dois cátions de Blundy e Wood (2003) de 0,64 Å e 0,66 Å para Nb e Ta, respectivamente, em vez de 0,64 Å e 0,64 Å de acordo com Shannon (1976). Possivelmente, o fracionamento de Ta é favorecido ao de Nb devido ao maior raio iônico apresentado pelo primeiro, já que o volume de M1 beneficia mais os cátions com raios maiores (*e.g.*, Mg^{2+} , Hf^{4+} , etc).

9.3.2.1.2. Controle do cristal versus do líquido na partição de ETR e HFSE

A partição de elementos traços ocorre em função da temperatura, pressão e da composição química do cristal e do líquido, no entanto, a distinção do efeito que cada fator exerce sobre o coeficiente de partição é uma tarefa de difícil resolução (Adam e Green, 1994). Todavia, é realizada, neste trabalho, a investigação de qual variável composicional melhor se relaciona ao comportamento de partição dos elementos ETRs e HFS entre clinopiroxênio e o líquido em DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB. Nas Figuras 79 e 80 são apresentados diagramas binários de $D_{\text{La}}^{\text{cpx/l}}$, $D_{\text{Er}}^{\text{cpx/l}}$, $D_{\text{Hf}}^{\text{cpx/l}}$ e $D_{\text{Ta}}^{\text{cpx/l}}$ *versus* proporções catiônicas média e $\text{mg\#}_{\text{cpx}}$.

A incorporação de elementos traços depende do tamanho do sítio cristalino e da presença de cátions no sistema que possam, por substituição acoplada, realizar o balanceamento de carga. O volume dos sítios M1, M2 e T se relaciona aos elementos maiores que compõem a estrutura cristalina do clinopiroxênio (Cameron e Papike, 1981; Dal Negro et al., 1984; McKay *et al.*, 1986). A incorporação de Al^{3+} em T está relacionada à entrada de elementos com carga diferente de 2+ em M1 e M2 devido ao processo de

Figura 79: Diagramas binários de D_{Er} , D_{Hf} e D_{Ta} versus $Al^{3+}T$, $Cr^{3+} + Al^{3+} + Ti^{4+} + Fe^{3+}$ no sítio M1, $Na^{+}M1$, $Al^{3+}M1$ em clinopiroxênio.

Figura 80: Diagramas binários de D_{La} , D_{Er} , D_{Hf} e D_{Ta} versus $Ca^{2+}M2$ em clinopiroxênio, $mg\#_{cpx}$, $mg\#_i$ e NBO/T .

balanço de carga. Os cátions Fe^{3+} , Al^{3+} , Cr^{3+} e Ti^{4+} , por apresentarem raios iônicos menores que Mg^{2+} e Fe^{2+} , quando em M1, promovem a diminuição deste sítio, o que, por consequência, ajustam o volume M1 para a incorporação de cátions como Ta^{5+} , Zr^{4+} e Hf^{4+} (Dal Negro *et al.*, 1984). Estas relações são observadas nos diagramas da Figura 86, nos quais uma dependência linear ocorre para os coeficientes de partição em função de TAI^{3+} e $(\text{Fe}^{3+} + \text{Al}^{3+} + \text{Cr}^{3+} + \text{Ti}^{4+})$ em M1. A incorporação de Al^{3+} em M1 diminui o volume de M1 e M2, e portanto pode estar relacionado ao aumento de ETRs pesados em M2 (Gaetani e Grovi, 1995). Por outro lado, o aumento do coeficiente de partição de toda a série dos ETRs é melhor justificada pela incorporação em T do Al^{3+} da molécula de Tschermak cálcica (Gaetani e Grovi, 1995).

O aumento de cátions Ca^{2+} e Na^+ em M2 também promovem o aumento deste mesmo sítio (Salviulo *et al.*, 1992) de forma a influenciar na partição de elementos traços entre o cristal e o líquido. Uma relação linear e positiva foi observada entre a proporção molecular de Wo e coeficiente de partição de ETRs (McKay *et al.*, 1986), porém o mesmo resultado não foi obtido por Gaetani e Grovi (1995). Nas Figura 79 e 80, é mostrado que o intervalo composicional de Na^+ e Ca^{2+} no qual a maioria dos dados está inserida é bastante limitada, de modo que a visualização da dependência linear positiva ou negativa entre as proporções catiônicas e os coeficientes de partição. Nos diagramas de D_{La} e D_{Er} versus M2Ca^{2+} , por exemplo, a contribuição deste cátion para mudança nos coeficientes de partição de La e Er entre os clinopiroxênios e o líquido de DAPGG, DSMU, DSMB e DSMU aparenta ser positiva, mas muito baixa.

Foi verificado também se o índice de diferenciação do cristal de clinopiroxênio se correlacionava linearmente com os coeficientes de partição (Figura 80). Com os dados apresentados, não se observou nenhuma tendência e sim o espalhamento dos dados em um intervalo de mg# de 70 a 85. O Si^{4+} em T seria outra opção de diferenciação a ser investigada. A quantidade deste cátion em apfu é inversamente proporcional ao Al^{3+} em T, por isso, o que se verifica é a dependência também inversamente linear entre Si^{4+} e D_i .

O modelo do líquido aluminosilicático sugere que o líquido magmático é formado por cátions (Si^{4+} , Al^{3+} , Ti^{4+} , P^{5+} e Fe^{3+}) que são coordenados tetraedricamente por oxigênio, chamados de formadores de rede, por cátions balanceadores de carga, principalmente constituídos por metais alcalinos e alcalinos terrosos, e cátions modificadores que contribuem para a despolimerização da rede tetraédrica (Mysen *et al.*, 1985). A composição de elementos maiores do líquido controla a estrutura do mesmo, onde elementos menores e traços

competem por posição (Mysen, 2004). Os elementos traços costumam desempenhar papel de cátions modificadores já devido à carga alta e/ou tamanho do raio iônico que não é comportado no poliedro de coordenação tetraédrico (Mysen, 2004).

Em Gaetani e Grovi (1995), foi encontrada uma correlação linear positiva entre D_{ETR} e o Al_2O_3 do líquido e sugerido que o aumento do Al^{3+} no líquido, por consequência, tornaria o sítio do clinopiroxênio mais rico em Al^{3+} , o que permitiria o balanço de massa da incorporação de ETRs. Neste caso, o controle de partição dos ETRs seria mais da composição do cristal do que propriamente do líquido. Esta mesma correlação foi testada para os dados utilizados neste trabalho, mas não houve a identificação de alguma tendência entre o Al^{3+} do líquido na partição dos cátions La^{3+} , Er^{3+} , Hf^{4+} e Ta^{5+} entre o clinopiroxênio e o líquido. Da mesma forma, foi verificado se o índice de diferenciação do líquido ($mg\#_l$) apresentava alguma correlação com a partição destes cátions e nenhuma tendência foi observada (Figura 80).

Correlações lineares negativas entre o NBO/T e o D_i são apresentadas em Mysen (2004) com dados de outros trabalhos. Visto que NBO/T expressa o grau de polimerização do líquido silicático, foi verificado o comportamento do coeficiente de partição frente a este parâmetro nos dados trabalhados (Figura 80). A ordem crescente de NBO/T calculado dos líquidos estudados é DSMPN (0,64), DSMU (0,67), DSMB (0,72) e DAPGG (1,33). A partir destes valores, poder-se-ia justificar em parte a discrepância dos coeficientes de partição de elementos traços entre o clinopiroxênio e o líquido de DAPGG em relação aos dos demais. Os $D_i^{cpx/l}$ de DAPGG (Tabela 76) são mais baixos que aqueles encontrados em DSMPN, DMSU e DSMB. Esta diferença, de acordo com a abordagem Schmidt *et al.* (1996), seria decorrente da baixa polimerização do líquido de DAPGG que tende a particionar mais ETRs e HFSE do que o líquido DSMPN, DMSU e DSMB. Todavia, esta mesma informação somente não explicaria os valores intermediários de $D_i^{cpx/l}$ entre DSMB e DAPGG, já que NBO/T de DSMB é maior que de DSMPN. Na Figura 80, nota-se que, entre dos resultados de $D_{La}^{cpx/l}$, $D_{Er}^{cpx/l}$, $D_{Hf}^{cpx/l}$ e $D_{Ta}^{cpx/l}$ e seus respectivos de NBO/T do líquido, não houve correlação linear entre os dados obtidos neste trabalho. Em Mysen (2004), a dispersão de dados no diagrama NBO/T versus $D_{Mn}^{olivina/líquido}$ definem a forma de L. Mesmo assim, ressalta-se que o NBO/T melhor expressa a influência da composição e estrutura do líquido em D_i que o parâmetro $mg\#_l$.

No balanceamento dos cátions Al^{3+} e Fe^{3+} na coordenação tetraédrica na estrutura do líquido silicático, quando $K^+ + Na^+ < Al^{3+}$, $Al^{3+} - (K^+ + Na^+)$ do alumínio remanescente é

balanceado por metais alcalinos terrosos. No entanto, complexos de aluminato de metais alcalinos são mais estáveis que os complexos de aluminato de metais de alcalinos terrosos (Mysen *et al.*, 1981). Por este motivo, procurou-se verificar se, com o aumento da razão $(K^+ + Na^+) / Al^{3+}$ em proporção catiônica no líquido, há a diminuição dos coeficientes de partição dos ETRs e HFSE entre o clinopiroxênio e o líquido (Figura 81). Apesar da baixa correlação linear, observa-se que há um comportamento decrescente de D_i conforme ocorre o aumento da razão $(K^+ + Na^+) / Al^{3+}$ no líquido. Este resultado mostra que o aumento de Al^{3+} no líquido como aluminato de metais de alcalinos terrosos, por ser mais instável que o aluminato de metais alcalinos, permite que mais Al^{3+} seja incorporado pelo cristal, de modo que este possa influenciar na partição de ETRs e HFSE.

O processo de partição de elementos traços entre duas fases englobam muitas variáveis que dificilmente são isoladas e, por extensão, dificilmente as contribuições dos seus efeitos são quantificadas. Além deste aspecto, os dados obtidos foram confrontados aos da literatura e, neste último caso, não é possibilitado o conhecimento de todos os passos metodológicos utilizados nos estudos e de fontes de erros. Por essas razões, as discussões realizadas neste trabalho quanto à influência do mineral ou do líquido na partição de elementos entre clinopiroxênio e o líquido tem caráter qualitativo e não quantitativo. Das observações realizadas, pode-se notar que tanto cristal quanto o líquido parecem controlar o comportamento dos elementos durante a cristalização do clinopiroxênio no líquido. Foi constada a importância da entrada de Al^{3+} no sítio T que possibilita o balanço de carga na incorporação de ETRs e HFSEs. Foi também inferido que é a composição do cristal que regula o tamanho dos sítios M1 e M2 e auxilia na incorporação seletiva de elementos traços por tamanho de raio iônico. Já a composição e a estrutura do líquido parecem influenciar pela afinidade que ETRs e HFSEs apresentam por líquidos menos polimerizados e pela estabilidade maior ou menor de Al^{3+} no líquido.

Como anteriormente descrito, os coeficiente de partição de elementos traços entre o clinopiroxênio e o líquido de DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB se inserem no campo dos

Figura 81: Diagramas binários de coeficiente de partição de Y, La, Gd, Er, Hf, Zr, Nb e Ta entre o clinopiroxênio e o líquido *versus* $(K^+ + Na^+)/Al^{3+}$ (com os termos em apfu).

dados da literatura. A composição dos materiais de partida dos trabalhos consultados varia entre basanito/tefrito a fonolito (Olin e Wolff, 2010) e traquiandesito basáltico (Onuma *et al.*, 1968), ou seja, de composições máficas a intermediárias e félsicas, predominando as máficas. À primeira vista, os dados de $D_i^{cpx/l}$ de DSMU, DSMPN e DSMB se assemelham aos de Ubide *et al.* (2014) e Wood e Trigila (2001), por exemplo (Figura 77). Já os dados de DAPGG se assemelham aos de Foley *et al.* (1996) e Green *et al.* (2000), também pela ausência da anomalia negativa em $D_{Sr}^{cpx/l}$ (Figura 77).

Nas Figuras de 77 a 80, os dados de Ubide *et al.* (2014) se localizam próximos aos dos resultados obtidos no presente trabalho, são provenientes também de uma amostra de rocha subvulcânica classificada como basanito/tefrito, assim como DSMU, DSMPN e DSMB. Por outro lado, os coeficientes de partição de Wood e Trigila (2001) foram gerados por meio de simulação em laboratório a partir de uma composição de traquibasalto rico em K e Al e a 2 kbar, ou seja, a uma pressão um pouco acima daquela inferida para o processo de cristalização das matrizes de DSMU, DSMB e DSMPN. Neste caso, apesar da variável composicional ser o ponto mais contrastante, o controle cristalino do clinopiroxênio na partição de elementos traços evidenciado neste trabalho é também inferido em Wood e Trigila (2001).

Em Foley *et al.* (1996), os resultados de D_i foram gerados sem a apresentação de um controle minucioso de regiões dos cristais que estavam em equilíbrio com o líquido. Embora a rocha em Foley *et al.* (1996) se classifique também como tefrito/basanito, apenas o formato da curva nos diagramas A e B da Figura 9.2 se assemelha ao de DAPGG, pois os D_i deste último apresentam valores superiores aos encontrados no primeiro. Dos coeficientes de partição em Green *et al.* (2000), os ETRs pesados são correspondentes aos respectivos de DAPGG. O sistema, em Green *et al.* (2000), com composição basanítica/tefrítica hidratada, foi levado à pressão 30 vezes maior que aquela inferida para o último estágio de cristalização de DAPGG.

9.3.2.1.3. Partição de elementos em cristal com zonamento setorial

Na Figura 82, são apresentados os dados de $\frac{x_i^{cpx}}{x_i^l}$ tanto para o setor c1 quanto para o setor c2 do cpx 4 de DSMPN. O setor c1 é mais enriquecido em elementos traços, tendo, subsequentemente, os maiores valores de $\frac{x_i^{cpx}}{x_i^l}$. Este é o setor do cristal também mais rico em Al^{3+} , Fe_{total} e Ti^{4+} . Por meio desta informação e das discussões realizadas no subitem anterior,

fica evidente que o aumento da razão para elementos traços é acompanhado pela incorporação de mais Al^{3+} em T em relação ao setor c2.

Outra característica importante entre os resultados obtidos para os dois setores observada na Figura 82 é que ambos mostram o mesmo padrão e anomalias. Segundo Jensen (2000), a semelhança de padrão entre os dois setores mostra que o mecanismo dominante ou critério de seleção de elementos pelas duas diferentes formas do clinopiroxênio em crescimento é o mesmo: controle por carga e tamanho de raio iônico. A variação de fração mássica de elementos traços entre os dois setores é explicada pela diferença de geometria dos protosítios em cada face e, neste caso, estabelece que este processo ocorra nas condições de equilíbrio químico (Nakamura, 1973; Jensen, 2000). A diferença de geometria dos protosítios é indicada na Figura 83, no diagrama de $D_i^{cpx/liq}$ versus raio iônico. Nesta, a curva que integra os dados de cada setor apresenta ponto máximo em um tamanho de raio iônico diferente ($r_{setor\ C1} = 1,035 \text{ \AA}$ e $r_{setor\ C2} = 1,030 \text{ \AA}$). Estes valores de raio iônico são equivalentes ao tamanho do sítio cristalino no qual os ETRs são incorporados (Onuma *et al.*, 1968).

A variação do tamanho do sítio é também evidenciada na razão $\frac{D_{La}^{cpx/l}}{D_{Lu}^{cpx/l}}$, sendo 0,17 no setor c1 e 0,20 no setor c2. O aumento de afinidade de M2 por ETRs pesados em c1 é acompanhada por uma singela diminuição da soma Na + Ca em apfu em relação à mesma soma em c2, efeito também relatado em Salviulo *et al.* (1992). Assim, o Na+Ca pode ser um dos fatores controladores do tamanho de M2 em cpx 4 de DSMPN.

Por fim, mesmo que o processo de partição de elementos traços no setor c1 siga os critérios determinados pelo modelo *lattice Strain* (seletividade de acordo com a carga e raio o elemento ingressante ao cristal), apenas o dado de coeficiente de partição gerado a partir de c2 é utilizado neste trabalho. Além do setor c1 não estar incluso no campo de equilíbrio de acordo com $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$, este é o setor de crescimento cristalino mais rápido. Por esses motivos, optou-se em apenas utilizar dados de c2 de modo a não se distanciar dos critérios inicialmente propostos.

Figura 82: Coeficiente de partição de elementos traços entre as zonas c1 e c2 do cristal cpx 4 de DSMPN e o líquido. Este cristal apresenta zonamento setorial, sendo que c1 corresponde a zona mais rica de Al, Ti e Fe e c2 mais rica em Si e Mg.

Figura 83: Diagrama de Onuma: coeficiente de partição de ETRs entre clinopiroxênio cpx 4 e o líquido de DSMPN versus raio iônico (r) em Å.

9.3.2.1.4. Aplicação do modelo *Lattice Strain* em dados de clinopiroxênio

O diagrama de Onuma (Onuma *et al.* 1968) é uma abordagem que prevê o comportamento de partição de uma série isoeletrônica em função do raio iônico. Na Figura 93A, 94A, 95A e 96A, os coeficientes de partição das séries isoeletrônicas 1+, 2+, 3+, 4+ obtidos entre o clinopiroxênio e o líquido para DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB e que ocupam o sítio M2 do clinopiroxênio estão correlacionados ao tamanho do raio iônico. O mesmo procedimento foi empregado para os íons que ocupam o sítio M1 para as séries isoeletrônicas 2+, 3+, 4+ e 5+ (Figura 84B, 85B, 86B e 87B). Os íons em M2 apresentam número de coordenação VIII e, em M1, VI e seus respectivos valores de raio iônico foram baseados em Shannon (1976), com exceção de Nb e Ta (Wood e Blundy, 2003).

Observa-se que os íons de cada série isoeletrônica se dispõem um ao outro formando uma parábola com a concavidade para baixo. Esta forma é mais bem representada pela série isoeletrônica dos ETRs em M2 (Figura 84A, 85A, 86A, 87A). Ao traçar uma linha incluindo os dados de partição dos elementos de uma série, o ponto máximo da curva formada condiz com o tamanho ótimo do sítio cristalino. O máximo de duas ou mais curvas coincide quando os elementos constituintes das curvas envolvidas ocupam o mesmo tipo de sítio cristalino no mineral. Como os ETRs se alocam também no sítio M2 do clinopiroxênio, o máximo da curva dos elementos Mn, Ca, Sr e Ba concorda com o da curva dos ETRs, por exemplo. No entanto, o valor do coeficiente de partição dos ETRs é inferior ao de Ca. A partição em clinopiroxênio de íons 3+ em um sítio que alocaria um cátion 2+ causa uma tensão no retículo cristalino de forma que a penalidade energética e a necessidade que outros íons neutralizem o excesso de carga influenciam no grau de compatibilidade destes íons no cristal (Blundy e Woody, 2003).

O modelo quantitativo *Lattice Strain* desenvolvido por Wood e Blundy (1994) baseado na equação de Brice (1975) foi aplicado à partição de elementos traços entre clinopiroxênios e líquidos de DAPGG, DSMPN, DSMU e DSMB. Este modelo prediz em maior ou menor grau o comportamento de partição dos elementos traços conforme o diagrama de Onuma. A partir dos dados do diagrama de $D_i^{cpx/l}$ (dados experimentais) de uma série isoeletrônica de carga 3+ *versus* raio iônico em Å, dois procedimentos foram aplicados. O primeiro consiste no ajuste da curva originada pela equação (1) da Tabela 27 nos dados experimentais. Foram escolhidos valores para os parâmetros D_0^{3+} , E_{M2}^{3+} e r_0 da

Figura 84: Diagrama de Onuma e ajuste do modelo *Lattice Strain* pela equação (1) da Tabela 27 aos dados experimentais de partição de elementos traços entre o clinopiroxênio e o líquido de DAPGG. A) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{\text{cpx/l}}$, versus raio iônico em $\text{\AA}$ (r) de elementos no sítio cristalino M2; B) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{\text{cpx/l}}$, versus raio iônico em $\text{\AA}$ (r) de elementos no sítio cristalino M1. A curva tracejada indica que o modelo *Lattice Strain* não pode ser devidamente ajustado devido a falta de dados de elementos com aquela carga elétrica.

Figura 85: Diagrama de Onuma e ajuste do modelo *Lattice Strain* pela equação (1) da Tabela 27 aos dados experimentais de partição de elementos traços entre o clinopiroxênio e o líquido de DSMPN. A) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{cpx/l}$ versus raio iônico em Å (r) de elementos no sítio cristalino M2; B) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{cpx/l}$, versus raio iônico em Å (r) de elementos no sítio cristalino M1. A curva tracejada indica que o modelo *Lattice Strain* não pode ser devidamente ajustado devido a falta de dados de elementos com aquela carga elétrica.

Figura 86: Diagrama de Onuma e ajuste do modelo *Lattice Strain* pela equação (1) da Tabela 27 aos dados experimentais de partição de elementos traços entre o clinopiroxênio e o líquido de DSMU. A) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{\text{cpx/l}}$, versus raio iônico em $\text{\AA}$ (r) de elementos no sítio cristalino M2; B) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{\text{cpx/l}}$, versus raio iônico em $\text{\AA}$ (r) de elementos no sítio cristalino M1. A curva tracejada indica que o modelo *Lattice Strain* não pode ser devidamente ajustado devido a falta de dados de elementos com aquela carga elétrica.

Figura 87: Diagrama de Onuma e ajuste do modelo *Lattice Strain* pela equação (1) da Tabela 27 aos dados experimentais de partição de elementos traços entre o clinopiroxênio e o líquido de DSMB. A) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{cpx/l}$, versus raio iônico em Å (r) de elementos no sítio cristalino M2; B) Diagrama coeficiente de partição, $D_i^{cpx/l}$, versus raio iônico em Å (r) de elementos no sítio cristalino M1. A curva tracejada indica que o modelo *Lattice Strain* não pode ser devidamente ajustado devido a falta de dados de elementos com aquela carga elétrica.

Tabela 27: Equação geral (1) de cálculo do coeficiente de partição de elementos traços entre o cristal e a fase líquida do modelo Lattice Strain. Equações de cálculo dos parâmetros r_0 de M2, E_{M2} e D_0 na incorporação de elementos terras raras e Y no sítio M2 de clinopiroxênio. X se refere a fração do elemento no sítio indicado, P é a pressão em GPa, T é a temperatura em K, $mg\#_{liq}$ é o índice do líquido, R é a constante dos gases e NA é o número Avogadro.

N°	Equação	Referência
1	$D_i = D_0 \exp \left\{ \frac{-4\pi E_{M2} N_A \left[\frac{r_0}{2} (r_i - r_0)^2 + \frac{1}{3} (r_i - r_0)^3 \right]}{RT} \right\}$	Wood e Blundy, 1997
2	$r_0 = 0,974 + 0,067X_{Ca}^{M2} - 0,051X_{Al}^{M1}$	
3	$E_{M2}^{3+} = 318,6 + 6,9P - 0,036T$	
4	$D_0^{3+} = \frac{mg\#_{liq}}{X_{Mg}^{M1}} e^{\left(\frac{88750 - 65,644T + 7050P - 770P^2}{RT} \right)}$	

equação com a temperatura fixada de acordo com a Tabela 23 de modo que a curva gerada pela equação se aproximasse dos dados experimentais. O segundo procedimento foi baseado em Wood e Blundy (1997) e é direcionado ao elementos com carga 3+ que substituem o sítio M2 do clinopiroxênio. Neste, os parâmetros D_0^{3+} , E_{M2}^{3+} e r_0 foram calculados por meio das equações desenvolvidas por Wood e Blundy (1997) que parte, principalmente, da composição do cristal. Assim, dados de D_i entre o clinopiroxênio e o líquido foram calculados empregando-se D_0^{3+} , E_{M2}^{3+} e r_0 na equação (1) da Tabela 27. A aplicação dos dois procedimentos permite a comparação de D_i e dos parâmetros obtidos por cada um deles. O primeiro procedimento foi também empregado as outras séries isoeletricas que ocupam os sítios M1 e M2 dos clinopiroxênios.

O r_0 representa o raio iônico ótimo de um íon incorporado na estrutura; E representa o módulo de Young ou de elasticidade, e está relacionado às propriedades elásticas do sítio quando um íon de tamanho diferente de r_0 é incorporado no mesmo e é diretamente proporcional à carga do cátion; e D_0 expressa o valor do coeficiente quando um íon é incorporado no sítio sem causar tensão no retículo cristalino devido ao tamanho do raio iônico ótimo (Wood e Blundy, 1997). Inicialmente, no primeiro procedimento, r_0^{M1} e r_0^{M2} foram otimizados de forma de fossem coincidentes para todas as séries isoeletricas que são incorporadas em cada sítio cristalino. Este procedimento vai ao encontro do realizado em Adam e Green (2003), no qual cada série isoeletrica apresentou seu próprio $r_{0,M}^{n+}$. Em M1, este ajuste foi realizado, principalmente, por meio das séries 2+, 4+ e 5+ e, em M2, pela série 3+, já que apresentam maior abundância de dados ou que os dados, facilmente, descrevem uma parábola. Os parâmetros D_0^{n+} e E_{M2}^{n+} que influenciam na altura e largura da curva, respectivamente, foram ajustados visando incorporar com preferência os dados experimentais dos cátions com camada de valência fechada ou dos menos sujeitos ao efeito do campo cristalino.

Ter conhecimento do estado de oxidação dos cátions estudados naquele sistema é primordial para um ajuste mais realista; todavia, alguns elementos podem estar presentes em um ou mais estado de oxidação. A quantidade de Fe^{2+} do Fe_{total} foi calculada segundo o cálculo da fórmula estrutural do clinopiroxênio (veja Capítulo 8). Em Zanetti *et al.* (2004), foi inferido que, possivelmente, todo o V teria carga 4+ no sistema estudado (basanítico a aproximadamente QMF-2), com o dado de D_V , porém para a olivina, mais próxima da curva

dos cátions 4+ do que dos cátions com carga 3+ ou 5+ no diagrama de Onuma. Como este comportamento é também observado nas Figuras de 93 a 96, foi adotado a carga 4+ para o V.

Os parâmetros das curvas (equação (1) – Tabela 27) ajustadas aos dados experimentais obtidos estão na Tabela 28. O tamanho ótimo dos raios iônicos, ou o tamanho dos sítios M1 e M2 seguem a seguinte ordem: $r_0^{M2}(\text{DSMPN}) < r_0^{M2}(\text{DSMB}) < r_0^{M2}(\text{DSMU}) < r_0^{M2}(\text{DAPGG})$ e $r_0^{M1}(\text{DAPGG}) < r_0^{M1}(\text{DSMPN}) = r_0^{M1}(\text{DSMB}) < r_0^{M2}(\text{DSMU})$. Observa-se que $E_{M2}^{1+} < E_{M2}^{2+} < E_{M2}^{3+} < E_{M2}^{4+}$, como foi predito em Wood e Blundy (1997) e observado em Adam e Green (2003). No sítio M1, pela quantidade insuficiente de dados, E_{M1}^{3+} não pôde ser estimado. Assim, foi adquirida a seguinte relação $E_{M1}^{2+} < E_{M1}^{4+} < E_{M1}^{5+}$. Esta última tendência foi também registrada em Adam e Green (2003). $D_{0,M1}^{3+}$, pela falta de dados, foi estimado sem fornecer um valor confiável. O mesmo caso ocorreu para $D_{0,M2}^{1+}$ em DSMPN e DSMB. A relação encontrada para $D_{0,M}^{n+}$ foi $D_{0,M2}^{4+} < D_{0,M2}^{1+} < D_{0,M2}^{3+} < D_{0,M2}^{2+}$ (exceto em DAPGG, onde $D_{0,M2}^{3+} < D_{0,M2}^{1+}$) e $D_{0,M1}^{5+} < D_{0,M1}^{4+} < D_{0,M1}^{2+}$.

Já no segundo procedimento, a primeira etapa empregada foi o cálculo dos parâmetros D_0^{3+} , E_{M2}^{3+} e r_0 para os ETRs e Y de acordo com as equações de Wood e Blundy (1997). Assim, a partir destes parâmetros, pode-se calcular o coeficiente de partição por meio da equação (1) (Tabela 27). O r_0 foi obtido em Å através da relação (2) da Tabela 27 para M2 em clinopiroxênios. O tamanho do sítio M2 é dependente da quantidade de Ca^{2+} em M2 e de Al^{3+} em M1. O primeiro expande o volume do respectivo sítio e o segundo contrai. Como o raio iônico dos ETRs trivalentes se assemelham ao do Ca^{2+} , piroxênio mais cálcico tem maior facilidade em incorporar tais elementos traços (Wood e Blundy, 1997). O módulo elasticidade, E, relacionado às propriedades elásticas do sítio, é um parâmetro independente da composição segundo o modelo e o E_{M2}^{3+} foi calculado pela equação (3) da Tabela 27 em GPa. O D_0^{3+} que é obtido pela equação (4) (Tabela 27). O termo $\text{mg}\#_l$ indica a dependência do coeficiente de partição com a composição do líquido. Finalmente, a equação (1) foi aplicada junto aos parâmetros D_0^{3+} , E_{M2}^{3+} e r_0 calculados (Tabela 27), com R igual a $8,314 \times 10^{21} \text{ Å}^3 \cdot \text{GPa} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ e a temperatura de acordo com a Tabela 23.

A forma da distribuição dos pontos calculados se assemelha ao dos dados experimentais (Figura 97 e 98), porém estão deslocados a D_i mais elevados em DAPGG e menos elevados em DSMU e DSMB. Esta disparidade também foi observada em Gaetani *et al.* (2003) em sistemas hidratados. As equações para o cálculo de D_0^{3+} , E_{M2}^{3+} e r_0^{M2} (Wood e

Blundy, 1997) foram desenvolvidas pela calibração de dados obtidos de sistemas anídro, por esse motivo, a influência da água no grau de polimerização não foi contabilizada. Nota-se que os dados experimentais de D_{M2}^{3+} de DSMPN se assemelham aos dos D_{M2}^{3+} previstos de acordo com a aplicação das equações de Wood e Blundy (1997), principalmente, para os ETRs leves. Dos diques analisados, DSMPN apresenta menor conteúdo de voláteis (LOI: 0,99%).

O r_0^{M2} observado e o calculado (Tabela 28) apresentam valores próximos em DSMB e DSMU, porém diferem, consideravelmente, em DSMPN e DAPGG. Segundo o ajuste efetuado da equação geral do modelo *Lattice Strain* e a razão $\frac{D_{La}^{cpx/l}}{D_{Er}^{cpx/l}}$, conforme r_0^{M2} diminui, cresce o coeficiente do ETRs mais pesados comparados aos mais leves (Tabela 29). Este mesmo comportamento é observado nos dados calculados. O tamanho do sítio cristalino de M2, de acordo com a equação (2) da Tabela 27, depende da quantidade de Ca^{2+} em M2 e Al^{3+} em M1. No entanto, outros fatores podem influenciar o r_0^{M2} , mesmo em menor grau, e não são introduzidos na equação: X_{Na} em M2, proporção de cátions com raio iônico menor que Fe^{2+} e Mg^{2+} em M1 e M2, proporção de Fe^{2+} em M1 e M2 relativo à Mg^{2+} que quando aumenta, também aumenta o volume do sítio alocado e etc (Cameron e Papike, 1981). O maior r_0^{M2} constatado pelo ajuste da equação geral do *Lattice Strain* de DAPGG em relação ao calculado pode ser justificado, em parte, pela proporção de Na^+ em M2, não considerado na equação (2). Frente às diversas variáveis composicionais e físicas atuantes no controle do volume dos sítios cristalinos, as causas que geram a diferença entre os valores de r_0^{M2} observado e calculado (Tabela 28) não podem ser concluídas neste trabalho.

A altura da curva calculada é a feição que mais se destoa da curva gerada pelos dados experimentais nos diagramas de Onuma (Figuras 88 e 89). Esta variação pode ser proveniente da inexatidão dos valores de pressão e temperaturas empregados na equação (4) da Tabela, e/ou devido ao efeito de estrutura e composição do líquido, não priorizado no modelo do *Lattice Strain*.

Tabela 28: Valores dos parâmetros r_0 , E^{n+} e D_0^{n+} calculados de acordo com as equações da Tabela 27 e os parâmetros obtidos segundo o ajuste da equação (1) nos dados experimentais. O r_0 está em Å, E em GPa e D_0 é adimensional.

Parâmetros	DAPGG	DSMU	DSMPN	DSMB
r_0^{M2}	1,055	1,034	1,025	1,03
E_{M2}^{1+}	18	8	-	-
$D_{0,M2}^{1+}$	0,36	0,13	0,42?	0,18?
E_{M2}^{2+}	130	110	160	150
$D_{0,M2}^{2+}$	2,4	2	4	3,5
E_{M2}^{3+}	350	310	280	280
$D_{0,M2}^{3+}$	0,34	1,35	0,9	1,5
$r_0^{M2 \text{ calc.}}$	1,035	1,032	1,031	1,03
$E_{M2}^{3+ \text{ calc.}}$	269	268	269	269
$D_{0,M2}^{3+ \text{ calc.}}$	0,74	0,74	0,68	0,85
E_{M2}^{4+}	340	340	340	340
$D_{0,M2}^{4+}$	0,05	0,08	0,02	0,05
r_0^{M1}	0,66	0,667	0,665	0,665
E_{M1}^{2+}	1400	1800	1400	1740
D_{M1}^{2+}	5,5	7	8	6,4
E_{M1}^{3+}	-	-	-	-
$D_{0,M1}^{3+}$	8,8?	6,3?	7,5?	7,8?
E_{M1}^{4+}	2140	2060	2170	2540
$D_{0,M1}^{4+}$	1,3	4	2,5	5
E_{M1}^{5+}	17000	11500	12000	12000
$D_{0,M1}^{5+}$	0,03	0,24	0,05	0,17

Tabela 29: Razão D_{La}/D_{Er} calculado pelo método de Wood e Blundy (1997) e observado dos dados experimentais de DAPGG, DSMU, DSMB e DSMPN.

D_{La}/D_{Er}	DAPGG	DSMU	DSMPN	DSMB
Calculado (Wood e Blundy 1997)	0,24	0,22	0,21	0,20
Experimental	0,34	0,22	0,18	0,19

Figura 88: Diagrama de Onuma (Onuma *et al.*, 1968) - coeficiente de partição para os cátions com carga 3+ que é incorporado no sítio M2 do clinopiroxênio, $D_i^{cpx/l}$, versus o raio iônico em Å. São mostrados $D_i^{cpx/l}$ obtidos experimentalmente para DAPGG e DSMU, valores calculados a partir a composição do cristal e do mg# do líquido (Wood e Blundy, 1997) e valores resultantes do ajuste aos dados experimentais da curva gerada pela equação (1) da Tabela 27.

Figura 89: Diagrama de Onuma (Onuma et al., 1968) - coeficiente de partição para os cátions com carga 3+ que é incorporado no sítio M2 do clinopiroxênio, $D_i^{cpx/l}$, versus o raio iônico em $\text{\AA}$. São mostrados $D_i^{cpx/l}$ obtidos experimentalmente para DSMPN e DSMB, valores calculados a partir a composição do cristal e do mg# do líquido (Wood e Blundy, 1997) e valores resultantes do ajuste aos dados experimentais da curva gerada pela equação (10) da Tabela 9.1.

Ao considerar que os cristais de clinopiroxênio de DAPGG foram formados a uma pressão mais baixa referente aos cristais de clinopiroxênio dos demais diques, a mudança do valor da pressão empregado na equação (34) constituiria uma alternativa. No entanto, a diminuição da pressão de 0,1 GPa a 10^{-5} GPa (~ 1 atm) ainda não reduziria a altura da curva calculada o bastante para se igualar à curva observada. Já o aumento independente da temperatura de 1393 a 1593 K levaria ao resultado esperado. No entanto, em trabalhos experimentais, nos quais cristais de clinopiroxênio se formaram a partir de líquido de composição basanítica a 0,5 GPa (Green e Adam, 2003) e a 1,5 GPa (LaTourrette *et al.*, 1995), a temperatura máxima não ultrapassou 1298 K e 1423 K, respectivamente. Deste modo, a temperatura, por si só, não poderia ser a justificativa da disparidade entre D_0^{3+} calculado e observado.

Em DMSU e DSMB, o aumento da pressão de 0,1 a 1 GPa aumentaria a curva calculada até a altura dos dados experimentais no diagrama de Onuma (Figuras 88 e 89). Por outro lado, a diminuição de 100 K nos dois sistemas também resultaria na mudança de altura da curva calculada para a altura dos resultados observados. No diagrama de DSMPN (Figura 98), por sua vez, as duas curvas seriam equivalentes com mudanças menos drásticas nas variáveis físicas aplicadas: a diminuição de 50 K na temperatura estipulada ou o aumento para 0,5 GPa na pressão aplicada.

O efeito da estrutura do líquido na partição de elementos traços entre o clinopiroxênio e o líquido foi observado em Green *et al.* (2000), Gaetani *et al.* (2003) e Kessel *et al.* (2015). Em Gaetani *et al.* (2003), obteve-se resultados de D_i para clinopiroxênio cristalizado em um líquido de composição peridotítica $D_{ETR}^{cpx/l}$ próximos daqueles calculados pelo método Wood e Blundy (1997). Neste sistema, os cristais de clinopiroxênio se formaram a 1,2 GPa, 1315 °C e com conteúdo de água no sistema de 0,98 % m/m. Discute-se, nesse trabalho, que a quantidade de água a pressão estabelecida é o suficiente para alterar o coeficiente de partição. Por esse motivo, passaram a considerar que algumas das amostras usadas na calibração em Wood e Blundy (1997) poderiam ter ainda algum conteúdo de água. A relação entre as curvas com dados observados e calculados no diagrama de Onuma, assim como a quantidade de água/voláteis, para DSMPN e para Gaetani *et al.* (2003) é bastante similar. No entanto, os litotipos estudados devem constituir rochas relativamente ricas em CO₂ (Hirose, 1997; Lowenstern, 2001). Além disso, parte dos voláteis sofre exsolução do magma e podem escapar do sistema durante a ascensão e/ou na colocação do magma. Por esses motivos, não

há o controle da quantidade de voláteis que compunha os sistemas de DSMPN, DAPGG, DSMU e DSMB durante a cristalização do clinopiroxênio, como também, a composição dos voláteis.

O controle da estrutura e composição do líquido na partição de elementos traços é descrito no Capítulo 2 e parte discutido no subitem 9.3.2.1.2. A solubilidade de H₂O e CO₂ no líquido silicático depende da P, T, viscosidade e tensão superficial do magma e da mobilidade dos voláteis no líquido (Nowak *et al.*, 2003). No entanto, H₂O e CO₂ praticamente não alteram a estrutura aniônica do líquido silicático, mas sim quando presentes na forma de OH⁻ e CO₃²⁻, sendo que o primeiro aumenta e o segundo diminui NBO/T (Mysen, 1983). Apesar da solubilização destes gases aumentar com a pressão (Mysen *et al.*, 1975; Mysen e Cody, 2004), a presença das espécies aniônicas OH⁻ e CO₃²⁻ já foram observadas em líquidos silicáticos a baixas pressões (Mysen, 1983).

Tem-se que $D_{0,M2}^{3+}$ observado de DAPGG desvia mais de $D_{0,M2}^{3+}$ calculado entre os diques estudados. Neste caso, a contribuição de OH⁻ e CO₃²⁻ pode ocorrer, mas não é possível estimá-la e compará-la entre diques já que não foram realizadas medidas das porcentagens de H₂O e CO₂, constituintes do LOI. Por outro lado, é evidente na Figura 80 que o maior valor de NBO/T é uma propriedade que diferencia DAPGG de DSMPN, DSMB e DSMU. Concomitantemente, a razão K+Na/Al no líquido configura um importante controle na partição de elementos traços nos clinopiroxênios estudados.

No caso de DSMPN, sugere-se que as condições químicas e físicas atuantes na cristalização do clinopiroxênio em equilíbrio com o líquido em DSMPN sejam próximas ou compatíveis às dos dados que auxiliaram na construção do método de Wood e Blundy (2007). Por fim, as diferenças entre os parâmetros calculados e observados em DAPGG, DSMU e DSMB se devem 1) aos principais efeitos de estrutura e composição do líquido não expressos pelo mg# do líquido (equação (4), Tabela 27), 2) a outros fatores relacionados à influência da química mineral na partição de elementos traços entre as duas fases coexistentes e, de forma subordinada, 3) a erros relativos aos valores de temperatura e pressão inferidos para os quatro sistemas.

9.3.2.2. Coeficiente de partição entre olivina e o líquido, $D_i^{ol/l}$, e o modelo *Lattice Strain*

A verificação de zonas ou cristais de olivina de DSMU e DSMB em equilíbrio com o líquido a partir de $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ trouxe o questionamento quanto ao grau de difusão que, possivelmente, elementos maiores, menores e traços tenham experimentado nestes cristais do processo de cristalização até os dias de hoje. A análise por meio de $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$ indica que os cristais de DSMB estão em equilíbrio com o líquido, diferentemente, do que ocorre entre os cristais de olivina e o líquido de DSMU. Por isso, neste texto, o cálculo da razão entre as frações mássicas do elemento i na olivina e no líquido de DSMU, para comparações, é referido como $\frac{x_i^{ol}}{x_i^{l'}}$, já que a condição de equilíbrio que integra a definição de $D_i^{ol/l} = \frac{x_i^{ol}}{x_i^l}$ não é obedecida.

Além do método pela constante de equilíbrio $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$, o equilíbrio pode ser verificado também por meio dos elementos traços (Olin e Wolff, 2010). Todavia, este propósito é alcançado quando é possível quantificar na olivina e no líquido ETRs ou Mg, Ca e Sr que correspondem ao comportamento predito pelo modelo *Lattice Strain* (Wood e Blundy, 1997).

Um número restrito das razões $\frac{x_i^{ol}}{x_i^{l'}}$ ou $D_i^{ol/l}$ pôde ser calculado a partir das olivinas (Tabela 30 e 31), pois elementos tais como ETRs se apresentaram abaixo do limite de quantificação da técnica analítica para os cristais analisados. Por esse motivo, a ausência de dados de $\frac{x_i^{ol}}{x_i^l}$ e $\frac{x_i^{ol}}{x_i^{l'}}$ para o Sr e ETRs dificulta o emprego do modelo *Lattice Strain* para verificar a validade do cálculo de $D_i^{\alpha/\beta}$ entre as fases α e β . O método adotado em Olin e Wolff (2010) visa constatar por meio da normalização da equação que relaciona D_0^{n+} , E^{n+} e r_0 a $D_i^{\alpha/\beta}$ (equação (1) - Tabela 27) se a troca catiônica de elementos traços entre as duas fases foi controlada pela carga e raio dos cátions disponíveis no sistema e do sítio catiônico como previsto pelo modelo.

Com o propósito de comparar os dados de $D_i^{ol/l}$ de DSMB aos dados de $\frac{x_i^{ol}}{x_i^{l'}}$ de DSMU e ainda discutir a condição de equilíbrio, foram construídos diagramas de Onuma (Onuma *et al.*, 1968) e apresentados na Figura 90. Enfatiza-se que, para esta verificação, a razão $\frac{x_i^{ol}}{x_i^{l'}}$ de i entre os grãos de olivina de DSMU e o líquido foi calculada para borda e para o centro do cristal, como a média dos dados disponíveis de cada zona (Tabela 32). Nas olivinas de DSMB, foi considerada em uma única média entre os dados do centro e das regiões mais periféricas

Figura 90: Diagrama de Onuma - dados experimentais de partição, $D_i^{ol/l}$, dos elementos i entre a olivina e o líquido de DSMB em (A) versus o raio iônico em $\text{\AA}$. Razão entre as frações mássicas dos elementos i na borda da olivina e no líquido em (B) e no centro da olivina e no líquido de DSMU em (C) versus raio iônico em $\text{\AA}$. Neste texto, $x_i^{ol} / x_i^{l'}$ simboliza pares em desequilíbrio químico.

Figura 30: Coeficientes de partição, D_i , dos elementos i entre a olivina e o líquido para DSMB e a razão x_i^{ol}/x_i^{li} em DSMU. São apresentados os desvios padrões, cujo cálculo está descrito no texto.

Elementos	DSMB		DSMU - borda		DSMU - centro	
	D_i	DP	x_i^{ol}/x_i^{li}	DP	x_i^{ol}/x_i^{li}	DP
Na	0,0029	0,0001	0,004	0,001	0,0049	0,0009
P	-	-	0,099	0,022	0,086	0,044
Ca	0,023	0,002	0,033	0,006	0,019	0,004
Sc	0,248	0,019	0,200	0,039	0,154	0,027
Ti	0,0062	0,0003	0,007	0,001	0,004	0,001
V	0,011	0,001	0,026	0,006	0,032	0,009
Mn	2,90	0,11	1,49	0,22	1,04	0,21
Cr	-	-	1,897	1,236	2,504	1,407
Co	3,0	0,159	5,681	0,801	5,509	0,816
Ni	-	-	42,7	8,7	75,1	13,4
Zn	2,21	0,09	1,11	0,19	1,03	0,17
Y	0,011	0,001	-	-	-	-

Tabela 31: Número total de análises realizadas nas matrizes e nas zonas cristalinas utilizadas no cálculo do coeficiente de partição entre olivina e o líquido de DSMB e x_i^{ol}/x_i^{li} de elementos menores ou traços entre as regiões centrais (c) e a borda (b) de olivina e o líquido de DSMU.

Diques	líquido				olivina		
	FRX	ME	ICP-MS	LA-ICP-MS	zonas em equilíbrio	ME	LA-ICP-MS
DSMB	1	0	3	0	4	7	12
DSMU (b)	1	25	0	11	-	23	13
DSMU (c)					-	29	17

Tabela 32: Composição média de elementos maiores, menores e traços das olivinas em equilíbrio com o líquido de DSMB e das zonas centrais e de borda da olivinas de DSMU. DP é do desvio padrão. Os óxidos estão em % m/m e os traços em ppm. x é a composição dos cristais de olivina em equilíbrio com o líquido de DSMB e x' representa a composição dos cristais de olivina de DSMU que estão em desequilíbrio com o respectivo líquido.

Amostra Local (cristal)	DSMU Borda		DSMU Centro		DSMB Centro e borda	
Óxido / % mm ⁻¹	X'	DP	X'	DP	X	DP
SiO ₂	39,97	0,28	40,34	0,29	38,57	0,19
FeO	14,34	0,40	12,14	0,78	22,53	0,08
MnO	0,23	0,02	0,16	0,03	0,49	0,02
MgO	45,19	0,52	47,13	0,79	39,37	0,06
CaO	0,38	0,05	0,21	0,04	0,00	0,00
NiO	0,17	0,03	0,30	0,04	0,22	0,02
Elementos	ppm					
Na	118	17	139	11	72	1
Ni	1350	206	2374	277	38	5
Co	152	12	148	13	93	5
Zn	93,1	12,7	86,7	10,3	221	8
V	5,5	1,1	6,7	1,9	3,2	0,3
Cr	318	132	420	106	<LQ	
Sc	4,5	0,6	3,5	0,3	3,9	0,3
Ti	149	21	95	22	154	7
P	196	32	171	84	>LQ	

dos cristais, já que estes são quimicamente homogêneos. A quantidade de análises de elementos maiores e menores está fornecida na Tabela 31. A propagação de erro do cálculo

de $\frac{x_i^{ol}}{x_i^l}$ utilizada foi $\frac{\Delta D_i^{cpx/l}}{D_i^{cpx/l}} = \left[\left(\frac{\Delta x_i^l}{x_i^l} \right)^2 + \left(\frac{\Delta x_i^{cpx}}{x_i^{cpx}} \right)^2 \right]^{1/2}$, onde $\frac{\Delta x_i^l}{x_i^l}$ é o DPR/100 da fração mássica do elemento i no líquido e $\frac{\Delta x_i^{cpx}}{x_i^{cpx}}$ é o DPR/100 da composição da olivina com referência aos elementos/cátions i.

Na produção da curva do tipo parábola que integre os resultados de uma série isoelétrica apresentados na Figura 91, foi dada preferência aos dados de cátions que correspondem melhor à partição controlada por carga e tamanho de raio iônico. Neste caso, na série dos cátions bivalentes, apenas o Ca^{2+} e o Mg^{2+} seriam prioridades. Já a curva da série de cátions trivalentes e/ou tetravalentes foi acomodada de acordo com a posição r_0 da curva de cátions bivalentes. Neste caso, as curvas foram traçadas com o auxílio de *Lattice Strain* para efeito de comparação de tendência entre os dados de DSMU e DSMB.

Nota-se na Figura 90 que a disposição dos dados de $D_i^{ol/l}$ tanto de DSMU e DSMB é semelhante, salvo o do $D_V^{ol/l}$. Pela presença de $D_{Sc}^{ol/l}$ em DSMB, foi possível traçar a curva da série isoelétrica 3+, ao contrário de DSMU. Os pontos relacionados a Mn, Co, Fe e Zn se dispõem abaixo da curva da série 2+ nos três diagramas. No ajuste da curva, os raios iônicos ótimos, r_0^M , apresentam valores de 0,710 Å e 0,730 Å para os dados de centros e bordas em DSMU, respectivamente, e de 0,730 Å para os de DSMB. O $D_p^{ol/liq}$ não é indicado no diagrama já que, devido ao seu raio iônico de 0,38 Å (VI) é distribuído no sítio T.

Na Figura 91, notam-se algumas feições semelhantes entre D_i de DSMB e $\frac{x_i^{ol}}{x_i^l}$ de DSMU como a anomalia positiva do Ca e a negativa do V. DSMB não apresenta os valores de D_{Ni} , D_{Cr} e D_p e a anomalia positiva do Co demonstrada pelas outras duas curvas. O grau de compatibilidade ou incompatibilidade dos elementos demonstrados das três curvas é bastante semelhante. No entanto, observa-se que a partir do D_{Sc} há certa inversão, e os elementos de DSMB passam a ser menos compatíveis que os de DSMU obtidos entre as bordas de olivina e o líquido. No geral, em DSMB, os elementos Mn, Co e Zn são classificados como compatíveis nos cristais de olivina com D_i maior que 1. Os incompatíveis com D_i entre 0,1 e 1 são representados por Ca, Sc, V e Y. Os elementos Na e Ti perfazem o grupo dos ultraincompatíveis. Quanto aos desvios padrões relativos (DPR), estes ficaram entre 2,5 e 11,6

% em DSMB e entre 14,1 e 65,1% em DSMU, sendo o maior valor deste último caso correspondente ao DPR do D_{Cr} entre a borda e líquido. Os DPR com valores acima de 25 % se encontram em negrito na Tabela 30.

Assim, a partir dos diagramas de Onuma, a distribuição de elementos traços entre cristais e o líquido de DSMU responde à diferença de carga e tamanho de raio iônico comparavelmente ao observado em DSMB. Esta sugestão e o resultado obtido pelo método $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$, pode indicar que as bordas dos cristais de olivina de DSMU estão próximos do equilíbrio

Na Figura 92, são comparados dados de $D_i^{ol/l}$ obtidos no presente estudo e da literatura. Tanto os dados de coeficiente de partição de DSMB quanto os valores de $\frac{x_i^{ol}}{x_i^l}$ estão contidos no intervalo de valores formados pelos outros trabalhos. Porém, nota-se que a feição das curvas de DSMU se assemelha mais das demais curvas que de DSMB. Os resultados de DSMU apresenta maior concordância com os de Foley *et al.* (2011) e com os de Adam e Green (2006) para os elementos do Ni, Cr, Mn, Co, Zn e Sc. Já os dados $D_i^{ol/l}$ de DSM estão mais próximos de Adam e Green (2006) do Mn, Co, Zn e Sc (exceto para $D_{Co}^{ol/l}$) e do basanito de Foley *et al.* (2011) para os elementos V, Ca e Ti.

Figura 91: Coeficiente partição de elementos traços entre a olivina e o líquido de composição basanítica de DSMB. São também representados os dados da razão entre as frações mássicas dos elementos i na borda da olivina e no líquido e no centro da olivina e no líquido de DSMU, x_i^{ol}/x_i^l .

Figura 92: Coeficientes de partição de elementos traços entre olivina e líquido em diversos sistemas. São representadas também as razões formadas pelos pares composicionais dos elementos i (na olivina e no líquido) de DSMU, x_i^{ol}/x_i^l .

10. Considerações Finais

O estudo de partição de elementos traços em rochas incide no desenvolvimento de discussões inerentes ao trabalho em sistemas naturais. O tema enfrenta questões sobre os desafios da obtenção de um parâmetro em meio das complexidades químicas e minerais do material estudado. O dado de coeficiente de partição de elementos traços entre a olivina e o clinopiroxênio e o líquido basanítico foi alcançado após laboriosa etapa experimental e da avaliação profunda dos dados químicos e de mineral adquiridos.

Dado que o coeficiente de partição relaciona duas fases em equilíbrio, duas perguntas nortearam o desenvolvimento do trabalho: “qual é a composição do líquido no estágio de colocação do corpo em ambiente crustal raso?” e “qual região cristalina está em equilíbrio com o líquido?”. Inicialmente, a primeira questão levou a seleção de métodos analíticos que pudessem auxiliar na aquisição de tal resposta. Estudos da variação composicional e modal em seções transversais de um *sill* (Larrea *et al.*, 2012; Ubide *et al.*, 2012) foram de extrema importância para tomada de decisão quanto a metodologia adotada.

Trabalhos recentes mostraram o papel de xenocristais/antecristais no zonamento químico de pequenos corpos (Larrea *et al.*, 2012; Ubide *et al.*, 2012; Menezes *et al.*, 2015) e evidenciaram a importância da subtração das populações destes cristais da composição de rocha total para a obtenção da composição do líquido. Deste modo, optou-se, no presente estudo, na execução de duas metodologias experimentais a fim de averiguar os graus de eficiência de cada uma. O processo de catação manual de macrocristais em fragmentos de rocha entre 200 e 80 mesh para seleção de matriz é um procedimento que requer longo período de trabalho, mas que mostrou bons resultados para as amostras de DSMPN e DAPGG. Sua eficácia parece estar relacionada a visibilidade dos macrocristais em meio da matriz em função da granulometria e hábito cristalino. Por outro lado, a aplicação da análise direta da matriz por técnicas como ME e LA-ICP-MS indicou ser uma alternativa rápida, mas que é dependente da granulometria da matriz e da homogeneidade da mesma em micro escala (melhores resultados para matriz bastante fina e bem homogênea). A avaliação dos resultados alcançados foi baseada, principalmente, na variação da mineralogia normativa e da fração mássica dos elementos traços entre a matriz analisada e a de rocha total.

Acrescenta-se que o reconhecimento do zonamento mineralógico dos diques estudados culminou no uso de amostra de borda, pobre em macrocristais máficos, como

representativa da composição do líquido de DSMB. Nos demais diques (DAPGG, DSMU e DSMPN), uma ou a combinação das metodologias aplicadas trouxeram resultados satisfatórios para constituir a composição do líquido dos respectivos corpos.

Neste estudo, a averiguação da qualidade dos dados analíticos assegurou a confiabilidade dos resultados utilizados. Destaca-se o uso ora decisivo de ferramentas estatísticas na seleção dos dados químicos que vieram contribuir para a composição representativa do líquido de cada dique. O desvio padrão relativo de n-plicatas na análise direta, por exemplo, auxiliou na investigação da homogeneidade das matrizes.

A composição dos líquidos obtidos, assim como a composição de rocha global do diques, é classificada como basanito, sendo ultrabásicos e potássicos. O grau de enriquecimento de incompatíveis no líquido varia de 5 a 1000 vezes o manto primitivo e 10 a 500 vezes o condrito em relação aos ETRs.

A análise direta de cristais é um método rápido e que permite acessar a variação composicional de cristais com zonamento complexo. No entanto, apesar deste aspecto facilitador, a resposta da segunda pergunta norteadora não foi atingida diretamente devido à presença de diferentes zonas químicas em clinopiroxênio e a maior instabilidade da olivina no sistema via processo de difusão química. Por esse motivo, algumas ferramentas foram utilizadas para encontrar os pares em equilíbrio cristal/líquido ou zona cristalina e líquido. A constante de equilíbrio de troca catiônica $Mg^{2+}-Fe^{2+}$, $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$, entre o cristal e o líquido obtida por equações desenvolvidas em Kushiro e Walter (1994) e Putirka (1999) consistiu a estratégia principal deste estudo para a constatação da condição de equilíbrio. O aspecto textural entre cristal e matriz também contribuiu de forma significativa juntamente a avaliação composicional na detecção dos pares em equilíbrio.

A partir da avaliação de equilíbrio, verificou-se que os cristais de olivina de DSMU não se encontram em equilíbrio com a matriz do dique. Em contrapartida, de acordo com o uso de $K_D^{Mg^{2+}-Fe^{2+}}$, foi constatado o equilíbrio químico entre os cristais de olivina e o líquido de DSMB. Os cristais de olivina estudados de DSMB são apontados com integrantes de um microxenocristal (Alves, 1997). Tendo em vista esta particularidade e ausência de zonamento químico nestes cristais, assume-se que estes cristais passaram por processo de reequilíbrio com o líquido hospedeiro.

Por fim, os coeficientes de partição calculados entre o clinopiroxênio e o líquido permitiram que um estudo mais detalhado quanto ao controle estrutural e químico do mineral e do líquido fosse realizado no comportamento de partição dos elementos traços. Dentro desta discussão, os aspectos encontrados mais relevantes foram a influência positiva do Al^{3+} no sítio T na incorporação de HFSE na estrutura do clinopiroxênio e o grau de polimerização do líquido que quanto menor, mais inibe a partição de HFSE na fase cristalina. A estabilidade de Al^{3+} em sítios tetraedros nos líquidos por metais alcalinos (K^+ e Na^+) indicaram também inibição da incorporação de HFSE no cristais de clinopiroxênio. Assim, frente à constatação do controle estrutural e químico do líquido na partição de elementos traços nas amostras estudadas, foi justificada a discrepância entre os dados experimentais de D_i e aqueles obtidos pelo modelo *Lattice Strain*, segundo as equações de Wood e Blundy (1997), já que naquele estudo é subestimada a contribuição do líquido no processo de partição.

O grau de compatibilidade dos elementos traços estudados no clinopiroxênio varia de um dique para o outro. Os ETRs, a partir do Sm, são compatíveis nos clinopiroxênios de DSMU e DSMB, porém são incompatíveis nos mesmos minerais em DSMPN e DAPGG. No geral, os elementos Cr, Ni, V e Y são compatíveis e o Mn, Co, Zn, Sr, Zr e Ta são incompatíveis. Como ultraincompatíveis em clinopiroxênios, foram observados, por exemplo, o Ba, Nb, Cs e Rb. Na olivina, Mn, Ni, Co e Zn são compatíveis, o Sc é incompatível e os elementos Na, Ca, P, Y, V e Ti são ultraincompatíveis. Os dados de coeficiente de partição obtidos para os cristais de olivina e clinopiroxênio em basanitos se encontram no intervalo de valores da literatura e se assemelham a alguns coeficientes também estudados em basanitos.

11. Referências

- ADAM, J., GREEN, T.H., 1994. The effects of pressure and temperature on the partitioning of Ti, Sr and REE between amphibole, clinopyroxene and basanitic melts. *Chemical Geology*, 117: 219-233.
- ADAM, J., GREEN, T. 2003. The influence of pressure, mineral composition and water on trace element partitioning between clinopyroxene, amphibole and basanitic melts. *Eur. J. Mineral.*, 15: 831-841.
- ADAM, J., GREEN, T., 2006. Trace element partitioning between mica- and amphibole-bearing garnet lherzolite and hydrous basanitic melt: 1. Experimental results and the investigation of controls on partitioning behaviour. *Contrib Mineral Petrol*, 152: 1–17.
- AIKAWA, N., KUMAZAWA, M., TOKONAMI, M., 1985. Temperature dependence of intersite distribution of Mg and Fe in olivine and the associated change of lattice parameters. *Phys Chem Minerals*, 12:1- 8.
- AKININ, V.V., SOBOLEV, A.V., NTAFLIS, T., RICHTER, W., 2005. Clinopyroxene megacrysts from Enmen melanephelinitic volcanoes (Chukchi Peninsula, Russia): application to composition and evolution of mantle melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150: 85–101.
- ALVES, F. R., 1997. Contribuição ao conhecimento geológico e petrológico das rochas alcalinas da ilha de Búzios, SP. Universidade do São Paulo: Tese de doutoramento.
- ALVES, F. R., GOMES, C. B., 2001. Ilha dos Búzios, litoral norte do estado de São Paulo: aspectos geológicos e petrológicos. *Revistas do Instituto de Geociências – USP*, 1: 101-114.
- AOKI, K. I., KUSHIRO, I., 1968. Some Clinopyroxenes from ultramafic inclusions in Dreiser Weiher, Eifel. *Contr.Mineral. And Petrol.*, 18: 326-337.
- ALBAREDE, F., BOTTINGA, Y., 1972. Kinetic disequilibrium in trace element partitioning between phenocrysts and host lava. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 36: 141-156.
- ALMEIDA, V. V., 2009. 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. Universidade de São Paulo, dissertação de Mestrado.
- ANDRADE, S., ULBRICH, H. H., GOMES, C. B., MARTINS, L., 2014. Methodology for the Determination of Trace and Minor Elements in Minerals and Fused Rock Glasses with Laser Ablation Associated with Quadrupole Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-Q-ICPMS). *American Journal of Analytical Chemistry*, 05: 701-721.
- ARZAMASTSEV, A.A., ARZAMASTSEVA, L.V., BEA, F., MONTERO, P., 2009. Trace Elements in Minerals as Indicators of the Evolution of Alkaline Ultrabasic Dike Series: LA-ICP-MS Data for the Magmatic Provinces of Northeastern Fennoscandia and Germany. *Petrology*, 17: 46–72.
- ASIMOW P.D., GHIORSO M.S., 1998. Algorithmic Modifications Extending MELTS to Calculate Subsolidus Phase Relations. *American Mineralogist*, 83: 1127-1131.
- AZZONE, R. G., 2008. Petrogênese do maciço alcalino máfico-ultramáfico de Ponte Nova. Universidade de São Paulo, tese de doutorado.

- AZZONE R.G., ENRICH G.E.R., GOMES C.B., RUBERTI E. 2013. Trace element composition of parental magmas from mafic-ultramafic cumulates determined by in situ mineral analyses: The Juquiá mafic-ultramafic alkaline-carbonatite massif, SE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 41:5-21.
- AZZONE, R. G., RUBERTI, E., ROJAS, G. E. E., GOMES, C.B., 2009. Geologia e geocronologia do maciço alcalino máfico-ultramáfico Ponte Nova (SP-MG). *Revista do Instituto de Geociências –USP*, 9: 23-46.
- BANNO, S., MATSUI, Y., 1973. On the formulation of partition coefficients for trace elements distribution between minerals and magma. *Chemical Geology*, 11: 1- 15.
- BEATTIE, P., 1994. Systematics and energetics of trace-element partitioning between olivine and silicate melts: Implications for the nature of mineral/melt partitioning. *Chemical Geology*, 117: 57-71.
- BEATTIE, P., DRAKE, M., JONES, J., LEEMAN, W., LONGHI, J., MCKAY, G., NIELSEN, R., PALME< H., SHAW, TAKAHASHI, E., WATSON, B., 1993. Terminology for trace-element partitioning. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57, 1605 – 1606.
- BECCALUVA, L., BARBIERI, M., BORN, H., BROTZU, P.,COLTORTI, M., CONTE, A., GARBARINO, C., GOMES, C. B., MACCIOTTA, G., MORBIDELLI, L., RUBERTI, E., SIENA , F., TRAVERSA, G., 1991, Fractional Crystallization and Liquid Immiscibility Processes in the Alkaline-Carbonatite Complex of Juquiá (Sao Paulo, Brazil). *Journal o Petrology*, 33: 1371-1404.
- BÉRDARD, J.H., 2005. Partitioning coefficients between olivine and silicate melts. *Lithos*, 83: 394–419.
- BÉRDARD, J.H., 2007. Trace element partitioning coefficients between silicate melts and orthopyroxene: Parameterizations of D variations. *Chemical Geology*, 244: 263–303.
- BÉRDARD, J.H., 2014. Parameterizations of calcic clinopyroxene - Melt trace element partition coefficients, *Geochem. Geophys.Geosyst.*, 15: 303–336.
- BIRLE, J. D., GIBBS, G. V., MOORE, P. B., SMITH, J. V., 1968. Crystal structures of natural olivines. *The American mineralogist*, 53: 807-828.
- BLUNDY, J., DALTON, J., 2000. Experimental comparison of trace element partitioning between clinopyroxene and melt in carbonate and silicate systems, and implications for mantle metasomatism. *Contrib Mineral Petrol*, 139: 356-371.
- BLUNDY, J., E WOOD, B., 1991. Crystal-chemical controls on the partitioning of Sr and Ba between plagioclase feldspar, silicate melts, and hydrothermal solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*: 55, 193-209.
- BLUNDY, J., WOOD, B., 1994. Prediction of crystal-melt partition coefficients from elastic moduli. *Nature*, 372: 452-454.
- BLUNDY, J., WOOD, B., 2003. Partitioning of trace elements between crystals and melts. *Earth and Planetary Science Letters*, 210: 383-397.
- BRETT, R. C., RUSSELL, J. K., MOSS, S., 2009. Origin of olivine in kimberlite: Phenocryst or impostor? *Lithos*, 112S: 201–212.
- BRICE, J. C., 1975. Some thermodynamic aspects of the growth of strained crystals, *J. Cryst. Growth*, 28: 249-253.

- BROTZU, P., MELLUSO, L. d'AMELIO, F., LUSTRINO, M., 2005. Potassic dykes and intrusions of the Serra do Mar Igneous Province (SE Brazil). In: Comin-Chiaramonti e Gomes (eds.) Mesozoic to Cenozoic Alkaline magmatism in the Brazilian platform. Edusp/Fapesp, pp. 443-472.
- BURNS, R.G., 1970. Crystal field spectra and evidence of cation ordering in olivine minerals. *Am. Mineral.*, 55: 1624- 1632
- BURNS, R. G., 1972. Site preferences of Ni^{2+} e Co^{2+} in clinopyroxene and olivine: limitations of the statistical approach. *Chem. Geol.*, 9: 67-73.
- BURNS, R. G., W. S. FYFE, W. S., 1967. Trace element distribution rules and their significance. *Chem. Geol.*, 2: 89 -104.
- BUTLER, O. T., COOK, J. M., HARRINGTON, STEVE J. HILL, S. H., RIEUWERTS, J., MILES, D. L., 2007. Atomic spectrometry update. *Environmental analysis. J. Anal. At. Spectrom.*, 22: 187–221.
- CAMERON, M., PAPIKE, J. J., 1981. Structural and chemical variations in pyroxenes. *American Mineralogist*, 66: 1-50.
- CHARLIER, B.L.A., WILSON, C.J.N., LOWENSTERN, J.B., BLAKE, S., VAN CALSTEREN, P.W., DAVIDSON, J.P., 2005. Magma generation at a large, hyperactive silicic volcano (Taupo, New Zealand) revealed by U–Th and U–Pb systematics in zircons. *Journal of Petrology*, 46: 3–32.
- COLSON, R. O., MCKAY, G. A., TAYLOR, L. A., 1989. Charge balancing of trivalent trace elements in olivine and low-Ca pyroxene: A test using experimental partitioning data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53: 643-648.
- COMIN-CHIARAMONTI E GOMES (Eds.), 2005. Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform. Edusp/Fapesp.
- CORGNE, A., ARMSTRONG, L. S., KESHAV, S., FEI, Y., MCDONOUGH, W. F., MINARIK, W. G., MORENO, K. 2012. Trace element partitioning between majoritic garnet and silicate melt at 10–17 GPa: Implications for deep mantle processes. *Lithos*, 148: 128 - 141.
- DAL NEGRO, A., CARBONIN, S., DOMENEGHETTI, C., MOLIN, G. M., CUNDARI, A., PICCIRILLO, E. M., 1984. Crystal chemistry and evolution of the clinopyroxene in a suite of high pressure ultramafic nodules from the Newer Volcanics of Victoria, Australia. *Contrib Mineral Petrol*, 86:221-229.
- DALTON J.A., WOOD B.J. 1993. The compositions of primary carbonate melts and their evolution through wallrock reaction in the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 119:511-525.
- DASGUPTA, H. C., 1972. Site preferences of Ni^{2+} and Co^{2+} in clinopyroxene and olivine: a statistical study. *Chemical Geology*, 9: 57-65.
- DAVAL, D., TESTEMALE, D., RECHAM, N., TARASCON, J.-M., SIEBERT, J., MARTINEZ, I., GUYOT, F., 2010. Fayalite (Fe_2SiO_4) dissolution kinetics determined by X-ray absorption spectroscopy. *Chemical Geology*, 275: 161–175.
- DAVIDSON, J. P., MORGAN, D. J., CHARLIER, B. L. A., HARLOU, R., HORA, J. M., 2007. Microsampling and isotopic analysis of igneous rocks: implications for the study of magmatic systems. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35: 273 – 311.

- DEDAVID, B. A., GOMES, C. I., GIOVANNA MACHADO, G., 2007. Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras (Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores). EDIPUCRS: Porto Alegre. 60p.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J., 1978. Rock-forming minerals: single-chain silicates. Vol.2A. 2ª ed. Longman London and New York, Estados Unidos. 668p.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J., 1982. Rock-forming minerals: orthosilicates. Vol.1A. 2ª ed. Longman London and New York, Estados Unidos. 668p.
- DE HOOG, J. C. M., GALL, L., CORNELL, D. H., 2010. Trace-element geochemistry of mantle olivine and application to mantle petrogenesis and geothermobarometry. *Chemical Geology*, 270: 196 – 215.
- DE LA ROCHE, H., LETERRIER, J., GRANDCLAUDE, P. & MARCHAL, M., 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R_1 , R_2 -diagrams and major element analysis—its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology* 29,183–210.
- DENTON, A. R., ASHCROFT, N. W., 1991. Vegard's Law. *Physical Review A*, 43: 3161 - 3164.
- DENOYER, E. R., FREDDEN, K. J., HAGER, J. W., 1991. Laser solid sampling for inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytical Chemistry*, 63: 445- 457.
- DIWAKAR, P. K., GONZALEZ, J. J., HARILAL, S. S., A RICHARD E. RUSSO, R. E., HASSANEIN, A., 2014. Ultrafast laser ablation ICP-MS: role of spot size, laser fluence, and repetition rate in signal intensity and elemental fractionation. *J. Anal. At. Spectrom.*, 29: 339-346.
- DOSTAL, J., OWEN, J. V., 1998. Cretaceous alkaline lamprophyres from northeastern Czech Republic: geochemistry and petrogenesis. *Geologische Rundschau*, 87: 67-77.
- DUDA, A., SCHMINCKE, H., -U., 1985. Polybaric differentiation of alkali basaltic magmas: evidence from green-core clinopyroxenes (Eifel, FRG). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 91:340-353.
- EBDON, L., FISHER, A. S., BETTI, M., LEROY, M., 2003. Detection methods for quantitation of trace elements. Contido em *Comprehensive analytical chemistry*, v. 41: Sample preparation for trace element analysis. Editado por Mester, Z. e Sturgeon, R. Elsevier B.V., Holanda.
- ENZWEILER, J., 2010. Conceitos básicos de avaliação de resultados analíticos. Texto didático da disciplina Geoquímica Analítica (GE 117). Instituto de Geociências - Universidade de Campinas.
- EVANS, T. M., O'NEILL, H. ST. C., TUFF, J., 2008. 1 The influence of melt composition on the partitioning of REEs, Y, Sc, Zr and Al between forsterite and melt in the system CMAS. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 5708–5721.
- FALEIROS F.M., PAVAN M., 2013. Geologia e Recursos Minerais da Folha Eldorado Paulista – SG-22-X-B-XI, estado de São Paulo, Escala: 1:100.000. São Paulo, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, CPRM.
- FERGUSON, R. B., 1974. A cation-anion distance-dependent method for evaluating valence-bond distributions in ionic structures and results for some olivines and pyroxenes. *Acta Cryst.*, B30: 2527-2539.
- FITTON, J. G., UPTON, B. G. J. (ed.), 1987. Alkaline igneous rocks. Londres: The Geological Society by Blackwell Scientific Publications. p. 568.

- FOLEY, S. F., JACKSON, S. E., FRYER, B. J., GREENOUGH, J.D., JENNER, G. A., 1996. Trace element partition coefficients for clinopyroxene and phlogopite in alkaline lamprophyre from Newfoundland by LAM- ICP-MS. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 629-638.
- FOLEY, S. F., JACOB, D., E., O'NEIL, H. ST., 2011. Trace element variations in olivine phenocrysts from Ugandan potassic rocks as clues to the chemical characteristics of parental magmas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 162: 1 – 20.
- FOLEY, S. F., PREVELIC, S., REHFELDT, T., JACOB, D., 2013. Minor and trace elements in olivines as probes into early igneous and mantle melting processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 363: 181–191.
- GAETANI, G., GROVE, T., 1995. Partitioning of rare earth elements between clinopyroxene and silicate melt: Crystal-chemical controls. *Geochimica et Cosmochimica Acta*: 59, 1951- 1962.
- GAETANI, G. A., KENT, A. J. R., GROVE, T. L., HUTCHEON, I. D., STOLPER, E. M., 2003. Mineral/melt partitioning of trace elements during hydrous peridotite partial melting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145: 391-405.
- GALLAHAN, W. E., NIELSEN, R. L., 1992. The partitioning of SC, Y, and the rare earth elements between high-Ca pyroxene and natural mafic to intermediate lavas at 1 atmosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56: 2387-2404.
- GARDA, G. M., 1995. Os diques básicos e ultrabásicos da região costeira entre as cidades de São Sebastião e Ubatuba, Estado de São Paulo. Universidade de São Paulo, tese de doutorado.
- GARDA, G. M., Schorscher, J.H.D., 1996. Os diques costeiros básicos e ultrabásicos adjacentes ao Canal de São Sebastião (litoral norte do Estado de São Paulo) *Revista do IG*, 17:7-31.
- GAST, P. W., 1968. Trace element fractionation and the origin of tholeiitic and alkaline magma types *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 32: 1057-1086.
- GHIORSO, MARK S., AND SACK, RICHARD O. (1995) Chemical Mass Transfer in Magmatic Processes. IV. A Revised and Internally Consistent Thermodynamic Model for the Interpolation and Extrapolation of Liquid-Solid Equilibria in Magmatic Systems at Elevated Temperatures and Pressures. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119, 197-212.
- 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.
- GIRNIS, A. V., BULATOV, V. K., BREY, G. P., GERDES, A., HÖFER, H. E., 2013. Trace element partitioning between mantle minerals and silico-carbonate melts at 6–12 GPa and applications to mantle metasomatism and kimberlite genesis. *Lithos*, 160–161: 183–200.
- GOLDSCHMIDT, V. M., 1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *Chem. Sac.*, 655-673.
- GOMES, C. B. (ed.), 1984. Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia. Ed. Edgard Blücher, São Paulo. 218 p.
- GONZÁLEZ, A. G., HERRADOR, A. M., 2007. A practical guide to analytical method validation, including measurement uncertainty and accuracy profiles. *Trends in Analytical Chemistry*, 26: 227- 238.

- GREEN, T.H., BLUNDY, J. D., ADAM, J., YAXLEY, G. M., 2000. SIMS determination of trace element partition coefficients between garnet, clinopyroxene and hydrous basaltic liquids at 2–7.5 GPa and 1080–1208°C. *Lithos*, 53: 165–187.
- GREEN, T.H., PEARSON, N.J., 1985. Rare earth element partitioning between clinopyroxene and silicate liquid at moderate to high pressure. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 91:24-36
- GREEN, D. H., RINGWOOD, A. E., 1967. The stability fields of aluminous pyroxene peridotite and garnet peridotite and their relevance in upper mantle structure. *Earth and Planetary Science Letters*, 3, 1967, 151-160.
- HAASE, C. S., CHADAM, J., ORTOLEVA, P, FEINN, D., 1980. Oscillatory Zoning in Plagioclase Feldspar. *SCIENCE*, 209: 272-274.
- HAZEN, R. M., 1976. Effects of temperature and pressure on the crystal structure of forsterite. *American Mineralogist*, 61: 1280-1293.
- HART, S. R., DUNN, T., 1993. Experimental cpx/melt partitioning of 24 trace elements. *Contrib Mineral Petrol*, 113: 1-8.
- HILL. E., BLUNDY, J. D., WOOD, B. J., 2011. Clinopyroxene–melt trace element partitioning and the development of a predictive model for HFSE and Sc. *Contrib Mineral Petrol*, 161: 423–438.
- HILL. E., WOOD, B. J., BLUNDY, J. D., 2000. The effect of Ca-Tschermaks component on trace element partitioning between clinopyroxene and silicate melt. *Lithos*, 53: 203–215
- HIROSE, K., 1997. Partial melt compositions of carbonated peridotite at 3 GPa and role of CO₂ in alkali-basalt magma generation. *Geophysical research letters*, 24: 2837-2840.
- HUANG, X. –L. NIU, Y, XU, Y. –G., CHEN, L., –L., YANG, Q. –J., 2010. Mineralogical and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Post-collisional Potassic and Ultrapotassic Rocks from Western Yunnan, SW China. *Journal Of Petrology*, 51: 1617-1654.
- IMAI, T., TAKAHASHI, E., SUZUKI, T., HIRATA, T., 2012. Element partitioning between olivine and melt up to 10 GPa: Implications for the effect of pressure. *Chemical Geology*, 358: 23–36.
- IRVING, A. J., 1978. A review of experimental studies of crystal / liquid trace element partitioning. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42:743-770.
- IUPAC. Compendium of Chemical Terminology. 2° ed. The Gold Book. Compiled by A. D., McNaught and A.Wilkinson. Blackwell Scientific Publications. Oxford, 2007.
- JACKSON, S.E., 2001. The application of Nd:YAG lasers in LA-ICP-MS. *Principles and Applications of Laser Ablation-Mass Spectrometry in the Earth. Mineralogical Association of Canada Short Course Series 29*, 29-46.
- JACKSON, S. E., LONGERICH, H. P., DUNNING, G. R., RIAN J. FRYER, B. J., 1992. The application of laser-ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LAM-ICP-MS) to in situ trace-element determinations in minerals. *Canadian Mineralogist*, 30: 1049 – 1064.
- JACOB, T., RAJ, S., RANNESH, L., 2007. Vegard's law: a fundamental relation or an approximation? *International Journal of Materials Research*, 98: 776-779.
- JENSEN, B. B., 2000. Partitioning of elements in sector-zoned clinopyroxenes. *Mineralogical Magazine*, 64: 725 – 728.

- JUNG, C., JUNG, S., HOFFER, E., BERNDT, J., 2006. Petrogenesis of Tertiary Mafic Alkaline Magmas in the Hoheifel, Germany. *Journal of Petrology*, 47: 1637–1671.
- KAMENETSKY, V. S., CRAWFORD, A. J., MEFFRE, S., 2001. Factors Controlling Chemistry of Magmatic Spinel: an Empirical Study of Associated Olivine, Cr-spinel and Melt Inclusions from Primitive Rocks. *J. Petrology*, 42: 655-671.
- KAMGANG, P., CHAZOT, G., NJONFANG, E., NGONGANG, N. B. T., TCHOUA, F. M., 2013. Mantle sources and magma evolution beneath the Cameroon Volcanic Line: Geochemistry of mafic rocks from the Bamenda Mountains (NW Cameroon). *Gondwana Research*, 24: 727–741.
- KNAPP, G., SCHRAMEL, P., 2003. Sources of analyte contamination and loss during the analytical process. Contido em *Comprehensive analytical chemistry v. 41: Sample preparation for trace element analysis*. Editado por Mester, Z. e Sturgeon, R. Elsevier B.V., Holanda.
- KEPPLER, H., 1992. Crystal field spectra and geochemistry of transition metal ions in silicate melts and glasses. *American Mineralogist*, 77:62-75.
- KERRICK, D. M., L. S. DARKEN, L. S., 1975. Statistical thermodynamic models for ideal oxide and silicate solid solutions, with application to plagioclase. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39: 1431 – 1442.
- KESSEL, R., FUMAGALLI, P., PETTKE, T., 2015. The behaviour of incompatible elements during hydrous melting of metasomatized peridotite at 4 -6 GPa and 1000 °C - 1200 °C. *Lithos*, 236–237: 141–155.
- KRATOCHVIL, B., 2003. Sampling and sample preservation for trace element analysis. *Comprehensive analytical chemistry*; Contido em *Comprehensive analytical chemistry v. 41: Sample preparation for trace element analysis*. Editado por MESTER, Z. e STURGEON, R. Elsevier B.V., Holanda.
- KROLL, H., KIRFEL, A., HEINEMANN, R., 2006. Order and anti-order in olivine II: Thermodynamic analysis and crystal-chemical modelling. *Eur. J. Mineral.*, 18: 691–704.
- KRUG, F. J. (Ed.), 2008. Métodos de preparo de amostras; fundamentos sobre preparo de amostras orgânicas e inorgânicas para análise elementar. 1 ed. Piracicaba editora, 340p
- KUSHIRO, I., Walter, M. J., 1998. Mg-Fe partitioning between olivine and mafic-ultramafic melts. *Geophysical Research Letters*, 25: 2337–2340
- LARREA, P., FRANÇA, Z., LAGO, M., WIDOM, E., GALÉ, C., UBIDE, T., 2012. Magmatic Processes and the Role of Antecrysts in the Genesis of Corvo Island (Azores Archipelago, Portugal). *Journal of Petrology*, 54, 769–793.
- LATOURRETTE, T., HERVIG, R. L., HOLLOWAY, J. R., 1995. Trace element partitioning between amphibole, phlogopite, and basanite melt. *Earth and Planetary Science Letters*, 135: 13-30.
- LAVRENT'EV, YU.G., KARMANOV, N.S., USOVA, L.V., 2015. Electron probe microanalysis of minerals: microanalyzer or scanning electron microscope? *Russian Geology and Geophysics*, 56: 1154–1161.
- LEE, C. –T, A., HARBERT, A., LEEMAN, W. P., 2007. Extension of lattice strain theory to mineral/mineral rare-earth element partitioning: An approach for assessing disequilibrium and developing internally consistent partition coefficients between olivine, orthopyroxene, clinopyroxene and basaltic melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 481–496.

- LE MAITRE R.W. (Ed.), 2002. Igneous rocks. A classification of igneous rocks and glossary of terms. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, p. 236.9
- LEUNG, I. S., 1974. Sector-Zoned Titanaugites: Morphology, Crystal Chemistry, and Growth. *American Mineralogist*, 59: 127-138.
- LEVIEN L., PREWITT C. T., 1981. High-pressure structural study of diopside *American Mineralogist*, 66: 315-323.
- LIU, C.-Q., MASUDA, A., SHIMIZU, H., TAKAHASHI, K., XIE, G.-H., 1992. Evidence for pressure dependence of the peak position in the REE mineral / melt partition patterns of clinopyroxene. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56:1523-1530.
- LOFGREN, G. L., HUSS, G. R., WASSERBURG, G.J. 2006. An experimental study of trace-element partitioning between Ti-Al-clinopyroxene and melt: Equilibrium and kinetic effects including sector zoning. *American Mineralogist* 91: 1596–1606.
- LOWENSTERN, J. B., 2001. Carbon dioxide in magmas and implications for hydrothermal systems. *Mineralium Deposita*, 36: 490-502.
- LUNDSTROM, C. C., SHAW, H. F., RYERSON, F. J., WILLIAMS, Q., GILL, J., 1998. Crystal chemical control of clinopyroxene-melt partitioning in the Di-Ab-An system: Implications for elemental fractionations in the depleted mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 2849–2862.
- MALLIK, A., DASGUPTA, R., 2013. Reactive infiltration of MORB-eclogite-derived carbonated silicate melt into fertile peridotite at 3GPa and genesis of alkali magmas. *J. Petrology*, 54: 2267-2300.
- MARTIN, L. H. J., SCHMIDT, M. W., MATTSSON, H. B., ULMER, P., HAMETNER, K., GÜNTHER, D., 2012. Element partitioning between immiscible carbonatite–kamafugite melts with application to the Italian ultrapotassic suite. *Chemical Geology*, 320-321: 96–112.
- MARTIN, L. H. J., SCHMIDT, M. W., MATTSSON, H. B., GUENTHER, D., 2013. Element partitioning between immiscible carbonatite and silicate melts for dry and H₂O-bearing systems at 1-3GPa. *Journal of Petrology*, 54: 2301-2338.
- MATSUI, Y., SYONO, Y., 1968. Unit cell dimensions of some synthetic olivine group solid solutions. *Geochemical Journal*, 2: 51 – 59.
- MATZEN, A. K., BAKER, M. BBECKETT, J. R., STOLPER, E. M., 2012. Fe-Mg Partitioning between Olivine and High-magnesian Melts and the Nature of Hawaiian Parental Liquids. *Journal of Petrology* , 52: 1243-1263.
- MCDONOUGH, W. F., SUN, S. –S., 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223–253.
- MCINTIRE, W. L., 1963. Trace element partition coefficients –review of theory and applications to geology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27: 1209-1264.
- MCKAY, G., WAGSTAFF, J., YANG, S.-R., 1986. Clinopyroxene REE distribution coefficients for shergottites: The REE content of the Shergotty melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50: 921-937.
- MENEZES, S. G., 2013. Diques de lamprófito alcalino da região do Arco de Ponta Grossa: caracterização petrográfica e geoquímica. Universidade do São Paulo: Monografia de Trabalho de formatura.

- MENEZES, S. G., AZZONE, R. G., ENRICH, G. E. R., RUBERTI, E., CAGLIARAN, GOMES, C., B., CHMYS, L., 2015. The antecryst compositional influence on Cretaceous alkaline lamprophyre dykes, SE Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 45: 79-93.
- MIDDLEMOST, E.A.K., 1975. The basalt clan. *Earth Science Reviews*, 11: 337-364.
- MILLER, J. N., MILLER, J. C., 2005. Statistics and chemometrics for analytical chemistry. 6ª ed. Prentice Hall: England. 268 p.
- MITCHELL, R. H., 1986. Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry and Petrology. Plenum Press, New York, N. Y.
- MITRA, S., 2004. High-pressure geochemistry and mineral physics. Ed. Elsevier. Inglaterra. 1233p.
- MORIMOTO, N., FABRIES, J., FERGUNSON, A. K., GINZBURG, I. V., ROSS, M., SEIFERT, F. A., ZUSSMAN, J., AOKI, K., GOTTARD, G., 1988. Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*, 73: 1123- 1133.
- MOROZOV, M., BRINKMANN, C., GRODZICKI, M., LOTTERMOSER, W., TIPPELT, G., AMTHAUER, G., KROLL, H., 2005. Octahedral cation partitioning in Mg,Fe^{2+} -olivine. Mössbauer spectroscopic study of synthetic $(\text{Mg}_{0.5}\text{Fe}^{2+}_{0.5})_2\text{SiO}_4$ (Fa_{50}). *Hyperfine Interact*, 166: 573–578.
- MÖLLER, P., MORTSANI, G., SCHLEY, F., 1980. Discussion of REE distribution patterns of carbonatites and alkali rocks. *Lithos*, 13:171-179.
- MÖLLER, P., 1988. The dependence of partition coefficients on differences of ionic volumes in crystal-melt systems. *Contrib Mineral Petrol*, 99: 62-69.
- MOLLO, S., BLUNDY, J. D., IEZZI, G., SCARLATO, P., LANGONE, A., 2013. The partitioning of trace elements between clinopyroxene and trachybasaltic melt during rapid cooling and crystal growth. *Contrib Mineral Petrol*, 166: 1633–1654.
- MORBIDELLI, L, GOMES, C. B., BECCALUVA, B. L., BROTZU, P., CONTE, A.M., RUBERTI, E., TRAVERSA, B. G., 1995. Mineralogical, petrological and geochemical aspects of alkaline and alkaline-carbonatite associations from Brazil. *Earth-Science Reviews*, 39: 135-168.
- MYSEN, B. O., 1983. The structure of silicate melts. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 11: 75-97.
- MYSEN, B. O., 1988. Structure and properties of silicates melts. Série: Developments in geochemistry 4. Amsterdam New York: Elsevier.
- MYSEN, B. O., 2004. Element partitioning between minerals and melt, melt composition, and melt structure. *Chemical Geology*, 213: 1 - 16.
- MYSEN, B. O., VIRGO, D., SEIFERT, F. A., 1985. Relationships between properties and structure of aluminosilicate melts. *American Mineralogist*, 70: 88-105.
- MYSEN, B. O., VIRGO, D., KUSHIRO, I., 1981. The structural role of aluminum in silicate melts - a Raman spectroscopic study at 1 atmosphere. *American Mineralogist*, 66: 678-701.
- MYSEN, B. O., ARCULUS, R. J., EGGLE, D. H., 1975. Solubility of Carbon Dioxide in Melts of Andesite, Tholeiite, and Olivine Nephelinite Composition to 30 kbar Pressure Bjorn O. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 53: 227-239.
- NAGASAWA, H., 1966. Trace element partition coefficient in ionic crystals. *Science*, 152: 767 -769.
- NAKADA, S., MOTOMURA, Y., 1999. Petrology of the 1991–1995 eruption at Unzen: effusion pulsation and groundmass crystallization. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 89, 173–196.
- NAKAMURA, Y., 1973. Origin of Sector-Zoning of igneous clinopyroxenes. *American Mineralogist*, 58: 986-990.

- NAVARRO, M., ANDRADE, S., ULBRICH, H., GOMES, C. B., GIRARDI, V. A. V., 2008. The direct determination of rare earth elements in basaltic and related rocks using ICP-MS: testing the efficiency of microwave oven sample decomposition procedures. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32: 167-180.
- NEWTON, R. C., WOOD, B. J., 1980. Volume behavior of silicate solid solutions. *American Mineralogist*, 65: 733-745.
- NIELSEN, R. L., GALLAHAN, M. W. E., NEWBERGER, F., 1992. Experimentally determined mineral-melt partition coefficients for Sc, Y and REE for olivine, orthopyroxene, pigeonite, magnetite and ilmenite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 488-499.
- NIMIS, P., 1995. A clinopyroxene geobarometer for basaltic systems based on crystal-structure modeling. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 121:115-125.
- NIMIS, P., ULMER, P., 1998. Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks Part 1: An expanded structural geobarometer for anhydrous and hydrous, basic and ultrabasic systems. *Contrib Mineral Petrol*, 133: 122-135.
- NOMURA, C. S., SILVA, C. S., OLIVEIRA, P. O., 2008. Análise direta de sólidos por espectrometria de absorção atômica com atomização em forno de grafite: uma revisão. *Quim. Nova*, 31: 104-113.
- NOWAK, M., PORBATZKI, D., SPICKENBOM, K., DIEDRICH, O., 2003. Carbon dioxide speciation in silicate melts: a restart. *Earth and Planetary Science Letters*, 207: 131-139.
- OLIN, P.H. AND WOLFF, J.A., 2010. Rare earth and high field strength element partitioning between Fe-rich pyroxenes and felsic liquids. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 160: 761-775.
- OLIVEIRA, E., 2003. Sample preparation for atomic spectroscopy: evolution and future trends. *Journal Brazilian Chemical Society*, 14: 174-182.
- O'NEILL, H. ST. C., EGGINS, S.M., 2002. The effect of melt composition on trace element partitioning: an experimental investigation of the activity coefficients of FeO, NiO, CoO, MoO₂ and MoO₃ in silicate melts. *Chemical Geology*, 186: 151– 181.
- ONUMA, N., HIGUCHI, H., WAKITA, H., NAGASAWA, H., 1968. Trace element partition between two pyroxenes and the host lava. *Earth and Planetary Science Letters*, 1968: 47-51.
- PEARSON, D. G., BRENNER, F. E., NESTOLA, F., MCNEILL, J., NASDALA, L., HUTCHISON, M. T., MATVEEV, S., MATHER, K., SILVERSMIT, G., SCHMITZ, S., VEKEMANS, B., VINCZE, L., 2014. Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond. *Nature*, 507: 221-229.
- PEARCE, J. A. e PEATE, D. W., 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic ARC Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 251-285.
- PATERSON, B.A. E STEPHENS, W.E., 1992. Kinetically induced compositional zoning in titanite: implications for accessory-phase/melt partitioning of trace elements. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 109, 373-85.
- PHILPOTTS, J. A., 1978. The law of constant rejection. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 909-920.
- POKROVSKY, O. S., SCHOTT, J., 2000. Kinetics and mechanism of forsterite dissolution at 25°C and pH from 1 to 12. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 3313–3325.
- POTTS, P. J., 1987. A handbook of silicate rock analysis. Londres, Chapman Hall. 622p.

- PUTIRKA, K. D., 1999. Clinopyroxene + liquid equilibria to 100 kbar and 2450 K. *Contrib Mineral Petrol*, 135: 151-163.
- PUTIRKA, K. D., 2008. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69: 61-120.
- REDFERN, S. A. TY., ARTIOLI, G., RINALDI, R., HENDERSON, C. M. B., KNIGHT, K. S., WOOD, B. J., 2000. Octahedral cation ordering in olivine at high temperature. II: an in situ neutron powder diffraction study on synthetic MgFeSiO_4 (Fa_{50}). *Phys Chem Minerals*, 27: 630 – 637.
- REED, S. J. B., 1990. Recent developments in geochemical microanalysis. *Chemical Geology*, 83: 1-9.
- RICCOMINI, C., VELÁZQUEZ, V. F., GOMES, C. B., 2005. Tectonic controls of the Mesozoic and Cenozoic alkaline magmatism in the central-southeastern Brazilian Plataform: Em Comin-Chiaramonti e Gomes (Eds.) *Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Plataform*. Edusp/Fapesp.
- RINGWOOD, A. E., 1955a. The principle governing trace element distribution during magmatic crystallization, Part I: The influence of electronegativity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 7: 189-202.
- RINGWOOD, A. E., 1955b. The principle governing trace element distribution during magmatic crystallization, Part II: The role of complex formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 7: 242-254.
- ROCK, N. M. S., 1991. *Lamprophyres*. Glasgow: Blackie New York: Van Nostrand Reinhold.
- ROCK, N. M., GWALANI, L. G., GRIFFIN, J., 1994. Alkaline rocks and carbonatites of Amba Dongar and adjacent areas, Deccan Alkaline Province, Gujarat, India. 2. Complexly zoned clinopyroxene phenocrysts *Mineralogy and Petrology*, 51: 113 – 135.
- ROEDER, P. L., EMSLIE, R. F., 1970. Olivine-liquid equilibrium. *Contr. Mineral. And Petrol.*, 29: 275-289.
- ROLLINSON, H. R., 1993. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Group Limited, Inglaterra. 352p.
- SAADAT, S., R. STERN, C. R., 2012. Petrochemistry of a xenolith-bearing Neogene alkali olivine basalt from northeastern Iran. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 225–226: 13–29.
- SACK, R. O., WALKER, D. E CARMICHAEL, I. S. E., 1987. Experimental petrology of alkalic lavas: constraints on cotectics of multiple saturation in natural basic liquids. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 96, 1-23.
- SALVIULO, G., PRINCIVALLE, F., DEMARCHI, G., FABRO, C., 1992. Effects of Ca-Mg Substitution in C2/c Pyroxene Structure on Natural Clinopyroxenes from Spinel Peridotite Nodules (Pico Cabugi, Brazil). *Phys Chem Minerals*, 19:213-219.
- SCARLATO, P., MOLLO, S., BLUNDY, J. D., IEZZI, G., TIEPOLO, M., 2014. The role of natural solidification paths on REE partitioning between clinopyroxene and melt. *Bull Volcanol* (2014) 76:810
- SCHMIDT, M. W., CONNOLLY, J. A. D., GÜNTHER, D., BOGAERTS, M., 2006. Element partitioning: The role of melt structure and composition. *Science*, 312: 1646 - 1650.
- SCHUMACHER JC. 1991. Empirical ferric iron corrections: necessity, assumptions and effects on selected geothermobarometers. *Mineral Mag* 55: 3-18.

- SCHWANDT, C.S. AND MCKAY, G.A., 2006. Minor and trace element sector zoning in synthetic enstatite. *American Mineralogist*, 91, 1607–1615.
- SERTEK, J. P., ANDRADE, S., ULBRICH, H. H., 2015. An evaluation of the effects of primary and cross-contamination during the preparation of rock powders for chemical determinations. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 39: 381-397.
- SHANNON, R. D., 1976. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Cryst.*, A32: 751 -767.
- SHAW, D. M., 1953. The camouflage principle and trace element distribution in magmatic minerals. *The Journal of Geology*, 61:142-151.
- SHAW, C. S. J., EYZAGUIRRE, J., 2000. Origin of megacrysts in the mafic alkaline lavas of the West Eifel volcanic field, Germany. *Lithos*, 50: 75–95.
- SHIMIZU, N., 1990. The oscillatory trace element zoning of augite phenocrysts. *Earth-Science Reviews*, 29: 27-37.
- SKULSKI, T., MINARIK, W. AND WATSON, E.B., 1994. High pressure experimental trace-element partitioning between clinopyroxene and basaltic melts. *Chem. Geol.*, 117: 127-147.
- SLAVEC, G. B., MANTOVANI, M. S. M., SHUKOWSKY, W., 2004. Estudo gravimétrico do maço alcalino de poços de caldas. *Revista Brasileira de Geociências*, 34:275-280.
- SOBOLEV, A. V., HOFMANN, A., W., KUZMIN, D. K., YAXLEY, G. M., ARNDT, N. T., CHUNG, S., -L., DANYUSHEVSKY, L. V., ELLIOTT, T., FREY, F. A., GARCIA, M. O., GURENKO, A. A., KAMENETSKY, V. S., KERR, A. C., KRIVOLUTSKAYA, N. A., MATVIENKOV, V. V., NIKOGOSIAN, I. K., ROCHOLL, A., SIGURDSSON, I. A., SUSHCHEVSKAYA, N. M., TEKLAY, M., 2007. The Amount of Recycled Crust in Sources of Mantle-Derived Melts. *Science*, 316: 412-417.
- SPANDLER, C., O'NEILL, H. ST. C., 2010. Diffusion and partition coefficients of minor and trace elements in San Carlos olivine at 1,300°C with some geochemical implications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 159:791–818.
- SUN, C., LIANG, Y., 2012. Distribution of REE between clinopyroxene and basaltic melt along a mantle adiabat: effects of major element composition, water, and temperature. *Contrib Mineral Petrol*, 163: 807-823.
- SUZUKI, T., HIRATA, T., YOKOYAMA, T.D., IMAI, T., TAKAHASHI, E., 2012. Pressure effect on element partitioning between minerals and silicate melt: melting experiments on basalt up to 20 GPa. *Phys. Earth Planet. Inter.* 208, 59–73.
- THOMPSON, R. N., GIBSON, S. A., MITCHELL, J. G., DICKIN, A. P., LEONARDOS, O. H., BROD, J. A., J. C. GREENWOOD, J. C., 1998. Migrating Cretaceous–Eocene magmatism in the Serra do Mar Alkaline Province, SE Brazil: Melts from the deflected Trindade mantle plume? *Petrology*, 39:1493-1526.
- THOMPSON, G. M., MALPAS, J., 2000. Mineral/melt partition coefficients of oceanic alkali basalts determined on natural samples using laser ablation- inductively coupled plasma-mass spectroscopy (LAM-ICP-MS). *Mineralogical Magazine*, 64: 85-94.
- THORNER, C. R., HUEBNER, J. S., 1985. Dissolution of olivine in basaltic liquids: experimental observations and applications. *American Mineralogist*, 70: 934-945
- TRIBAUDINO, M., BENNA, P., BRUNO, E., 1989. Average structure and M2 site configurations in C2/c clinopyroxenes along the Di-En join. *Contrib Mineral Petrol*, 103: 452-456.

- TSANG, T., PHILPOTTS, J. A., YIN, L., 1978. Trace element partitioning between ionic crystal and liquid. *J. Phys. Chem. Solids*, 39: 439-442.
- UBIDE, T., ARRANZ, E., LAGO, M., GALÉ, C., LARREA, P., 2012. The influence of crystal settling on the compositional zoning of a thin lamprophyre sill: A multimethod approach. *Lithos*, 132-133: 37 – 49.
- UBIDE, T., GALÉ, C., ARRANZ, E., LAGO, M., LARREA, P., 2014. Clinopyroxene and amphibole crystal populations in a lamprophyre sill from the Catalanian Coastal Ranges (NE Spain): A record of magma history and a window to mineral-melt partitioning. *Lithos*, 184-187: 225-242.
- ULBRICH, H., H. G. J., 1984. Petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienitos do macico alcalino de pocos de caldas. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo.
- VAN ZONEN, P., KLOOSTER, H. A. V., HOOGERBRUGGE, R., GORT, S. M., DE WIEL, H. J. V., 1998. Validation of analytical methods and laboratory procedures for chemical measurements. *Arh hig rada toksikol*, 49: 355-370.
- VESSMAN, J., STEFAN, R. I., STADEN, J. F. V., DANZER, K., LINDNER, W., BURNS, D. T., FAJGELJ, A., MÜLLER, H., 2001. Selectivity in analytical chemistry (IUPAC Recommendations 2001). *Pure Appl. Chem.*, 73: 1381–1386.
- VILLEMANT, B., JAFFREZIC, JORON, J.-L., TREUIL, M., 1981. Distribution coefficients of major and trace elements; fractional crystallization in the alkali basalt series of Chaîne des Puys (Massif Central, France). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45: 1997-2016.
- VINAGRE, R., TROUW, R. A. J., MENDES, J. C., LUDKA, I., 2014. Química mineral e geotermobarometria do Batólito Serra da Água Limpa, Nappe Socorro-Guaxupé, Faixa Brasília Meridional, Sudeste do Brasil. *Brazilian Journal of Geology*, 44: 387-414.
- ZANETTI, A., TIEPOLO, M., OBERTI, R., VANNUCCI, R., 2004. Trace-element partitioning in olivine: modelling of a complete data set from a synthetic hydrous basanite melt. *Lithos*, 75: 39 - 54.
- ZIELINSKI R.A., FREY F.A., 1974. An experimental study of a rare earth element in the system diopside/water. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38: 545-565.
- ZOTOV, N., KEPPLER, H., 1998. The influence of water on the structure of hydrous sodium tetrasilicate glasses. *American Mineralogist*, 83: 823-831.
- WATSON, E. B., 1985. Henry's law behavior in simple systems and in magmas: Criteria for discerning concentration-dependent partition coefficients in nature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49: 917-923.
- WEST, M., ELLUS, A. T., POTTS, P. J., STRELI, C., VANHOOF, C., WEGRZYNEK, D., WOBRAUSCHEK, P., 2012. Atomic spectrometry update—X-ray fluorescence spectrometry. *J. Anal. At. Spectrom*, 27, 1603–1644.
- WHITNEY, D., L., EVANS, B., W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals *American Mineralogist*, 95: 185–187.
- WINPENNY, B., MACLENNAN, J., 2011. A Partial record of mixing of mantle melts preserved in Icelandic phenocrysts. *Journal of petrology*, 52: 1791-1812.
- WOOD, B. J., 1974. Crystal field spectrum of Ni²⁺ in olivine. *American Mineralogist*, 59: 244-248.

- WOOD, B. J., BLUNDY, J. D., 1997. A predictive model for rare earth element partitioning between clinopyroxene and anhydrous silicate melt. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 129: 166 – 181.
- WOOD, B. J., TRIGILA, R., 2001. Experimental determination of aluminous clinopyroxene–melt partition coefficients for potassic liquids, with application to the evolution of the Roman province potassic magmas. *Chemical Geology*, 172: 213–223.

Anexos

Tabela 1A : Análises químicas individuais de rocha total e matriz por FRX e ICP-MS

Dique Região	DAPGG B		DAPGG BM			DAPGG I		
	Óxido / %							
Nº	12		1			1		
SiO ₂	40,76	40,36	40,04			40,96		
TiO ₂	4,97	4,94	5,12			4,97		
Al ₂ O ₃	7,16	7,13	7,36			7,08		
Fe ₂ O ₃	16,05	15,96	16,32			16,18		
MnO	0,87	0,93	1,75			0,59		
MgO	7,93	7,88	7,34			8,65		
CaO	12,67	12,51	11,48			11,85		
Na ₂ O	2,56	2,52	2,43			2,17		
K ₂ O	2,47	2,48	2,87			3,02		
P ₂ O ₅	0,75	0,74	0,77			0,76		
LOI*	3,56	3,40	3,79			3,41		
total	99,75	98,85	99,27			99,64		
	Elementos / ppm							
Nº	1	2	3	1	2	3	1	2
Sc	36	41	41	35	36	41	38	43
V	-	419	411	-	-	441	-	419
Cr	-	137	137	-	-	103	-	205
Co	-	57	61	-	-	56	-	65
Ni	-	130	140	-	-	110	-	170
Zn	-	100	100	-	-	120	-	90
Rb	94	95	95	110	112	111	116	119
Sr	1122	1195	1205	1090	1103	1205	1066	1203
Y	23	22	23	31	31	29	22	22
Zr	392	403	405	392	394	401	392	413
Nb	102	95	99	105	103	98	103	100
Cs	45	46	46	53	54	55	33	34
Ba	1629	1735	1761	1478	1467	1610	1422	1537
La	109	111	111	112	114	115	108	111
Ce	235	226	226	244	269	235	228	232
Pr	26	25	25	26	26	26	25	25
Nd	95	95	93	97	98	97	94	96
Sm	14,8	14,9	14,1	15,3	15,4	14,8	14,7	14,3
Eu	4,00	3,92	3,81	4,07	4,14	3,82	3,98	3,93
Gd	12,1	10,5	10,4	13,1	13,0	11,9	12,4	10,5
Tb	1,37	1,21	1,20	1,53	1,53	1,39	1,34	1,22
Dy	6,21	5,44	5,28	7,24	7,26	6,67	6,05	5,66
Ho	0,97	0,91	0,84	1,18	1,22	1,06	0,92	0,85
Er	2,38	1,90	2,03	2,91	2,95	2,84	2,29	1,89
Tm	0,26	0,22	0,28	0,33	0,33	0,30	0,24	0,23
Yb	1,40	1,30	1,31	1,71	1,72	1,74	1,33	1,33
Lu	0,20	0,20	0,20	0,24	0,25	0,20	0,19	0,20
Hf	9,94	9,90	9,80	9,87	9,79	10,1	9,84	10,40
Ta	-	5,90	6,30	-	-	6,30	-	6,20
Th	10,1	9,60	9,50	11,6	11,2	11,2	9,63	8,50
U	2,08	2,30	2,00	2,29	2,22	2,20	2,02	2,00

* Loss On Ignition

Tabela 1A (continuação)

Dique Região	DAPGG IM				DAPGG C2		DAPGG C2M		
	Óxido / %								
Nº	1				1		1		
SiO ₂	41,09				41,14		40,34		
TiO ₂	5,10				4,93		5,09		
Al ₂ O ₃	7,22				7,05		7,26		
Fe ₂ O ₃	16,07				15,86		15,94		
MnO	0,54				0,66		0,71		
MgO	7,59				8,57		7,61		
CaO	12,88				12,26		13,01		
Na ₂ O	2,83				2,26		2,73		
K ₂ O	2,18				2,65		2,31		
P ₂ O ₅	0,77				0,75		0,77		
LOI	3,33				3,60		3,94		
total	99,60				99,73		99,71		
	Elementos / ppm								
Nº	1	2	3	4	1	2	1	2	3
Sc	36	37	42	42	38	42	36	37	41
V	-	-	428	433	-	409	-	-	421
Cr	-	-	137	-	-	205	-	-	137
Co	-	-	55	58	-	60	-	-	56
Ni	-	-	120	-	-	170	-	-	120
Zn	-	-	110	-	-	110	-	-	110
Rb	92	91	92	93	105	103	91	91	89
Sr	1118	1104	1263	1229	1083	1205	1123	1110	1194
Y	23	23	23	21	24	23	23	23	22
Zr	414	404	428	407	389	398	416	407	431
Nb	107	106	99	97	102	98	107	107	102
Cs	47	47	49	49	34	34	45	45	47
Ba	1544	1474	1676	1665	1355	1424	1532	1472	1666
La	112	112	118	115	107	111	112	113	117
Ce	240	268	239	239	231	223	242	268	237
Pr	27	26	27	26	25	25	27	26	26
Nd	98	98	99	98	94	94	98	98	97
Sm	15,3	15,2	14,8	14,0	14,8	14,3	15,3	15,1	14,7
Eu	4,13	4,18	4,08	3,94	3,95	3,85	4,12	4,17	3,92
Gd	12,5	12,6	11,0	10,9	12,0	10,1	12,7	12,7	10,5
Tb	1,38	1,39	1,30	1,25	1,36	1,32	1,41	1,39	1,30
Dy	6,29	6,29	5,46	5,64	6,25	5,99	6,36	6,36	5,80
Ho	0,96	0,96	0,85	0,83	0,97	0,90	0,98	0,98	0,93
Er	2,41	2,38	1,97	2,04	2,42	2,12	2,44	2,41	1,97
Tm	0,26	0,26	0,27	0,23	0,26	0,25	0,27	0,27	0,27
Yb	1,42	1,42	1,50	1,36	1,43	1,55	1,43	1,45	1,42
Lu	0,20	0,21	0,19	0,21	0,21	0,20	0,21	0,21	0,21
Hf	10,3	10,1	11,2	10,2	9,82	9,70	10,34	10,10	9,90
Ta	-	-	6,80	6,70	-	6,50	-	-	6,90
Th	11,2	10,9	10,8	10,4	9,6	9,4	11,4	11,0	10,6
U	2,43	2,38	2,70	2,60	1,99	1,90	2,34	2,28	2,50

Tabela 1A (continuação)

Dique Região	DAPGG C2		DSMB B			DSMB C	
	Óxido / %						
Nº	1		1			1	
SiO ₂	40,04		41,05			44,89	
TiO ₂	3,96		4,18			3,37	
Al ₂ O ₃	5,82		14,86			14,84	
Fe ₂ O ₃	15,32		12,58			10,83	
MnO	0,30		0,17			0,16	
MgO	13,83		5,62			7,05	
CaO	11,83		9,37			8,75	
Na ₂ O	1,23		3,37			3,30	
K ₂ O	2,82		2,10			2,96	
P ₂ O ₅	0,58		1,65			1,29	
LOI	4,16		4,44			2,31	
total	99,89		99,39			99,75	
	Elementos / ppm						
Nº	1	2	1	2	3	1	2
Sc	32	37	16	16	18	16	19
V	-	345	-	-	293	-	224
Cr	-	479	-	-	<LQ	-	103
Co	-	73	-	-	32	-	30
Ni	-	460	-	-	<LQ	-	100
Zn	-	110	-	-	100	-	110
Rb	116	118	44	45	42	48	44
Sr	973	1071	1803	1800	1812	2143	2070
Y	16	16	27	27	22	25	22
Zr	309	317	151	151	137	146	137
Nb	80	76	45	45	38	43	38
Cs	30	32	0	0	0	1	1
Ba	1236	1390	2369	2444	2230	3056	2863
La	83	87	58	58	52	61	56
Ce	167	175	125	126	116	129	123
Pr	19	19	16	16	14	17	15
Nd	72	69	70	70	61	70	62
Sm	11,2	10,8	12,9	12,8	11,1	12,6	11,0
Eu	3,04	3,01	4,58	4,56	3,78	4,80	4,06
Gd	9,27	7,85	10,2	10,2	9,54	10,0	9,31
Tb	1,01	0,92	1,33	1,34	1,17	1,27	1,14
Dy	4,54	4,36	6,29	6,33	5,69	6,00	5,31
Ho	0,68	0,58	1,08	1,10	0,88	1,03	0,87
Er	1,74	1,31	2,61	2,62	2,11	2,42	2,01
Tm	0,19	0,16	0,31	0,31	0,30	0,29	0,25
Yb	1,04	1,02	1,74	1,75	1,79	1,61	1,53
Lu	0,15	0,15	0,26	0,26	0,21	0,24	0,22
Hf	7,62	7,70	3,66	3,69	3,30	3,69	3,30
Ta	-	5,40	-	-	2,70	-	2,90
Th	9,95	9,80	3,40	3,38	2,70	3,28	2,80
U	2,02	2,20	0,79	0,80	0,60	0,75	0,50

Tabela 1A (continuação)

Dique Região	DSMU BE1		DSMU BE2		DSMU B1					
	Óxido / %									
N°	1	2	1	1	2					
SiO ₂	41,33	41,68	40,81	41,51	41,50					
TiO ₂	3,52	3,54	3,33	3,51	3,53					
Al ₂ O ₃	13,22	13,30	12,66	13,35	13,37					
Fe ₂ O ₃	11,79	11,94	11,69	11,82	11,80					
MnO	0,18	0,18	0,17	0,18	0,18					
MgO	9,03	9,05	9,98	8,68	8,68					
CaO	11,03	11,14	10,86	11,17	11,19					
Na ₂ O	2,97	3,00	2,49	2,98	3,01					
K ₂ O	2,31	2,31	2,39	2,32	2,32					
P ₂ O ₅	0,85	0,85	0,79	0,86	0,86					
LOI	3,62	3,61	5,24	3,13	3,08					
total	99,85	100,60	100,41	99,51	99,52					
	Elementos / ppm									
N°	1	2	1	2	1	2	1	2	3	4
Sc	21	20	22	22	21	22	20	20	22	22
V	-	-	261	262	-	245	-	-	260	262
Cr	-	-	171	171	-	205	-	-	171	171
Co	-	-	39	45	-	45	-	-	39	44
Ni	-	-	130	140	-	180	-	-	130	120
Zn	-	-	90	90	-	90	-	-	100	90
Rb	53	52	48	53	55	53	52	54	51	53
Sr	1340	1322	1290	1380	1245	1225	1417	1467	1458	1498
Y	28	28	24	25	26	23	27	28	24	25
Zr	287	281	270	284	270	260	281	284	271	286
Nb	82	81	72	75	77	68	81	83	72	77
Cs	2	2	3	2	3	4	2	2	2	2
Ba	1023	979	1008	1048	965	958	965	1014	1032	1083
La	74	74	71	73	68	66	74	75	73	74
Ce	144	143	135	142	133	129	144	146	139	151
Pr	17	17	15	15	15	14	17	17	15	16
Nd	65	65	60	62	60	56	64	65	62	63
Sm	12,1	11,9	10,4	11,5	11,2	9,8	11,8	12,0	11,2	11,1
Eu	3,63	3,63	3,42	3,42	3,37	3,13	3,54	3,69	3,45	3,41
Gd	10,1	9,93	9,08	9,09	9,18	8,63	9,92	10,2	9,44	9,61
Tb	1,33	1,29	1,18	1,24	1,23	1,14	1,30	1,32	1,25	1,27
Dy	6,43	6,39	5,81	5,76	5,95	5,42	6,30	6,51	5,91	6,47
Ho	1,11	1,11	0,98	0,89	1,04	0,89	1,10	1,12	0,98	1,00
Er	2,65	2,62	2,17	2,23	2,46	1,94	2,66	2,68	2,10	2,35
Tm	0,33	0,33	0,28	0,33	0,31	0,26	0,32	0,33	0,32	0,28
Yb	1,86	1,84	1,80	1,70	1,75	1,69	1,85	1,89	2,03	1,81
Lu	0,27	0,27	0,21	0,22	0,25	0,22	0,27	0,28	0,24	0,24
Hf	6,34	6,37	6,00	6,20	6,05	6,20	6,25	6,36	6,30	6,40
Ta	-	-	4,40	4,40	-	3,70	-	-	4,30	4,00
Th	7,60	7,42	6,60	7,10	6,96	6,50	7,75	7,56	7,00	7,20
U	1,85	1,81	1,50	2,10	1,68	1,90	1,86	1,84	1,90	2,20

Tabela 1A (continuação)

Dique Região		DSMU B1M		DSMU B2			DSMU C	
	Óxido / %							
Nº	1			1			1	2
SiO ₂	41,19			40,69			41,19	41,22
TiO ₂	3,51			3,24			3,38	3,37
Al ₂ O ₃	13,06			12,12			12,52	12,54
Fe ₂ O ₃	11,86			11,75			12,18	12,20
MnO	0,18			0,17			0,19	0,19
MgO	9,10			11,01			10,65	10,63
CaO	11,03			10,27			11,31	11,29
Na ₂ O	2,87			2,53			3,02	3,03
K ₂ O	2,27			2,36			2,02	2,03
P ₂ O ₅	0,84			0,77			1,10	1,11
LOI	4,36			5,08			2,87	2,96
total	100,27			99,99			100,43	100,57
	Elementos / ppm							
Nº	1	2	3	1	2	3	1	2
Sc	20	21	23	19	19	22	19	23
V	-	-	262	-	-	243	-	242
Cr	-	-	205	-	-	239	-	205
Co	-	-	40	-	-	46	-	43
Ni	-	-	140	-	-	270	-	250
Zn	-	-	250	-	-	100	-	90
Rb	50	52	51	54	55	52	48	47
Sr	1120	1159	1190	1248	1254	1233	1519	1552
Y	27	27	25	25	25	21	31	28
Zr	280	282	272	260	260	247	294	283
Nb	79	87	70	73	73	64	86	75
Cs	3	3	3	4	4	3	1	1
Ba	992	963	987	934	923	896	1043	1078
La	71	71	71	65	66	61	103	97
Ce	138	140	136	127	128	121	216	190
Pr	16	16	15	15	15	13	22	20
Nd	62	63	59	58	58	53	81	78
Sm	11,5	11,7	10,7	10,7	10,7	9,1	14,0	12,5
Eu	3,48	3,59	3,39	3,25	3,24	2,80	4,12	3,90
Gd	9,51	9,80	9,11	8,91	8,81	8,09	12,1	10,7
Tb	1,26	1,28	1,18	1,17	1,18	1,08	1,49	1,39
Dy	6,11	6,30	5,79	5,72	5,71	5,17	7,16	6,81
Ho	1,05	1,09	0,95	0,99	0,99	0,86	1,23	1,02
Er	2,53	2,59	2,15	2,36	2,37	2,08	2,95	2,43
Tm	0,31	0,32	0,29	0,29	0,30	0,29	0,36	0,34
Yb	1,77	1,82	1,69	1,65	1,69	1,47	2,02	2,13
Lu	0,26	0,27	0,23	0,24	0,24	0,23	0,30	0,28
Hf	6,20	6,38	6,40	5,76	5,80	5,60	6,50	5,90
Ta	-	-	3,90	-	-	3,50	-	4,30
Th	7,40	7,10	6,50	6,77	6,74	6,20	10,7	9,00
U	1,75	1,73	1,70	1,63	1,61	1,60	2,55	2,80

Tabela 1A (continuação)

Dique Região	DSMU CM			DSMPN		DSMPN N		
	Óxido / %							
Nº	1			1		1		
SiO ₂	40,80			43,94		43,84		
TiO ₂	3,47			4,14		4,20		
Al ₂ O ₃	12,17			15,26		15,38		
Fe ₂ O ₃	12,29			13,40		13,43		
MnO	0,19			0,20		0,20		
MgO	10,64			4,23		3,93		
CaO	11,65			9,45		9,31		
Na ₂ O	2,82			3,64		3,69		
K ₂ O	1,98			3,02		2,99		
P ₂ O ₅	1,09			1,56		1,58		
LOI	2,70			0,96		0,99		
total	99,80			99,80		99,54		
	Elementos / ppm							
Nº	1	2	3	1	2	1	2	3
Sc	22	22	25	7	9	6	6	9
V	-	-	254	-	165	-	-	167
Cr	-	-	239	-	34	-	-	34
Co	-	-	39	-	39	-	-	40
Ni	-	-	220	-	<LQ	-	-	<LQ
Zn	-	-	90	-	130	-	-	130
Rb	47	48	46	69	71	68	67	69
Sr	1496	1508	1459	1366	1505	1410	1405	1570
Y	31	32	28	37	36	39	38	36
Zr	300	304	291	343	4	354	350	370
Nb	81	84	71	89	89	91	93	90
Cs	1	1	1	1	1	1	1	1
Ba	979	1026	1021	1237	1327	1270	1212	1323
La	100	101	98	87	91	90	88	92
Ce	211	190	185	175	184	180	179	187
Pr	21	22	20	21	21	22	22	21
Nd	81	82	75	86	87	89	87	85
Sm	14,1	14,4	13,2	16,2	16,4	16,7	16,3	16,2
Eu	4,14	4,31	3,97	4,87	4,97	5,00	4,95	5,06
Gd	11,8	12,2	10,8	13,8	13,6	14,4	13,8	14,4
Tb	1,50	1,54	1,38	1,81	1,79	1,86	1,81	1,83
Dy	7,18	7,48	6,88	8,81	9,18	9,12	8,80	8,89
Ho	1,24	1,26	1,06	1,50	1,40	1,55	1,53	1,34
Er	3,00	3,05	2,65	3,57	3,26	3,68	3,57	3,42
Tm	0,36	0,37	0,34	0,43	0,42	0,44	0,44	0,47
Yb	2,05	2,10	1,72	2,40	2,18	2,45	2,41	2,49
Lu	0,30	0,31	0,26	0,34	0,30	0,35	0,35	0,32
Hf	6,81	6,90	6,20	7,61	7,50	7,87	7,77	8,20
Ta	-	-	3,80	-	6,00	-	-	5,60
Th	10,0	10,0	9,50	9,79	9,10	9,78	9,58	9,50
U	2,38	2,36	2,40	2,24	2,20	2,26	2,21	2,40

Tabela 2A: Resultados da análise química de elementos maiores em matriz por ME de DAPGG-BE, DAPGG-B e DSMU-B2 em % em massa. Estão apresentadas as análises com fechamento abaixo de

	DAPGG-BE (ME)								
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	43,11	41,71	41,80	43,55	43,90	41,09	42,13	43,84	43,00
TiO ₂	5,78	5,35	5,20	5,91	4,35	5,57	6,61	3,60	4,47
Al ₂ O ₃	8,85	10,30	9,16	9,06	9,76	12,02	8,65	9,29	11,22
Fe ₂ O ₃ t	15,69	16,55	17,27	13,29	14,94	16,18	14,24	16,21	15,75
MnO	0,21	0,21	0,22	0,19	0,22	0,25	0,19	0,20	0,20
MgO	7,09	6,32	7,82	7,31	7,09	6,02	7,67	8,16	6,77
CaO	14,51	12,21	13,41	14,31	13,57	11,34	14,97	13,20	12,20
Na ₂ O	2,90	3,40	2,41	3,11	3,17	3,00	2,05	3,04	3,14
K ₂ O	1,79	2,21	2,63	1,94	1,64	2,94	2,00	2,09	2,24
P ₂ O ₅	0,72	1,05	0,85	0,79	0,82	1,18	0,91	0,86	0,85
Total	100,66	99,31	100,76	99,47	99,46	99,59	99,43	100,49	99,84

N°	10	11	12	13	14	15	16	17	18
SiO ₂	42,39	42,86	42,07	42,73	42,99	42,04	43,11	42,72	42,83
TiO ₂	5,56	4,84	6,75	5,52	4,38	5,77	4,88	4,52	5,39
Al ₂ O ₃	10,12	10,41	9,38	9,41	9,62	9,56	9,98	9,32	9,83
Fe ₂ O ₃ t	15,98	15,50	14,44	15,28	15,52	15,93	15,71	18,01	15,60
MnO	0,19	0,22	0,18	0,20	0,17	0,23	0,22	0,19	0,21
MgO	6,19	6,59	6,52	7,25	7,55	6,90	7,14	7,22	7,08
CaO	12,60	12,81	14,26	13,51	13,53	12,65	12,69	13,02	13,49
Na ₂ O	3,43	3,18	2,86	3,12	3,07	3,00	3,20	3,11	3,13
K ₂ O	2,32	2,17	1,96	2,11	2,00	2,38	2,36	1,87	1,73
P ₂ O ₅	1,18	1,03	1,12	0,89	1,06	0,91	1,00	0,72	0,73
Total	99,96	99,61	99,54	100,01	99,89	99,37	100,29	100,71	100,01

N°	19	20	21	22	23	24	25	26	27
SiO ₂	43,89	43,21	41,88	43,69	43,65	42,61	44,68	42,44	41,64
TiO ₂	5,25	5,49	6,32	5,22	5,21	4,68	5,11	5,68	5,42
Al ₂ O ₃	9,65	9,50	10,44	11,77	9,50	10,33	7,50	8,82	10,27
Fe ₂ O ₃ t	14,86	14,96	15,95	13,65	14,39	16,19	12,93	15,47	16,32
MnO	0,21	0,18	0,20	0,20	0,18	0,22	0,15	0,19	0,21
MgO	7,31	7,64	6,35	5,57	7,69	7,18	9,45	6,95	6,35
CaO	13,14	13,56	12,27	12,38	13,56	11,99	16,12	14,59	12,40
Na ₂ O	3,10	2,63	3,15	4,03	3,08	3,23	1,47	2,91	3,43
K ₂ O	2,00	2,24	2,50	1,68	1,97	2,42	1,85	1,72	2,24
P ₂ O ₅	0,97	0,72	0,87	1,10	0,91	0,83	0,48	0,85	0,93
Total	100,37	100,13	99,94	99,29	100,14	99,68	99,74	99,61	99,20

N°	28	29	30	31	32	33	34	35	36
SiO ₂	43,32	41,68	40,18	42,54	41,76	45,22	41,38	41,83	40,96
TiO ₂	4,78	5,79	5,41	6,05	5,36	4,33	6,31	6,41	6,19
Al ₂ O ₃	12,17	9,80	9,43	5,65	10,27	6,14	9,57	8,62	11,41
Fe ₂ O ₃ t	14,68	14,04	18,52	16,38	17,62	13,58	16,15	16,64	15,46
MnO	0,22	1,42	1,73	0,78	0,20	0,18	0,26	0,25	0,22
MgO	6,45	6,95	5,98	7,97	6,57	9,60	6,15	6,58	5,95
CaO	12,70	13,41	11,87	15,84	11,96	17,12	12,38	13,74	11,71
Na ₂ O	2,65	2,22	2,45	1,68	2,61	1,89	2,60	2,28	2,67
K ₂ O	2,80	2,79	2,93	1,99	2,89	1,46	3,05	2,66	3,09
P ₂ O ₅	0,71	1,03	0,73	0,78	0,68	0,87	1,41	0,90	1,16
Total	100,48	99,13	99,23	99,65	99,92	100,39	99,26	99,91	98,82

Tabela 2A (continuação)

N°	37	38	39	40	41	42	43	44	45
SiO ₂	41,86	41,39	45,30	40,92	41,72	41,51	42,84	43,23	39,89
TiO ₂	4,90	5,06	3,39	4,67	4,76	4,08	3,72	3,88	4,72
Al ₂ O ₃	15,42	6,66	11,70	6,74	9,47	7,17	10,57	7,68	6,84
Fe ₂ O ₃ t	14,73	19,72	11,32	21,20	18,42	18,57	16,93	16,05	17,79
MnO	0,17	0,31	0,16	0,62	0,26	1,05	0,27	1,80	2,86
MgO	5,28	7,41	7,97	8,12	6,38	8,27	7,22	7,85	7,02
CaO	10,03	12,78	14,74	12,14	11,22	13,37	11,93	14,04	13,45
Na ₂ O	3,35	1,91	2,74	1,34	1,98	1,56	2,64	1,85	1,94
K ₂ O	3,48	3,00	1,76	3,79	3,54	3,15	2,91	2,47	2,79
P ₂ O ₅	1,14	0,98	0,98	0,99	1,17	1,22	0,96	0,52	1,50
Total	100,36	99,22	100,05	100,52	98,92	99,95	99,99	99,37	98,80

N°	46	47	48	49	50	51	52	DAPGG-B (ME)	
								1	2
SiO ₂	39,44	42,51	43,36	44,28	41,32	40,51	42,14	29,08	43,37
TiO ₂	5,07	4,53	3,40	5,29	5,83	5,93	3,69	5,00	3,21
Al ₂ O ₃	6,12	14,38	7,37	8,81	11,38	12,07	12,27	8,92	8,02
Fe ₂ O ₃ t	17,93	14,77	16,99	12,86	14,61	17,43	17,78	6,57	16,05
MnO	2,10	0,48	1,06	0,73	0,42	0,46	0,35	10,37	1,23
MgO	8,52	5,72	8,27	7,83	6,80	5,52	6,54	3,94	9,81
CaO	13,78	10,62	14,59	15,95	12,74	10,41	11,66	12,46	11,02
Na ₂ O	1,19	2,73	1,82	2,00	2,21	2,54	2,43	3,63	2,18
K ₂ O	3,01	3,33	2,35	1,77	2,68	3,71	3,03	0,78	3,29
P ₂ O ₅	0,89	0,64	0,77	0,65	0,92	0,89	0,83	1,05	0,32
Total	98,05	99,71	99,98	100,17	98,91	99,47	100,72	81,80	98,50

N°	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	40,68	37,93	43,04	37,26	40,14	34,73	36,89	39,92	36,41
TiO ₂	1,98	6,21	3,08	5,92	7,53	7,39	3,56	6,31	5,29
Al ₂ O ₃	10,48	5,44	7,84	8,64	10,61	6,21	8,66	7,21	8,75
Fe ₂ O ₃ t	14,27	26,52	22,34	20,31	17,68	13,85	13,85	15,56	27,23
MnO	4,08	2,00	0,35	1,41	0,52	6,14	6,62	2,18	1,60
MgO	7,39	6,05	7,91	8,99	6,66	5,88	7,70	8,89	6,95
CaO	9,99	8,93	9,87	8,76	8,42	13,17	11,49	11,57	7,16
Na ₂ O	3,10	2,88	2,90	1,53	2,53	2,18	2,11	1,25	2,33
K ₂ O	3,11	2,80	2,55	4,38	4,51	1,93	2,52	3,86	3,67
P ₂ O ₅	1,17	<LQ	0,26	1,02	0,73	0,60	0,62	0,68	0,64
Total	96,25	98,76	100,14	98,22	99,33	92,08	94,02	97,44	100,03

N°	12	13	14	15	16	17	18	19	20
SiO ₂	40,78	38,37	28,35	40,80	32,05	42,40	37,97	40,03	43,42
TiO ₂	1,40	2,24	5,22	6,18	6,01	7,09	6,79	5,13	2,53
Al ₂ O ₃	10,49	7,08	8,07	9,75	8,14	8,96	4,77	8,23	8,25
Fe ₂ O ₃ t	18,08	26,34	16,90	12,14	31,78	13,31	13,15	20,93	22,50
MnO	2,09	3,12	9,60	2,72	1,41	1,91	6,65	1,64	0,41
MgO	6,70	6,90	4,68	6,88	6,35	5,69	7,17	8,01	7,45
CaO	8,16	7,63	9,28	12,40	8,03	11,93	14,03	8,82	6,86
Na ₂ O	4,01	3,25	2,56	2,81	2,06	3,75	1,87	2,24	3,99
K ₂ O	3,45	2,54	2,09	2,52	3,07	2,06	1,89	3,52	3,78
P ₂ O ₅	1,98	0,29	0,55	0,90	0,78	0,59	0,26	<LQ	1,02
Total	97,14	97,76	87,30	97,10	99,68	97,69	94,55	98,55	100,21

Tabela 2A (continuação)

N°	21	22	23	24	25	26	27	28	29
SiO ₂	37,85	31,74	36,14	33,84	44,51	39,77	41,85	35,83	37,79
TiO ₂	3,89	5,46	3,58	6,29	6,09	9,32	4,95	6,48	8,48
Al ₂ O ₃	8,19	5,64	9,42	8,36	5,76	9,05	6,77	8,17	9,71
Fe ₂ O ₃ t	16,08	14,09	28,35	19,83	15,72	14,75	19,78	15,81	19,01
MnO	3,41	9,90	1,50	5,16	0,41	0,49	0,49	3,98	1,13
MgO	7,64	6,57	8,27	7,40	8,37	6,47	7,91	7,08	4,83
CaO	10,69	10,83	5,49	8,96	13,79	11,18	11,92	10,09	10,20
Na ₂ O	2,31	1,61	1,78	1,37	2,32	2,89	2,65	2,27	4,16
K ₂ O	3,50	2,65	4,10	3,71	2,38	3,31	2,30	3,35	1,92
P ₂ O ₅	1,92	0,61	0,21	0,35	0,52	1,71	0,78	0,55	0,89
Total	95,48	89,10	98,84	95,27	99,87	98,94	99,40	93,61	98,11

N°	30	31	32	33	34	35	36	37	38
SiO ₂	45,24	48,30	46,84	45,68	44,99	40,35	44,66	46,22	40,62
TiO ₂	4,86	2,55	2,20	2,19	5,71	1,41	5,56	3,25	3,73
Al ₂ O ₃	11,59	4,99	6,94	6,75	7,83	9,78	14,33	13,74	10,5
Fe ₂ O ₃ t	10,63	12,23	15,53	17,67	15,09	20,20	11,69	8,65	23,32
MnO	0,22	0,37	0,29	0,42	0,27	1,47	0,19	0,1541	0,419
MgO	5,02	11,14	8,82	9,60	5,01	5,22	5,61	5,14	7,21
CaO	11,30	16,71	12,34	10,73	11,32	7,02	10,07	11,3	7,46
Na ₂ O	5,98	1,92	3,01	2,47	4,56	3,07	3,66	6,41	3,41
K ₂ O	1,51	1,09	1,76	2,85	1,28	3,00	2,60	1,28	2,73
P ₂ O ₅	1,72	<LQ	0,45	0,32	0,90	1,50	0,39	2,45	0,3499
Total	98,07	99,30	98,18	98,67	96,96	93,02	98,77	98,5941	99,7489

N°	39	40	41	42	43	44	45	46	47
SiO ₂	41,27	37,33	46,51	36,59	42,59	42,94	40,75	44,91	47,52
TiO ₂	1,76	10,86	1,5082	7,95	1,67	3,91	4,18	7,28	2,46
Al ₂ O ₃	6,1	10,08	13,57	8,33	12,46	6,68	12,71	5,75	6,05
Fe ₂ O ₃ t	20,45	10,14	10,6	23,24	17,96	19,95	16,06	12,50	15,79
MnO	0,33	0,1723	0,1699	0,3882	0,297	0,32	0,29	0,21	0,27
MgO	6,49	2,59	5,69	6,65	9,14	10,16	5,66	7,11	9,10
CaO	10,44	15,07	10,34	7,51	6,38	11,78	10,28	15,49	14,16
Na ₂ O	2,22	2,25	4,24	1,3236	1,86	1,82	3,28	2,13	3,16
K ₂ O	1,1356	0,2152	1,1875	3,39	4,82	2,64	2,84	0,57	1,15
P ₂ O ₅	1,3065	2,33	1,0232	<LQ	0,6001	<LQ	2,28	0,14	0,00
Total	91,5021	91,0375	94,8388	95,3718	97,7771	100,20	98,33	96,09	99,66

		DSMU-B2 (ME)							
N°	48	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	42,07	43,48	41,93	43,29	44,34	41,95	45,57	46,02	40,68
TiO ₂	2,61	3,67	3,59	3,85	3,63	3,86	3,06	2,51	3,69
Al ₂ O ₃	8,70	18,80	16,57	15,31	19,05	15,07	18,41	20,34	15,97
Fe ₂ O ₃ t	22,73	10,04	10,80	10,21	10,83	10,27	9,08	9,76	11,74
MnO	0,32	0,13	0,15	0,15	0,15	0,18	0,14	0,15	0,21
MgO	4,32	4,58	5,39	6,95	4,22	6,79	4,48	2,93	5,66
CaO	6,01	11,15	11,35	14,42	10,03	14,41	10,49	7,56	12,76
Na ₂ O	3,29	4,76	2,84	2,94	4,67	2,44	4,03	5,04	3,13
K ₂ O	2,35	2,24	4,08	2,13	2,88	2,49	3,53	4,20	2,88
P ₂ O ₅	1,22	0,87	0,87	0,77	1,01	0,75	1,09	1,26	0,86
Total	93,62	99,72	97,57	100,02	100,81	98,21	99,87	99,77	97,58

Tabela 2A (continuação)

N°	9	10	11	12	13	14	15	16	17
SiO ₂	44,80	44,42	43,95	43,21	40,82	41,01	45,04	43,76	43,87
TiO ₂	3,35	3,81	3,53	3,78	4,27	4,17	3,15	3,48	3,26
Al ₂ O ₃	19,12	17,76	17,00	16,99	16,25	16,41	19,52	17,20	19,14
Fe ₂ O ₃ t	9,92	10,28	11,07	10,88	12,17	11,37	10,42	10,72	10,18
MnO	0,15	0,16	0,16	0,16	0,20	0,16	0,16	0,14	0,14
MgO	4,31	4,89	6,30	6,39	5,89	5,89	3,93	5,51	4,41
CaO	11,22	10,82	10,66	11,86	12,56	12,65	9,67	11,38	10,55
Na ₂ O	4,54	3,66	4,02	3,76	3,74	3,35	4,95	3,69	4,66
K ₂ O	2,50	3,21	2,45	2,33	2,16	2,54	3,00	3,14	2,85
P ₂ O ₅	0,84	0,95	0,86	0,67	0,84	0,79	1,01	0,98	1,02
Total	100,75	99,96	100,00	100,02	98,89	98,34	100,84	100,01	100,08

N°	18	19	20	21	22	23	24	25
SiO ₂	43,20	43,55	44,18	43,05	44,84	45,08	44,53	43,60
TiO ₂	3,81	3,60	3,53	4,10	3,28	3,16	3,39	3,86
Al ₂ O ₃	17,13	17,74	18,25	17,12	18,69	18,89	17,98	16,99
Fe ₂ O ₃ t	10,48	10,55	9,12	10,05	9,65	9,43	10,30	10,58
MnO	0,16	0,16	0,15	0,15	0,17	0,14	0,14	0,14
MgO	5,32	5,15	5,49	5,91	4,48	4,40	5,05	5,86
CaO	12,84	11,67	12,45	12,48	10,58	10,40	10,76	12,53
Na ₂ O	3,68	3,81	4,54	3,43	3,77	4,13	3,45	3,22
K ₂ O	2,58	2,85	1,99	2,60	3,72	3,46	3,42	2,97
P ₂ O ₅	0,74	0,87	0,87	0,82	1,04	1,10	1,04	0,85
Total	99,93	99,95	100,57	99,71	100,21	100,19	100,06	100,60

Tabela 3A: Análises de elementos menores e traços por LA-ICP-MS das matrizes das amostras DAPGG-BE, DAPGG-B e DSMU-B2 em ppm.

	DAPGG-BE(ME)								
Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sc	39	36	39	38	36	40	39	41	40
V	341	367	374	418	357	382	382	406	385
Cr	144	108	111	117	128	212	123	166	236
Co	44	50	48	56	50	51	46	55	54
Ni	94	97	95	112	94	101	90	106	106
Zn	81	95	110	106	88	93	85	98	88
Rb	75	92	91	114	81	94	84	97	96
Sr	1174	1305	1288	1345	1283	1250	1411	1322	1302
Y	18	21	23	23	19	22	28	30	27
Zr	390	407	398	398	381	379	485	464	428
Nb	111	111	118	106	104	113	136	126	123
Cs	43	46	56	71	61	52	56	57	79
Ba	1417	1666	1530	1885	1444	1626	1264	1621	1565
La	104	113	112	115	107	106	131	123	120
Ce	201	215	211	223	209	199	242	231	226
Pr	24	26	25	27	25	25	30	28	28
Nd	92	101	98	103	97	92	117	108	109
Sm	14	15	15	16	15	14	18	17	17
Eu	3,84	4,10	4,17	4,21	3,89	3,88	4,77	4,48	4,48
Gd	9,78	10,2	10,7	10,3	9,54	9,65	12,4	11,8	11,7
Tb	1,06	1,15	1,19	1,20	1,04	1,14	1,42	1,43	1,34
Dy	5,50	6,09	6,42	6,57	5,48	6,24	7,61	7,81	7,44
Ho	0,84	0,94	1,05	1,01	0,87	0,95	1,22	1,29	1,21
Er	1,93	2,16	2,38	2,34	1,89	2,16	2,81	2,92	2,72
Tm	0,23	0,25	0,29	0,27	0,24	0,27	0,33	0,37	0,35
Yb	1,40	1,47	1,64	1,73	1,40	1,54	1,88	2,05	1,99
Lu	0,19	0,21	0,22	0,21	0,18	0,19	0,23	0,25	0,26
Hf	9,33	9,73	9,58	9,68	9,43	9,04	11,3	11,1	10,2
Ta	7,04	7,40	8,20	7,32	7,04	7,34	9,40	8,25	8,13
Th	8,43	10,44	10,43	10,32	8,01	8,66	12,1	11,7	10,8
U	1,43	1,54	1,67	1,79	1,48	1,81	1,83	1,83	1,72

Tabela 3A (continuação)

	DAPGG-BE(ME)				DAPGG-B(ME)			
Nº	10	11	12	13	1	2	3	4
Sc	50	58	46	36	33	26	40	33
V	341	556	338	453	299	319	274	360
Cr	374	543	219	57	91	69	189	66
Co	51	60	36	42	41	34	33	49
Ni	124	154	79	69	79	71	80	88
Zn	95	178	78	113	127	95	75	86
Rb	244	271	105	142	61	88	58	94
Sr	1144	1834	1153	1617	638	1236	885	1398
Y	75	131	23	34	31	26	28	23
Zr	585	1010	417	586	426	371	407	450
Nb	153	263	103	153	92	136	85	101
Cs	4	4	3	4	14	79	20	57
Ba	1640	3294	1352	1934	879	2091	651	1428
La	266	437	114	172	80	118	91	113
Ce	517	865	210	302	145	220	163	200
Pr	60	99	26	39	19	28	21	25
Nd	255	397	102	147	80	113	83	98
Sm	54	88	16	24	13	18	13	15
Eu	7,44	11,9	4,07	5,63	3,23	4,48	3,22	3,71
Gd	49,4	78,5	11,1	17,1	9,86	11,4	9,31	9,85
Tb	5,95	9,69	1,30	1,97	1,22	1,40	1,14	1,19
Dy	27,9	47,6	6,89	10,3	6,59	7,02	6,02	6,10
Ho	4,06	6,69	1,09	1,64	1,11	1,09	1,04	0,97
Er	7,41	13,4	2,50	3,54	2,74	2,39	2,54	2,17
Tm	0,84	1,44	0,30	0,41	0,33	0,28	0,30	0,27
Yb	3,97	7,08	1,63	2,48	1,99	1,68	1,78	1,57
Lu	0,42	0,67	0,21	0,31	0,25	0,20	0,23	0,23
Hf	14,0	23,0	10,4	14,0	10,7	9,34	10,1	10,7
Ta	10,1	16,9	7,09	10,5	7,32	9,26	6,85	8,15
Th	16,4	27,7	10,7	14,1	7,21	18,8	7,52	11,9
U	36,5	89,3	14,4	24,9	1,40	1,48	1,58	1,49

Tabela 3A (continuação)

	DAPGG-B(ME)			DSMU-B2(ME)					
Nº	5	6	7	1	2	3	4	5	6
Sc	32	37	41	23	15	26	21	21	22
V	286	347	290	210	191	203	211	210	209
Cr	84	143	169	416	46	253	270	263	111
Co	38	54	51	27	25	22	25	33	24
Ni	75	96	96	38	19	27	38	79	27
Zn	74	110	95	89	96	72	86	86	76
Rb	85	108	106	50	65	45	52	46	41
Sr	1022	1585	1274	1286	1758	1063	1279	1385	1182
Y	24	23	17	31	31	26	26	25	25
Zr	417	417	273	359	349	299	302	300	289
Nb	130	109	36	91	117	74	86	84	78
Cs	47	46	80	5	6	5	4	5	3
Ba	1532	2472	2485	1080	1522	864	1038	957	925
La	101	125	79	79	93	63	72	67	63
Ce	192	218	134	136	156	120	141	130	129
Pr	24	27	17	18	19	16	18	17	16
Nd	97	106	67	76	78	64	71	68	64
Sm	16	16	10	14	13	12	13	12	12
Eu	4,08	3,82	2,52	3,98	3,90	3,58	3,91	3,78	3,61
Gd	10,5	9,98	6,95	10,7	10,2	8,91	9,48	9,20	8,79
Tb	1,31	1,15	0,80	1,25	1,25	1,06	1,14	1,09	1,10
Dy	6,45	6,00	3,76	7,19	6,94	6,10	6,41	6,30	6,02
Ho	1,02	0,96	0,65	1,24	1,22	1,06	1,08	1,06	1,01
Er	2,35	2,16	1,49	2,94	2,84	2,41	2,51	2,41	2,38
Tm	0,28	0,25	0,17	0,35	0,35	0,29	0,31	0,28	0,28
Yb	1,61	1,42	1,11	2,22	2,21	1,91	1,96	1,83	1,85
Lu	0,19	0,19	0,15	0,31	0,28	0,24	0,26	0,25	0,25
Hf	10,1	9,69	6,62	8,22	7,10	7,11	7,06	6,93	6,88
Ta	7,89	8,06	1,98	5,78	6,53	4,56	5,05	4,84	4,67
Th	13,8	10,1	15,2	8,74	10,9	6,77	7,58	7,08	6,83
U	1,40	1,29	1,07	1,74	2,27	1,39	1,79	1,65	1,57

Tabela 3A (continuação)

DSMU-B2(ME)				
Nº	8	9	10	11
Sc	22	22	24	18
V	212	221	220	226
Cr	129	81	231	137
Co	26	28	26	27
Ni	31	28	33	30
Zn	86	100	73	86
Rb	52	60	40	55
Sr	1452	1759	1141	1358
Y	29	30	27	26
Zr	335	356	303	307
Nb	102	109	80	87
Cs	5	5	5	6
Ba	1202	1283	857	929
La	78	85	67	69
Ce	145	158	128	135
Pr	18	19	17	17
Nd	72	76	69	68
Sm	13	13	12	12
Eu	3,96	4,15	3,67	3,69
Gd	9,92	10,3	9,82	9,16
Tb	1,19	1,26	1,15	1,11
Dy	6,80	7,22	6,36	6,26
Ho	1,14	1,25	1,10	1,04
Er	2,77	2,96	2,56	2,54
Tm	0,34	0,36	0,30	0,31
Yb	2,13	2,24	1,80	1,80
Lu	0,28	0,30	0,24	0,24
Hf	7,36	7,74	6,94	6,71
Ta	5,51	5,92	4,73	5,00
Th	8,51	9,84	6,86	7,34
U	1,90	2,19	1,47	1,67

Tabela 4A: Análises químicas de rocha total, matriz e mineralogia normativa. Em parênteses, encontra-se o número de replicatas. Os óxidos e os elementos Cr e Ni foram analisados por FRX e os demais por ICP-MS.

Dique Setor / Análise	DAPGG BE(ME)		DAPGG B		DAPGG BM		DAPGG B(ME)	
Oxido / %	X (52)	DP (52)	X (1)		X (1)		X (49)	DP (49)
SiO ₂	42,44	1,25	40,76		40,04		40,17	4,66
TiO ₂	5,12	0,82	4,97		5,12		4,76	2,28
Al ₂ O ₃	9,64	1,94	7,16		7,36		8,59	2,30
Fe ₂ O _{3t}	15,90	1,81	16,05		16,32		17,44	5,37
MnO	0,46	0,56	0,87		1,75		1,54	1,80
MgO	7,08	0,92	7,93		7,34		6,96	1,73
CaO	13,12	1,43	12,67		11,48		10,39	2,54
Na ₂ O	2,63	0,63	2,56		2,43		2,80	1,09
K ₂ O	2,45	0,58	2,47		2,87		2,58	1,07
P ₂ O ₅	0,92	0,20	0,75		0,77		0,88	0,63
P.F.*	-	-	3,56		3,79		-	-
Total	99,76	0,57	99,75		99,27		96,65	3,73
FeO**	11,64		11,70		11,97		12,95	
Fe ₂ O ₃	2,97		3,05		3,01		3,05	
mg#***	0,52		0,55		0,52		0,49	
Ortoclásio (Or)	14,71		9,33		11,72		16,12	
Albita (Ab)	0,37		-		-		1,80	
Anortita (A n)	7,39		0,79		0,74		3,42	
Nefelina (Ne)	12,03		12,37		11,83		12,60	
Diopsídio (Di)	43,00		49,19		44,70		37,14	
Olivina (Ol)	6,15		7,20		9,27		12,61	
Magnetita (Mt)	4,37		4,67		4,64		4,68	
Ilmenita (Il)	9,88		9,95		10,33		9,54	
Apatita (Ap)	2,16		1,83		1,90		2,16	
Leucita (Lc)	-		4,75		4,93		-	
Dissilicado de Ca(Cs)	-		-		-		-	
Elementos / ppm	X(13 x 4)	DP(13 x4)	X (3)	DP (3)	X(3)	DP(3)	X(7 x 4)	DP(7x4)
Sc	38	2	39	3	37	3	34	5
V	379	34	415	6(2)	441	(1)	311	32
Cr	139	49	137	0 (2)	103	(1)	116	50
Co	49	6	59	3(2)	56	(1)	43	9
Ni	97	14	135	7(2)	110	(1)	83	10
Zn	94	11	100	0 (2)	120	(1)	95	19
Rb	122	63	95	1	111	2	86	20
Sr	1257	73	1174	46	1132	64	1148	322
Y	23,3	3,7	23,0	0,8	30,4	1,0	24,8	4,4
Zr	443	74	400	7	396	6	414	26
Nb	121	18	98	4	102	4	98	33
Cs	41	28	46	1	54	1	49	26
Ba	1579	198	1708	70	1518	81	1648	733
La	113	6	110	2	114	2	101	18
Ce	217	14	229	5	249	18	182	35
Pr	27	2	25	0	26	0	23	4
Nd	102	8	94	1	97	1	92	16
Sm	15,8	1,3	14,6	0,4	15,2	0,36	14,6	2,5
Eu	4,19	0,30	3,91	0,10	4,01	0,17	3,58	0,65
Gd	10,7	1,0	11,0	1,0	12,7	0,7	9,69	1,37
Tb	1,25	0,13	1,26	0,09	1,53	0,01	1,17	0,19
Dy	6,61	0,83	5,64	0,50	7,25	0,10	6,36	0,40
Ho	1,10	0,23	0,91	0,06	1,15	0,08	0,98	0,15
Er	2,38	0,36	2,10	0,25	2,90	0,07	2,26	0,40
Tm	0,29	0,05	0,25	0,03	0,33	0,01	0,27	0,05
Yb	1,67	0,24	1,34	0,06	1,72	0,03	1,59	0,28
Lu	0,21	0,02	0,20	0,00	0,23	0,03	0,20	0,03
Hf	10,6	1,7	9,88	0,10	9,92	0,20	10,1	0,5
Ta	8,15	1,22	6,10	0,3(2)	6,30	(1)	7,92	0,82
Th	11,0	2,4	9,72	0,33	11,3	0,3	12,1	4,2
U	1,68	0,16	2,13	0,16	2,24	0,06	1,39	0,17

* Perda ao fogo

** Calculado pelo MELTS

***Mg/(Fe²⁺ + Mg)

Tabela 4A (continuação)

Dique Setor / Análise	DAPGG I		DAPGG IM		DAPGG C1		DAPGG C1M	
Oxido / %	X (1)		X (1)		X (1)		X (1)	
SiO ₂	40,96		41,09		41,14		40,34	
TiO ₂	4,97		5,10		4,93		5,09	
Al ₂ O ₃	7,08		7,22		7,05		7,26	
Fe ₂ O _{3t}	16,18		16,07		15,86		15,94	
MnO	0,59		0,54		0,66		0,71	
MgO	8,65		7,59		8,57		7,61	
CaO	11,85		12,88		12,26		13,01	
Na ₂ O	2,17		2,83		2,26		2,73	
K ₂ O	3,02		2,18		2,65		2,31	
P ₂ O ₅	0,76		0,77		0,75		0,77	
P.F.*	3,41		3,33		3,60		3,94	
Total	99,64		99,60		99,73		99,71	
FeO**	11,86		11,69		11,61		11,56	
Fe ₂ O ₃	3,00		3,08		2,96		3,09	
mg#***	0,57		0,54		0,57		0,54	
Ortoclásio (Or)	11,29		12,85		12,86		7,26	
Albita (Ab)	-		-		-		-	
Anortita (A n)	0,69		0,59		1,33		0,78	
Nefelina (Ne)	10,48		13,66		10,92		13,24	
Diopsídio (Di)	45,58		50,06		46,88		50,73	
Olivina (Ol)	9,75		5,57		8,98		5,56	
Magnetita (Mt)	4,58		4,71		4,53		4,74	
Ilmenita (Il)	9,95		10,20		9,87		10,23	
Apatita (Ap)	1,86		1,88		1,83		1,89	
Leucita (Lc)	5,89		0,56		2,86		5,64	
Dissilicado de Ca(Cs)	-		-		-		-	
Elementos / ppm	X (2)	DP(2)	X(4)	DP(4)	X(2)	DP(2)	X(3)	DP(3)
Sc	40	4	37	1	40	3	35	4
V	419	(1)	431	4(2)	409	(1)	421	(1)
Cr	205	(1)	137	(1)	205	(1)	137	(1)
Co	65	(1)	56	2(2)	60	(1)	56	(1)
Ni	170	(1)	120	(1)	170	(1)	120	(1)
Zn	90	(1)	110	(1)	110	(1)	110	(1)
Rb	117	2	92	1	104	1	117	1
Sr	1134	96	1179	80	1144	87	1022	70
Y	22,2	0,3	22,3	0,8	23,3	0,6	16,0	0,0
Zr	403	15	413	11	394	6	313	6
Nb	102	2	102	5	100	3	78	3
Cs	33	1	48	1	34	0	31	1
Ba	1479	82	1590	98	1390	49	1313	109
La	110	2	114	3	109	3	85	3
Ce	230	4	239	2	227	5	171	6
Pr	25	0	26	0	25	1	19	0
Nd	95	1	98	0	94	0	71	2
Sm	14,5	0,2	14,8	0,6	14,5	0,3	11,0	0,2
Eu	3,95	0,04	4,08	0,11	3,90	0,08	3,02	0,02
Gd	11,4	1,4	11,75	0,98	11,0	1,4	8,56	1,00
Tb	1,28	0,09	1,33	0,07	1,34	0,03	0,97	0,06
Dy	5,86	0,29	5,92	0,44	6,12	0,18	4,45	0,13
Ho	0,89	0,05	0,90	0,07	0,94	0,05	0,63	0,07
Er	2,09	0,28	2,20	0,23	2,27	0,22	1,52	0,30
Tm	0,24	0,01	0,25	0,02	0,26	0,01	0,17	0,02
Yb	1,33	0,02	1,43	0,06	1,49	0,09	1,03	0,02
Lu	0,20	0,01	0,20	0,01	0,20	0,00	0,15	0,00
Hf	10,1	0,4	10,5	0,5	9,76	0,09	7,66	0,05
Ta	6,20	(1)	6,75	0,07	6,50	(1)	6,90	(1)
Th	9,07	0,81	10,8	0,4	9,50	0,15	9,87	0,10
U	2,01	0,02	2,53	0,16	1,94	0,07	2,11	0,13

Tabela 4A (continuação)

Dique Setor / Análise	DAPGG C2	DSMB B	DSMB C	DSMU BE1				
Oxido / %	X (1)	X (1)	X (1)	X (2)				
SiO ₂	40,04	41,05	44,89	41,51	0,25			
TiO ₂	3,96	4,18	3,37	3,53	0,01			
Al ₂ O ₃	5,82	14,86	14,84	13,26	0,06			
Fe ₂ O _{3t}	15,32	12,58	10,83	11,87	0,06			
MnO	0,30	0,17	0,16	0,18	0,06			
MgO	13,83	5,62	7,05	9,04	0,06			
CaO	11,83	9,37	8,75	11,09	0,06			
Na ₂ O	1,23	3,37	3,30	2,99	0,06			
K ₂ O	2,82	2,10	2,96	2,31	0,06			
P ₂ O ₅	0,58	1,65	1,29	0,85	0,06			
P.F.*	4,16	4,44	2,31	3,62	0,06			
Total	99,89	99,39	99,75	100,23	0,06			
FeO**	11,33	9,39	8,05	8,75				
Fe ₂ O ₃	2,73	2,14	1,88	2,14				
mg#***	0,69	0,52	0,61	0,65				
Ortoclásio (Or)	-	13,22	18,12	14,27				
Albita (Ab)	-	15,39	15,67	0,89				
Anortita (A n)	2,15	20,46	17,54	16,69				
Nefelina (Ne)	5,97	8,12	7,18	13,82				
Diopsídio (Di)	42,19	14,34	15,12	28,20				
Olivina (Ol)	21,27	12,66	13,84	13,85				
Magnetita (Mt)	4,19	3,31	2,83	3,25				
Ilmenita (Il)	7,96	8,46	6,63	7,01				
Apatita (Ap)	1,42	4,07	3,10	2,06				
Leucita (Lc)	13,83	-	-	-				
Dissilicado de Ca(Cs)	1,09	-	-	-				
Elementos / ppm	X(2)	DP(2)	X(3)	DP(3)	X (2)	DP(2)	X(4)	DP(4)
Sc	35	4	16	0	18	2	21	1
V	345	(1)	293	(1)	224	(1)	262	1(2)
Cr	479	(1)	<LQ	(1)	103	(1)	171	0 (2)
Co	73	(1)	32	(1)	30	(1)	42	4(2)
Ni	460	(1)	<LQ	(1)	100	(1)	135	7(2)
Zn	110	(1)	100	(1)	110	(1)	90	0(2)
Rb	117	1	44	2	46	3	54	2
Sr	1022	70	1805	6	2106	53	1235	14
Y	16,0	0,0	27,0	0,0	23,6	2,4	24,2	2,4
Zr	313	6	151	0	142	6	265	7
Nb	78	3	45	0	41	4	72	6
Cs	31	1	0	0	1	0	4	0
Ba	1313	109	2348	109	2959	137	961	7
La	85	3	58	0	58	3	67	2
Ce	171	6	125	0	126	5	131	3
Pr	19	0	16	0	16	1	15	1
Nd	71	2	70	0	66	6	58	4
Sm	11,0	0,2	12,8	0,0	11,8	1,1	10,5	1,0
Eu	3,02	0,02	4,57	0,01	4,43	0,53	3,25	0,17
Gd	8,56	1,00	9,99	0,39	9,64	0,48	8,91	0,40
Tb	0,97	0,06	1,33	0,00	1,21	0,09	1,18	0,06
Dy	4,45	0,13	6,31	0,02	5,66	0,49	5,69	0,39
Ho	0,63	0,07	1,09	0,01	0,95	0,11	0,96	0,10
Er	1,52	0,30	2,61	0,01	2,22	0,29	2,20	0,37
Tm	0,17	0,02	0,31	0,01	0,27	0,03	0,29	0,04
Yb	1,03	0,02	1,76	0,03	1,57	0,06	1,72	0,05
Lu	0,15	0,00	0,26	0,00	0,23	0,01	0,24	0,03
Hf	7,66	0,05	3,55	0,22	3,50	0,28	6,13	0,15
Ta	5,40	(1)	2,70	(1)	2,90	(1)	4,40	0(2)
Th	9,87	0,10	3,39	0,01	3,04	0,34	6,73	0,34
U	2,11	0,13	0,80	0,00	0,62	0,18	1,79	0,16

Tabela 4A (continuação)

Dique	DSMU		DSMU		DSMU		DSMU	
Setor / Análise	BE2		B1		B1M		B2	
Oxido / %	X(1)		X (2)		X(1)		X(1)	
SiO ₂	40,81		41,51		0,01		41,19	
TiO ₂	3,33		3,52		0,01		3,51	
Al ₂ O ₃	12,66		13,36		0,01		13,06	
Fe ₂ O _{3t}	11,69		11,81		0,01		11,86	
MnO	0,17		0,18		0,00		0,18	
MgO	9,98		8,68		0,00		9,10	
CaO	10,86		11,18		0,01		11,03	
Na ₂ O	2,49		3,00		0,02		2,87	
K ₂ O	2,39		2,32		0,00		2,27	
P ₂ O ₅	0,79		0,86		0,00		0,84	
P.F.*	5,24		3,11		0,04		4,36	
Total	100,41		99,52		0,05		100,27	
FeO**	8,66		8,70		8,76		8,72	
Fe ₂ O ₃	2,07		2,14		2,13		2,05	
mg#***	0,67		0,64		0,65		0,69	
Ortoclásio (Or)	14,02		14,37		14,13		14,66	
Albita (Ab)	-		1,07		1,04		-	
Anortita (A n)	17,31		16,93		16,90		15,69	
Nefelina (Ne)	12,12		13,81		13,29		12,35	
Diopsídio (Di)	27,66		28,46		28,16		26,65	
Olivina (Ol)	16,33		13,07		14,19		18,93	
Magnetita (Mt)	3,19		3,25		3,25		3,17	
Ilmenita (Il)	6,71		7,01		7,02		6,55	
Apatita (Ap)	1,94		2,09		2,05		1,90	
Leucita (Lc)	0,76		-		-		0,15	
Dissilicado de Ca(Cs)	-		-		-		-	
Elementos / ppm	X(2)	DP(2)	X(4)	DP(4)	X(3)	DP(3)	X(3)	DP(3)
Sc	21	1	21	1	21	1	19	0
V	245	(1)	261	1(2)	262	(1)	243	(1)
Cr	205	(1)	171	0(2)	205	(1)	239	(1)
Co	45	(1)	41	3(2)	40	(1)	46	(1)
Ni	180	(1)	125	7(2)	140	(1)	270	(1)
Zn	90	(1)	95	7(2)	250	(1)	100	(1)
Rb	51	2	52	1	51	1	52	2
Sr	1333	39	1460	38	1156	37	1245	19
Y	26,2	1,8	26,2	2,0	26,4	1,2	25,0	0,2
Zr	281	8	281	7	278	6	256	8
Nb	77	5	78	5	79	9	70	5
Cs	2	0	2	0	3	0	4	0
Ba	1015	29	1024	50	981	16	918	21
La	73	2	74	1	71	1	64	3
Ce	141	4	145	5	138	2	125	4
Pr	16	1	16	1	16	1	15	0
Nd	63	3	64	2	62	2	58	0
Sm	11,5	0,8	11,5	0,5	11,3	0,5	10,7	0,1
Eu	3,53	0,13	3,52	0,13	3,49	0,11	3,24	0,04
Gd	9,56	0,55	9,79	0,42	9,47	0,39	8,61	0,46
Tb	1,26	0,07	1,29	0,03	1,24	0,05	1,14	0,06
Dy	6,10	0,37	6,30	0,28	6,07	0,26	5,72	0,06
Ho	1,02	0,11	1,05	0,07	1,03	0,07	0,99	0,02
Er	2,42	0,26	2,45	0,28	2,42	0,24	2,36	0,04
Tm	0,33	0,00	0,31	0,03	0,31	0,02	0,29	0,01
Yb	1,80	0,08	1,89	0,10	1,76	0,07	1,61	0,13
Lu	0,24	0,03	0,26	0,02	0,25	0,02	0,24	0,01
Hf	6,23	0,18	6,33	0,12	6,33	0,13	5,72	0,11
Ta	3,70	(1)	4,15	0,20(2)	3,90	(1)	3,50	(1)
Th	7,18	0,46	7,38	0,35	7,00	0,50	6,75	0,06
U	1,81	0,25	1,86	0,04	1,73	0,03	1,61	0,03

Tabela 4A (continuação)

Dique Setor / Análise	DSMU B2(ME)		DSMU C		DSMU CM		DSMPN		DSMPN M	
Oxido / %	X(2)		X(2)		X(1)		X(1)		X(1)	
SiO ₂	43,61	1,43	41,21	0,02	40,80		43,94		43,84	
TiO ₂	3,58	0,39	3,38	0,01	3,47		4,14		4,20	
Al ₂ O ₃	17,67	1,35	12,53	0,01	12,17		15,26		15,38	
Fe ₂ O _{3t}	10,40	0,73	12,19	0,01	12,29		13,40		13,43	
MnO	0,16	0,02	0,19	0,00	0,19		0,20		0,20	
MgO	5,21	0,95	10,64	0,01	10,64		4,23		3,93	
CaO	11,49	1,48	11,30	0,01	11,65		9,45		9,31	
Na ₂ O	3,85	0,69	3,03	0,01	2,82		3,64		3,69	
K ₂ O	2,89	0,59	2,03	0,01	1,98		3,02		2,99	
P ₂ O ₅	0,91	0,14	1,11	0,01	1,09		1,56		1,58	
P.F.*	-	-	2,92	0,06	2,70		0,96		0,99	
Total	99,75	2,92	100,50	0,07	99,80		99,80		99,54	
FeO**	7,59		8,99		9,06		9,94		9,97	
Fe ₂ O ₃	1,96		2,19		2,22		2,35		2,35	
mg#***	0,55		0,68		0,68		0,43		0,41	
Ortoclásio (Or)	17,26		0,22		-		14,00		14,93	
Albita (Ab)	1,59		15,15		15,30		16,76		17,01	
Anortita (A n)	22,64		14,24		13,45		9,49		9,27	
Nefelina (Ne)	16,98		28,48		30,10		17,18		16,41	
Diopsídio (Di)	23,52		16,99		16,54		9,10		8,83	
Olivina (Ol)	6,17		3,29		3,35		3,49		3,49	
Magnetita (Mt)	2,87		6,64		6,86		8,05		8,19	
Ilmenita (Il)	6,87		2,65		2,63		3,70		3,76	
Apatita (Ap)	2,13		-		1,25		-		-	
Leucita (Lc)	-		-		-		-		-	
Dissilicado de Ca(Cs)	-		-		-		-		-	
Elementos / ppm	X(11x)	DP(11x)	X(2)	DP(2)	X(3)	DP(3)	X(2)	DP(2)	X(3)	DP(3)
Sc	22	3	21	3	23	2	8	2	6	0
V	209	12	242	(1)	254	(1)	165	(1)	167	(1)
Cr	168	84	205	(1)	239	(1)	34	(1)	34	(1)
Co	27	3	43	(1)	39	(1)	39	(1)	40	(1)
Ni	32	4	250	(1)	220	(1)	<LQ	(1)	<LQ	(1)
Zn	84	9	90	(1)	90	(1)	130	(1)	130	(1)
Rb	47	8	48	0	47	1	70	2	68	1
Sr	1316	194	1535	24	1488	37	1436	98	1407	17
Y	27,6	2,4	29,2	1,9	30,3	2,1	36,7	1,0	37,4	1,5
Zr	312	26	289	8	298	7	173	240	358	11
Nb	83	17	80	8	79	7	89	1	91	2
Cs	5	1	1	0	1	0	1	0	1	0
Ba	999	150	1061	27	1009	26	1282	64	1268	57
La	71	8	100	4	100	2	89	3	90	2
Ce	134	11	203	19	195	14	180	6	182	5
Pr	17	1	21	1	21	1	21	0	22	0
Nd	69	5	80	2	79	4	87	1	87	3
Sm	12,5	0,8	13,2	1,1	13,9	0,7	16,3	0,2	16,4	0,3
Eu	3,78	0,23	4,01	0,16	4,14	0,17	4,92	0,08	5,00	0,08
Gd	9,52	0,72	11,4	1,0	11,6	0,7	13,7	0,2	14,2	0,4
Tb	1,14	0,09	1,44	0,07	1,48	0,09	1,80	0,02	1,83	0,03
Dy	6,49	0,47	6,98	0,26	7,18	0,31	8,99	0,27	8,94	0,18
Ho	1,12	0,08	1,13	0,15	1,19	0,11	1,45	0,07	1,47	0,11
Er	2,63	0,21	2,69	0,37	2,90	0,22	3,41	0,22	3,56	0,14
Tm	0,32	0,03	0,35	0,01	0,36	0,02	0,43	0,01	0,45	0,02
Yb	1,94	0,19	2,08	0,08	1,96	0,21	2,29	0,15	2,45	0,06
Lu	0,27	0,03	0,29	0,01	0,29	0,03	0,32	0,03	0,34	0,02
Hf	7,11	0,54	6,20	0,42	6,64	0,40	7,56	0,15	7,95	0,25
Ta	5,26	0,65	4,30	(1)	3,80	(1)	6,00	(1)	5,60	(1)
Th	8,05	1,43	9,87	1,24	9,83	0,40	9,45	0,54	9,62	0,24
U	1,77	0,28	2,67	0,18	2,38	0,05	2,22	0,05	2,29	0,10

Tabela 5A: Composição química de elementos maiores e menores em % em massa (m/m) de cristais de olivina nos diques DSMU e DSMB. A fórmula estrutural foi calculada na base de 4 oxigênios e é apresentada em apfu. Os elementos abaixo do limite de quantificação da técnica analítica estão indicados por <LQ. A letra c é a região central e b é a borda do cristal.

Amostra Grão Região	DSMU-BE2 ol 112 b6	DSMU-BE2 ol 112 b7	DSMU-BE2 ol 112 b9	DSMU-BE2 ol 112 b11	DSMU-BE2 ol 112 b12	DSMU-BE2 ol 112 c2	DSMU-BE2 ol 112 c8	DSMU-BE2 ol 113 b8
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	40,28	39,77	40,03	40,37	40,21	40,73	40,45	39,88
FeO	13,73	15,31	13,70	14,19	14,14	11,66	11,70	14,12
MnO	0,20	0,26	0,21	0,21	0,22	0,15	0,16	0,20
MgO	45,18	44,12	45,12	45,11	45,36	47,20	46,94	45,38
CaO	0,34	0,53	0,31	0,40	0,37	0,21	0,19	0,33
NiO	0,21	0,11	0,20	0,20	0,19	0,33	0,31	0,19
Total	99,94	100,09	99,56	100,48	100,50	100,28	99,76	100,10
	Fórmula estrutural calculada na base de 4 oxigênios / apfu							
Si ⁴⁺	1,006	1,001	1,004	1,005	1,001	1,004	1,003	0,998
Fe ²⁺	0,287	0,322	0,287	0,296	0,295	0,240	0,243	0,295
Mn ²⁺	0,004	0,006	0,004	0,005	0,005	0,003	0,003	0,004
Mg ²⁺	1,683	1,655	1,687	1,675	1,684	1,735	1,736	1,692
Ca ²⁺	0,009	0,014	0,008	0,011	0,010	0,006	0,005	0,009
Ni ²⁺	0,004	0,002	0,004	0,004	0,004	0,006	0,006	0,004
Σ cátions	2,994	2,999	2,996	2,995	2,999	2,996	2,997	3,002
Fo	85,4	83,7	85,4	85,0	85,1	87,8	87,7	85,1

Amostra Grão Região	DSMU-BE2 ol 113 b9	DSMU-BE2 ol 113 c2	DSMU-BE2 ol 113 c10	DSMU-BE2 ol 113 c12	DSMU-BE2 ol 115 b2	DSMU-BE2 ol 115 b4	DSMU-BE2 ol 115 c1	DSMU-BE2 ol 115 c3
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	40,10	40,60	40,31	40,66	40,00	39,81	40,51	40,92
FeO	14,82	11,86	13,36	11,68	13,50	12,95	11,83	11,76
MnO	0,24	0,13	0,22	0,14	0,18	0,17	0,13	0,12
MgO	44,52	47,17	45,46	46,91	45,42	46,78	47,06	47,21
CaO	0,52	0,18	0,29	0,20	0,24	0,23	0,17	0,13
NiO	0,12	0,34	0,23	0,30	0,22	0,26	0,37	0,34
Total	100,32	100,28	99,87	99,89	99,56	100,21	100,07	100,48
	Fórmula estrutural calculada na base de 4 oxigênios / apfu							
Si ⁴⁺	1,004	1,002	1,006	1,006	1,003	0,990	1,002	1,007
Fe ²⁺	0,310	0,245	0,279	0,242	0,283	0,269	0,245	0,242
Mn ²⁺	0,005	0,003	0,005	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003
Mg ²⁺	1,661	1,736	1,692	1,731	1,697	1,735	1,736	1,732
Ca ²⁺	0,014	0,005	0,008	0,005	0,007	0,006	0,004	0,003
Ni ²⁺	0,002	0,007	0,005	0,006	0,004	0,005	0,007	0,007
Σ cátions	2,996	2,998	2,994	2,994	2,997	3,010	2,998	2,993
Fo	84,3	87,6	85,8	87,7	85,7	86,6	87,6	87,7

Tabela 5A (continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-B2 ol 96 b1	DSMU-B2 ol 96 c4	DSMU-B2 ol 96 c5	DSMU-B2 ol 96 c7	DSMU-B2 ol 96 c8	DSMU-B2 ol 96' b1	DSMU-B2 ol 96' b2	DSMU-B2 ol 96' b3
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	39,69	40,18	40,29	40,17	40,40	39,65	39,47	39,99
FeO	14,66	12,29	11,78	11,71	11,79	13,84	13,61	13,80
MnO	0,24	0,17	0,13	0,15	0,15	0,21	0,24	0,20
MgO	45,11	47,48	47,84	48,05	48,03	46,05	46,62	45,43
CaO	0,43	0,23	0,20	0,18	0,16	0,32	0,32	0,34
NiO	0,15	0,27	0,34	0,35	0,30	0,20	0,21	0,21
Total	100,29	100,63	100,58	100,60	100,84	100,27	100,47	99,98
	Fórmula estrutural calculada na base de 4 oxigênios / apfu							
Si ⁴⁺	0,994	0,992	0,993	0,990	0,993	0,990	0,983	1,000
Fe ²⁺	0,307	0,254	0,243	0,241	0,242	0,289	0,284	0,289
Mn ²⁺	0,005	0,004	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005	0,004
Mg ²⁺	1,685	1,747	1,757	1,765	1,759	1,714	1,732	1,694
Ca ²⁺	0,012	0,006	0,005	0,005	0,004	0,009	0,008	0,009
Ni ²⁺	0,003	0,005	0,007	0,007	0,006	0,004	0,004	0,004
Σ cátions	3,006	3,008	3,007	3,010	3,007	3,010	3,017	3,000
Fo	84,6	87,3	87,9	88,0	87,9	85,6	85,9	85,4

Amostra Grão Região	DSMU-B2 ol 96' c4	DSMU-B2 ol 96' c5	DSMU-B2 ol 96' c6	DSMU-B2 ol 96' c7	DSMU-B2 ol 96' c7	DSMU-B2 ol 96'' b1	DSMU-B2 ol 96'' b7	DSMU-B2 ol 96'' b8
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	40,50	40,26	40,23	40,03	39,82	40,11	39,15	39,57
FeO	11,52	11,68	11,71	11,57	11,55	13,91	14,38	14,03
MnO	0,15	0,15	0,14	0,13	0,13	0,21	0,25	0,24
MgO	47,56	48,02	47,92	47,81	47,93	45,60	45,94	46,10
CaO	0,19	0,18	0,20	0,18	0,20	0,39	0,43	0,38
NiO	0,33	0,31	0,30	0,33	0,29	0,19	0,15	0,18
Total	100,25	100,59	100,50	100,05	99,92	100,40	100,30	100,50
	Fórmula estrutural calculada na base de 4 oxigênios / apfu							
Si ⁴⁺	0,999	0,991	0,992	0,991	0,987	0,999	0,981	0,987
Fe ²⁺	0,238	0,241	0,241	0,240	0,240	0,290	0,301	0,293
Mn ²⁺	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005	0,005
Mg ²⁺	1,749	1,763	1,761	1,764	1,772	1,693	1,716	1,714
Ca ²⁺	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,010	0,011	0,010
Ni ²⁺	0,006	0,006	0,006	0,007	0,006	0,004	0,003	0,004
Σ cátions	3,001	3,009	3,008	3,009	3,013	3,001	3,019	3,013
Fo	88,0	88,0	87,9	88,0	88,1	85,4	85,1	85,4

Tabela 5A (continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-B2 ol 96'' c3	DSMU-B2 ol 96'' c4	DSMU-B2 ol 96'' c6	DSMU-C ol 63 b3	DSMU-C ol 63 b5	DSMU-C ol 63 b9	DSMU-C ol 63 c6	DSMU-C ol 63' b5
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	39,96	40,22	40,36	40,07	40,04	39,77	40,34	39,63
FeO	11,81	11,54	11,85	14,44	14,97	14,04	11,82	14,30
MnO	0,17	0,17	0,15	0,23	0,24	0,19	0,16	0,22
MgO	47,62	47,82	47,61	45,52	44,72	45,91	47,85	46,12
CaO	0,22	0,19	0,18	0,31	0,41	0,31	0,21	0,32
NiO	0,29	0,33	0,32	0,22	0,12	0,24	0,33	0,19
Total	100,07	100,27	100,47	100,79	100,50	100,46	100,71	100,78
	Fórmula estrutural calculada na base de 4 oxigênios / apfu							
Si ⁴⁺	0,990	0,993	0,995	0,997	1,001	0,992	0,993	0,987
Fe ²⁺	0,245	0,238	0,244	0,300	0,313	0,293	0,243	0,298
Mn ²⁺	0,003	0,004	0,003	0,005	0,005	0,004	0,003	0,005
Mg ²⁺	1,759	1,760	1,750	1,688	1,667	1,707	1,756	1,712
Ca ²⁺	0,006	0,005	0,005	0,008	0,011	0,008	0,005	0,009
Ni ²⁺	0,006	0,007	0,006	0,004	0,002	0,005	0,007	0,004
Σ cátions	3,010	3,007	3,005	3,003	2,999	3,008	3,007	3,013
Fo	87,8	88,1	87,7	84,9	84,2	85,4	87,8	85,2

Amostra Grão Região	DSMU-C ol 63' b6	DSMU-C ol 63' c1	DSMU-C ol 63' c2	DSMU-C ol 63' c3	DSMU-C ol 63' c4	DSMU-C ol 71 b2	DSMU-C ol 71 b3	DSMU-C ol 71 b4
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	39,72	40,51	40,27	40,40	40,30	39,73	39,90	39,71
FeO	14,52	12,21	12,22	11,55	11,55	16,36	13,90	14,67
MnO	0,24	0,17	0,15	0,14	0,16	0,31	0,24	0,27
MgO	45,85	47,54	47,46	48,16	47,91	43,69	46,04	45,58
CaO	0,39	0,19	0,15	0,24	0,25	0,51	0,29	0,40
NiO	0,18	0,33	0,31	0,31	0,26	0,14	0,17	0,11
Total	100,90	100,95	100,57	100,80	100,43	100,75	100,55	100,73
	Fórmula estrutural calculada na base de 4 oxigênios / apfu							
Si ⁴⁺	0,989	0,996	0,994	0,992	0,993	0,998	0,993	0,990
Fe ²⁺	0,302	0,251	0,252	0,237	0,238	0,344	0,289	0,306
Mn ²⁺	0,005	0,004	0,003	0,003	0,003	0,007	0,005	0,006
Mg ²⁺	1,701	1,742	1,746	1,763	1,760	1,636	1,708	1,695
Ca ²⁺	0,010	0,005	0,004	0,006	0,007	0,014	0,008	0,011
Ni ²⁺	0,004	0,007	0,006	0,006	0,005	0,003	0,003	0,002
Σ cátions	3,011	3,004	3,006	3,008	3,007	3,002	3,007	3,010
Fo	84,9	87,4	87,4	88,1	88,1	82,6	85,5	84,7

Tabela 5A (continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-C ol 71 c5	DSMU-C ol 72 b1	DSMU-C ol 72 b2	DSMU-C ol 72 b3	DSMU-C ol 72 c4	DSMU-C ol 72 c5	DSMU-C ol 72 c6	DSMB-C ol 1 A1 b1	DSMB-C ol 1 A1 b3
	Óxido / %m/m								
SiO ₂	40,31	40,16	40,10	40,09	39,99	40,22	40,24	38,18	38,49
FeO	11,69	14,33	14,16	12,66	12,82	12,56	12,42	22,67	22,37
MnO	0,18	0,21	0,22	0,18	0,15	0,15	0,14	0,46	0,49
MgO	47,51	45,06	45,00	47,39	47,07	46,91	47,16	39,22	39,56
CaO	0,21	0,36	0,34	0,26	0,21	0,21	0,19	0,26	0,23
NiO	0,30	0,18	0,19	0,31	0,31	0,26	0,30	0,03	<LQ
Total	100,19	100,31	100,02	100,88	100,55	100,31	100,45	100,82	101,14
	Fórmula estrutural calculada na base de 4 oxigênios / apfu								
Si ⁴⁺	0,996	1,003	1,004	0,989	0,991	0,997	0,995	0,989	0,991
Fe ²⁺	0,242	0,299	0,296	0,261	0,266	0,260	0,257	0,491	0,482
Mn ²⁺	0,004	0,004	0,005	0,004	0,003	0,003	0,003	0,010	0,011
Mg ²⁺	1,751	1,677	1,679	1,743	1,738	1,733	1,739	1,514	1,519
Ca ²⁺	0,006	0,010	0,009	0,007	0,006	0,005	0,005	0,007	0,006
Ni ²⁺	0,006	0,004	0,004	0,006	0,006	0,005	0,006	0,001	0,000
Σ cátions	3,004	2,997	2,996	3,011	3,009	3,003	3,005	3,011	3,009
Fo	87,9	84,9	85,0	87,0	86,7	86,9	87,1	75,5	75,9

Amostra Grão Região	DSMB-C ol A1 c4	DSMB-C ol A2 b1	DSMB-C ol A2 b8	DSMB-C ol A2 c3	DSMB-C ol A2 c7	DSMB-C ol D1 b1
	Óxido / %m/m					
SiO ₂	38,58	38,79	38,21	38,56	38,42	39,99
FeO	22,45	22,52	22,52	22,64	22,65	14,26
MnO	0,52	0,48	0,45	0,49	0,50	0,18
MgO	39,39	39,29	39,95	39,42	39,34	45,73
CaO	0,20	0,23	0,23	0,21	0,21	0,33
NiO	<LQ	0,03	<LQ	0,03	<LQ	0,24
Total	101,13	101,34	101,37	101,35	101,12	100,74
	Fórmula estrutural calculada na base de 4 oxigênios / apfu					
Si ⁴⁺	0,994	0,997	0,983	0,992	0,991	0,995
Fe ²⁺	0,484	0,484	0,485	0,487	0,489	0,297
Mn ²⁺	0,011	0,011	0,010	0,011	0,011	0,004
Mg ²⁺	1,512	1,505	1,533	1,512	1,513	1,696
Ca ²⁺	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006	0,009
Ni ²⁺	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,005
Σ cátions	3,006	3,003	3,017	3,008	3,009	3,005
Fo	75,8	75,7	76,0	75,6	75,6	85,1

Tabela 6A: Composição química de elementos maiores e menores e fórmula estrutural de cristais de clinopiroxênio de DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB. A fração mássica (m/m) é dada em %. O cálculo da proporção Fe^{2+} e Fe^{3+} foi realizado segundo Schumacher (1991) e a classificação e distribuição catiônica nos sítios T, M1 e M2 foram baseadas em Morimoto et al. (1988). Abreviações: b (borda), i(intermediário), c (centro) e n (núcleo). O mg# foi calculado de acordo com a expressão $[Mg/(Mg+Fe^{2+})] \times 100$, com os termos em apfu.

Amostra	DAPGG-BE	DAPGG-BE	DAPGG-BE	DAPGG-BE	DAPGG-BE	DAPGG-BE	DAPGG-BE	DAPGG-BE
Grão	cpx 1	cpx 1	cpx 5'	cpx 5'	cpx 5'	cpx 5'	cpx 5'	cpx 5'
Região	c1	c2	b1	b2	b5	b6	c3	c4
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	52,16	50,10	49,48	51,14	45,95	50,45	50,03	51,88
TiO ₂	1,62	2,32	2,60	0,69	4,52	2,42	2,33	1,64
Al ₂ O ₃	1,50	2,69	2,38	0,95	4,70	2,20	2,21	1,41
Cr ₂ O ₃	0,34	0,50	<LQ	<LQ	<LQ	0,06	<LQ	0,18
FeO	5,70	6,30	8,18	16,24	9,00	7,05	7,11	5,65
MnO	<LQ	0,10	0,15	0,41	0,12	0,12	0,13	0,13
MgO	15,79	14,56	14,12	8,12	12,17	14,59	14,57	15,76
CaO	22,90	22,83	22,48	19,56	22,45	22,62	22,72	23,18
Na ₂ O	0,22	0,31	0,26	2,35	0,53	0,24	0,25	0,20
Total	100,22	99,71	99,65	99,48	99,47	99,75	99,35	100,07
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,920	1,866	1,852	1,961	1,738	1,880	1,870	1,914
TAl ³⁺	0,065	0,118	0,105	0,039	0,210	0,097	0,097	0,061
TFe ³⁺	0,011	0,016	0,043	0,000	0,052	0,024	0,032	0,025
TTi ⁴⁺	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,041	0,065	0,073	0,020	0,129	0,068	0,066	0,045
M1Fe ³⁺	0,000	0,008	0,020	0,169	0,043	0,000	0,017	0,003
M1Cr ³⁺	0,010	0,009	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,003
M1Mg ²⁺	0,866	0,808	0,788	0,464	0,686	0,810	0,812	0,867
M1Fe ²⁺	0,083	0,109	0,119	0,344	0,142	0,120	0,106	0,081
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,082	0,063	0,075	0,008	0,047	0,075	0,068	0,065
M2Mn ²⁺	0,000	0,003	0,005	0,013	0,004	0,004	0,004	0,004
M2Ca ²⁺	0,903	0,911	0,902	0,803	0,910	0,903	0,910	0,916
M2Na ⁺	0,015	0,023	0,019	0,175	0,039	0,018	0,018	0,015
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	84,0	82,5	80,3	56,9	78,3	80,6	82,4	85,5
Em	44,5	42,1	40,4	25,8	36,4	41,8	41,7	44,2
Wo	46,4	47,5	46,2	44,6	48,3	46,6	46,7	46,7
Fs	9,0	10,4	13,4	29,6	15,3	11,5	11,6	9,1
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	augita	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-BE cpx 5 b1	DAPGG-BE cpx 5 b4	DAPGG-BE cpx 5 c2	DAPGG-B cpx 47 b1	DAPGG-B cpx 47 b7	DAPGG-B cpx 47 c2	DAPGG-B cpx 47 c3	DAPGG-B cpx 47 c4
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	48,72	48,64	52,24	48,73	51,06	51,96	52,17	51,34
TiO ₂	2,84	3,07	1,56	2,66	2,02	1,41	1,35	1,81
Al ₂ O ₃	2,79	3,78	1,48	3,20	2,00	1,51	1,52	2,01
Cr ₂ O ₃	<LQ	0,06	0,13	<LQ	<LQ	0,10	0,21	<LQ
FeO	8,50	7,95	5,52	7,38	7,06	4,79	5,20	5,89
MnO	0,18	0,09	0,09	0,10	0,14	0,09	0,06	0,09
MgO	13,35	13,30	15,69	13,92	14,04	15,78	15,55	14,70
CaO	22,83	22,73	23,14	23,07	23,39	23,55	23,71	23,62
Na ₂ O	0,40	0,36	0,24	0,35	0,31	0,27	0,20	0,29
Total	99,63	100,00	100,11	99,44	100,02	99,47	100,01	99,75
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,829	1,818	1,925	1,823	1,899	1,921	1,924	1,904
TAI ³⁺	0,123	0,167	0,064	0,141	0,088	0,066	0,066	0,088
TFe ³⁺	0,047	0,016	0,011	0,035	0,013	0,014	0,010	0,008
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,080	0,086	0,043	0,075	0,057	0,039	0,037	0,050
M1Fe ³⁺	0,039	0,033	0,001	0,051	0,011	0,017	0,008	0,016
M1Cr ³⁺	0,000	0,001	0,002	0,000	0,000	0,002	0,004	0,000
M1Mg ²⁺	0,747	0,741	0,862	0,777	0,778	0,870	0,855	0,813
M1Fe ²⁺	0,134	0,138	0,091	0,097	0,154	0,073	0,096	0,121
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,047	0,061	0,067	0,047	0,041	0,045	0,047	0,038
M2Mn ²⁺	0,006	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003	0,002	0,003
M2Ca ²⁺	0,918	0,910	0,913	0,925	0,932	0,933	0,937	0,939
M2Na ⁺	0,029	0,026	0,017	0,025	0,023	0,019	0,014	0,021
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	80,5	78,8	84,5	84,3	79,9	88,1	85,7	83,6
Em	38,6	38,9	44,2	40,1	40,2	44,5	43,7	42,0
Wo	47,4	47,8	46,9	47,8	48,2	47,7	47,9	48,5
Fs	14,1	13,2	8,9	12,1	11,6	7,7	8,3	9,6
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-B cpx 47 c5	DAPGG-B cpx 47 c8	DAPGG-B cpx 47" c1	DAPGG-B cpx 47" c2	DAPGG-B cpx 47" c3	DAPGG-B cpx 48 1	DAPGG-B cpx 48 2	DAPGG-B cpx 48 4
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	51,66	51,22	50,23	51,92	49,79	46,68	52,11	50,48
TiO ₂	1,74	1,80	2,15	1,72	2,32	3,83	1,37	1,95
Al ₂ O ₃	1,79	1,98	2,35	1,42	2,63	4,08	1,42	2,26
Cr ₂ O ₃	0,10	<LQ	0,30	0,15	0,54	<LQ	0,29	0,37
FeO	5,26	5,87	5,92	5,80	6,18	9,66	4,66	5,42
MnO	0,11	0,09	0,13	0,11	0,11	0,22	0,08	0,09
MgO	15,25	14,91	14,94	15,48	14,54	11,92	15,59	15,11
CaO	23,47	23,34	23,14	22,92	23,10	22,65	23,37	23,06
Na ₂ O	0,24	0,31	0,28	0,21	0,30	0,56	0,26	0,25
Total	99,65	99,55	99,48	99,78	99,57	99,60	99,15	99,03
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,914	1,902	1,870	1,923	1,858	1,766	1,934	1,885
TAI ³⁺	0,078	0,087	0,103	0,062	0,116	0,182	0,062	0,099
TFe ³⁺	0,008	0,012	0,027	0,000	0,026	0,053	0,004	0,015
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	2,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,048	0,050	0,060	0,033	0,065	0,109	0,038	0,055
M1Fe ³⁺	0,003	0,020	0,018	0,000	0,014	0,057	0,000	0,010
M1Cr ³⁺	0,002	0,000	0,005	0,005	0,010	0,000	0,008	0,007
M1Mg ²⁺	0,842	0,825	0,829	0,855	0,809	0,672	0,862	0,841
M1Fe ²⁺	0,105	0,104	0,087	0,108	0,102	0,162	0,091	0,087
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,048	0,046	0,053	0,072	0,051	0,034	0,049	0,057
M2Mn ²⁺	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,007	0,003	0,003
M2Ca ²⁺	0,932	0,928	0,923	0,910	0,924	0,918	0,929	0,923
M2Na ⁺	0,017	0,023	0,020	0,015	0,022	0,041	0,019	0,018
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	84,7	84,6	85,6	82,6	84,1	77,4	86,0	85,4
Em	43,4	42,6	42,7	43,9	41,9	35,3	44,5	43,5
Wo	48,0	47,9	47,6	46,7	47,9	48,2	47,9	47,7
Fs	8,6	9,5	9,7	9,4	10,2	16,4	7,6	8,9
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-B cpx 48 5	DAPGG-B cpx 48 6	DAPGG-B cpx 48 8	DAPGG-B cpx 48 10	DAPGG-B cpx 48 12	DAPGG-B cpx 48 13	DAPGG-B cpx 48 14
	Óxido / %m/m						
SiO ₂	50,23	49,90	48,45	50,20	50,09	50,07	50,32
TiO ₂	2,21	2,20	2,93	1,92	2,13	2,15	2,12
Al ₂ O ₃	2,42	2,40	3,34	2,32	2,44	2,44	2,49
Cr ₂ O ₃	0,44	0,42	0,09	0,35	0,44	0,51	0,54
FeO	5,76	5,85	7,15	5,81	5,80	5,71	5,67
MnO	0,09	0,10	0,11	0,08	0,10	<LQ	0,09
MgO	14,81	14,86	13,87	14,98	14,97	14,85	14,71
CaO	23,04	22,94	22,93	23,02	22,94	23,09	23,04
Na ₂ O	0,27	0,27	0,33	0,29	0,27	0,28	0,27
Total	99,30	98,97	99,23	99,07	99,22	99,14	99,26
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu						
TSi ⁴⁺	1,875	1,869	1,818	1,876	1,870	1,872	1,880
TAI ³⁺	0,107	0,106	0,148	0,102	0,107	0,108	0,110
TFe ³⁺	0,018	0,025	0,034	0,022	0,022	0,021	0,010
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,062	0,062	0,083	0,054	0,060	0,060	0,060
M1Fe ³⁺	0,003	0,011	0,036	0,024	0,013	0,009	0,001
M1Cr ³⁺	0,008	0,008	0,002	0,006	0,008	0,009	0,010
M1Mg ²⁺	0,824	0,830	0,776	0,835	0,833	0,828	0,819
M1Fe ²⁺	0,102	0,089	0,103	0,081	0,086	0,094	0,111
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,056	0,057	0,051	0,055	0,060	0,055	0,055
M2Mn ²⁺	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003	0,000	0,003
M2Ca ²⁺	0,922	0,920	0,922	0,922	0,918	0,925	0,922
M2Na ⁺	0,019	0,019	0,024	0,021	0,019	0,020	0,020
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	83,9	85,0	83,4	86,1	85,1	84,7	83,2
Em	42,7	42,8	40,3	43,0	43,1	42,9	42,6
Wo	47,8	47,5	47,9	47,5	47,4	47,9	48,0
Fs	9,5	9,6	11,8	9,5	9,5	9,2	9,4
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-B cpx 48 15	DAPGG-B cpx 48 16	DAPGG-B cpx 48 17	DAPGG-B cpx 48 18	DAPGG-B cpx 48 19	DAPGG-B cpx 48 20	DAPGG-B cpx 48' b3
	Óxido / %m/m						
SiO ₂	50,43	49,30	50,40	48,23	47,36	52,29	49,59
TiO ₂	2,01	2,38	1,92	2,80	3,28	1,27	2,62
Al ₂ O ₃	2,16	3,15	2,38	3,47	4,09	1,30	2,31
Cr ₂ O ₃	0,39	0,11	0,21	<LQ	<LQ	0,39	<LQ
FeO	5,69	7,43	6,12	8,43	8,67	4,53	8,10
MnO	0,08	0,16	0,12	0,21	0,19	0,09	0,19
MgO	15,14	13,97	14,79	12,98	12,73	15,90	13,23
CaO	23,13	21,87	23,00	22,87	22,67	23,48	23,16
Na ₂ O	0,25	0,35	0,30	0,49	0,48	0,25	0,42
Total	99,27	99,10	99,26	99,48	99,46	99,50	99,64
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu						
TSi ⁴⁺	1,879	1,858	1,880	1,812	1,783	1,932	1,861
TAl ³⁺	0,095	0,140	0,105	0,154	0,182	0,057	0,102
TFe ³⁺	0,026	0,002	0,016	0,034	0,035	0,012	0,036
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,056	0,067	0,054	0,079	0,093	0,035	0,074
M1Fe ³⁺	0,011	0,029	0,027	0,064	0,065	0,004	0,021
M1Cr ³⁺	0,007	0,002	0,004	0,000	0,000	0,012	0,000
M1Mg ²⁺	0,841	0,785	0,822	0,727	0,714	0,876	0,740
M1Fe ²⁺	0,084	0,117	0,093	0,130	0,128	0,074	0,165
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,056	0,086	0,055	0,037	0,045	0,050	0,032
M2Mn ²⁺	0,002	0,005	0,004	0,007	0,006	0,003	0,006
M2Ca ²⁺	0,924	0,883	0,919	0,921	0,914	0,929	0,931
M2Na ⁺	0,018	0,026	0,022	0,036	0,035	0,018	0,030
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	85,7	79,4	84,7	81,4	80,6	87,6	79,0
Em	43,3	41,2	42,5	37,9	37,4	45,0	38,3
Wo	47,5	46,3	47,5	48,0	47,9	47,7	48,2
Fs	9,2	12,6	10,1	14,2	14,6	7,3	13,5
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-B cpx 48' b1	DAPGG-B cpx 48' c2	DAPGG-B cpx 48' c4	DAPGG-I cpx A b2	DAPGG-I cpx A b1	DAPGG-I cpx A b6	DAPGG-I cpx A c3 - i	DAPGG-I cpx A c4
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	50,21	50,01	51,44	48,57	47,83	47,75	50,75	50,15
TiO ₂	2,04	2,30	1,73	3,17	3,55	3,39	1,95	2,46
Al ₂ O ₃	2,15	2,67	1,58	3,33	3,82	3,99	2,43	2,79
Cr ₂ O ₃	<LQ	0,43	0,39	<LQ	<LQ	<LQ	0,20	0,60
FeO	7,47	6,15	5,59	8,65	8,42	8,37	6,34	6,33
MnO	0,14	0,12	0,10	0,16	0,16	0,14	0,08	0,06
MgO	14,30	14,46	15,70	12,74	12,49	12,87	14,96	14,68
CaO	22,73	22,86	22,95	23,11	23,05	23,03	23,20	23,06
Na ₂ O	0,30	0,29	0,22	0,58	0,53	0,46	0,29	0,32
Total	99,38	99,32	99,72	100,31	99,85	100,04	100,24	100,46
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,879	1,870	1,904	1,814	1,796	1,787	1,875	1,855
TAI ³⁺	0,095	0,118	0,069	0,147	0,169	0,176	0,106	0,122
TFe ³⁺	0,026	0,012	0,027	0,040	0,035	0,037	0,019	0,024
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,057	0,065	0,048	0,089	0,100	0,095	0,054	0,068
M1Fe ³⁺	0,028	0,005	0,004	0,050	0,041	0,054	0,030	0,010
M1Cr ³⁺	0,000	0,008	0,011	0,000	0,000	0,000	0,004	0,011
M1Mg ²⁺	0,798	0,806	0,866	0,709	0,699	0,718	0,824	0,809
M1Fe ²⁺	0,117	0,116	0,070	0,152	0,159	0,132	0,088	0,102
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,062	0,059	0,071	0,028	0,029	0,039	0,058	0,061
M2Mn ²⁺	0,005	0,004	0,003	0,005	0,005	0,004	0,003	0,002
M2Ca ²⁺	0,911	0,916	0,910	0,925	0,927	0,924	0,918	0,914
M2Na ⁺	0,022	0,021	0,015	0,042	0,039	0,033	0,021	0,023
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	81,6	82,1	86,0	79,7	78,8	80,8	84,9	83,3
Em	41,0	42,0	44,4	37,2	36,9	37,6	42,5	42,1
Wo	46,8	47,8	46,6	48,4	48,9	48,4	47,3	47,6
Fs	12,2	10,2	9,0	14,4	14,2	14,0	10,2	10,3
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-I cpx A c5	DAPGG-I cpx B b1	DAPGG-I cpx B b5	DAPGG-I cpx B c2	DAPGG-I cpx B c3	DAPGG-I cpx B b4	DAPGG-I cpx B1 c1	DAPGG-I cpx B c2
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	52,80	49,91	50,48	51,51	51,71	52,17	48,28	50,50
TiO ₂	1,25	2,16	2,01	1,99	1,80	1,52	3,03	1,99
Al ₂ O ₃	1,28	2,63	2,02	1,72	1,53	1,32	3,50	2,07
Cr ₂ O ₃	0,28	<LQ	<LQ	0,14	0,07	0,29	<LQ	0,03
FeO	4,81	7,30	7,26	5,45	5,23	5,41	8,23	6,74
MnO	0,07	0,11	0,10	0,09	0,06	0,10	0,14	0,12
MgO	16,07	14,44	14,68	15,55	15,68	16,08	13,27	15,08
CaO	23,52	23,27	23,20	23,69	23,66	23,30	23,18	23,15
Na ₂ O	0,22	0,35	0,30	0,30	0,26	0,23	0,54	0,29
Total	100,30	100,20	100,09	100,49	100,04	100,45	100,17	99,99
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,937	1,849	1,872	1,892	1,905	1,915	1,799	1,870
TAI ³⁺	0,055	0,115	0,088	0,075	0,067	0,057	0,154	0,090
TFe ³⁺	0,008	0,036	0,040	0,033	0,028	0,029	0,047	0,040
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,035	0,060	0,056	0,055	0,050	0,042	0,085	0,055
M1Fe ³⁺	0,000	0,055	0,037	0,014	0,011	0,007	0,069	0,038
M1Cr ³⁺	0,005	0,000	0,000	0,002	0,001	0,005	0,000	0,001
M1Mg ²⁺	0,879	0,798	0,812	0,852	0,861	0,880	0,737	0,832
M1Fe ²⁺	0,081	0,088	0,095	0,077	0,077	0,066	0,109	0,074
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,058	0,048	0,053	0,043	0,045	0,064	0,031	0,057
M2Mn ²⁺	0,002	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003	0,005	0,004
M2Ca ²⁺	0,924	0,924	0,922	0,932	0,934	0,916	0,925	0,918
M2Na ⁺	0,016	0,025	0,022	0,021	0,019	0,016	0,039	0,020
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	86,3	85,5	84,5	87,6	87,6	87,1	84,0	86,4
Em	45,0	40,9	41,4	43,6	44,0	44,8	38,3	42,4
Wo	47,3	47,3	47,0	47,7	47,7	46,6	48,1	46,8
Fs	7,7	11,8	11,6	8,7	8,3	8,6	13,6	10,8
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-I cpx B' c3	DAPGG-I cpx B b2	DAPGG-I cpx C' b5	DAPGG-I cpx C' b3	DAPGG-I cpx C' b2	DAPGG-I cpx C' c1	DAPGG-I cpx C' c4	DAPGG-I cpx ' b2
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	51,55	51,34	49,32	50,43	51,70	52,99	53,13	47,93
TiO ₂	1,71	1,62	2,50	2,29	1,72	1,31	1,29	3,59
Al ₂ O ₃	1,94	1,51	3,19	2,31	1,64	1,20	1,11	4,19
Cr ₂ O ₃	0,30	0,08	<LQ	<LQ	0,04	0,44	0,45	<LQ
FeO	5,62	5,80	7,48	7,39	6,32	4,39	4,33	8,49
MnO	0,11	0,10	0,12	0,11	0,12	0,07	0,09	0,15
MgO	15,66	15,73	14,16	14,34	15,44	16,37	16,58	12,75
CaO	23,48	23,52	23,11	23,38	22,96	23,71	23,70	23,09
Na ₂ O	0,27	0,24	0,34	0,33	0,26	0,24	0,21	0,47
Total	100,67	100,00	100,25	100,60	100,25	100,77	100,89	100,69
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions/ apfu							
TSi ⁴⁺	1,890	1,894	1,829	1,864	1,907	1,931	1,932	1,784
TAI ³⁺	0,084	0,066	0,139	0,101	0,071	0,052	0,047	0,184
TFe ³⁺	0,026	0,040	0,031	0,036	0,022	0,017	0,019	0,032
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,047	0,045	0,070	0,064	0,048	0,036	0,034	0,101
M1Fe ³⁺	0,024	0,030	0,055	0,032	0,015	0,001	0,000	0,048
M1Cr ³⁺	0,005	0,001	0,000	0,000	0,001	0,013	0,013	0,000
M1Mg ²⁺	0,856	0,865	0,783	0,790	0,849	0,889	0,899	0,708
M1Fe ²⁺	0,068	0,058	0,092	0,114	0,088	0,061	0,054	0,144
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,055	0,050	0,053	0,047	0,070	0,055	0,059	0,041
M2Mn ²⁺	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,002	0,003	0,005
M2Ca ²⁺	0,922	0,930	0,918	0,926	0,907	0,926	0,924	0,921
M2Na ⁺	0,019	0,017	0,025	0,024	0,019	0,017	0,015	0,034
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	87,5	88,9	84,4	83,1	84,3	88,5	88,9	79,3
Em	43,8	43,8	40,4	40,6	43,4	45,6	45,9	37,3
Wo	47,2	47,0	47,4	47,5	46,4	47,4	47,2	48,5
Fs	9,0	9,2	12,2	11,9	10,2	7,0	6,9	14,2
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-I cpx 1 b1	DAPGG-I cpx 1 b4	DAPGG-I cpx 1 c5	DAPGG-I cpx 1 c3	DAPGG-I cpx 2 b2	DAPGG-I cpx 2 b1	DAPGG-I cpx 2 3c	DAPGG-I cpx 36 b2
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	48,81	49,41	51,28	52,19	47,77	48,13	52,15	49,63
TiO ₂	3,06	2,77	1,98	1,57	3,34	2,98	1,66	2,79
Al ₂ O ₃	3,74	3,32	2,09	1,50	4,21	3,80	1,62	2,20
Cr ₂ O ₃	0,04	<LQ	<LQ	0,38	<LQ	<LQ	0,24	0,02
FeO	8,10	7,76	6,89	5,63	8,17	8,06	5,69	8,53
MnO	0,10	0,12	0,10	0,12	0,12	0,10	0,07	0,21
MgO	13,43	13,55	14,61	15,83	12,96	13,22	15,62	12,94
CaO	23,05	23,01	23,26	23,32	22,71	22,96	23,31	23,34
Na ₂ O	0,41	0,38	0,31	0,21	0,43	0,35	0,24	0,53
Total	100,74	100,36	100,53	100,75	99,71	99,64	100,68	100,21
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,809	1,837	1,892	1,913	1,791	1,805	1,914	1,856
TAI ³⁺	0,163	0,146	0,091	0,065	0,186	0,168	0,070	0,097
TFe ³⁺	0,027	0,018	0,017	0,022	0,023	0,027	0,016	0,047
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,085	0,077	0,055	0,043	0,094	0,084	0,046	0,078
M1Fe ³⁺	0,047	0,035	0,020	0,001	0,051	0,052	0,002	0,025
M1Cr ³⁺	0,001	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,004	0,000
M1Mg ²⁺	0,742	0,751	0,804	0,865	0,725	0,739	0,855	0,721
M1Fe ²⁺	0,124	0,136	0,121	0,083	0,130	0,125	0,093	0,175
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,052	0,052	0,055	0,066	0,052	0,049	0,064	0,020
M2Mn ²⁺	0,003	0,004	0,003	0,004	0,004	0,003	0,002	0,007
M2Ca ²⁺	0,915	0,917	0,920	0,916	0,912	0,922	0,917	0,935
M2Na ⁺	0,029	0,028	0,023	0,015	0,031	0,026	0,017	0,038
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	80,8	80,0	82,1	85,3	79,9	81,0	84,5	78,7
Em	38,8	39,3	41,4	44,2	38,2	38,5	43,9	37,4
Wo	47,9	47,9	47,4	46,8	48,1	48,1	47,0	48,5
Fs	13,3	12,8	11,1	9,0	13,7	13,3	9,1	14,2
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-I cpx 36 b1	DAPGG-I cpx 36 b3	DAPGG-I cpx 36 b7	DAPGG-I cpx 36 c4	DAPGG-I cpx 36 c6	DAPGG-I cpx 36' b1	DAPGG-I cpx 36' b3	DAPGG-I cpx 36' c2
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	51,21	51,03	51,45	52,07	51,54	50,66	50,25	50,13
TiO ₂	1,81	2,13	1,81	1,65	1,73	2,36	2,38	2,40
Al ₂ O ₃	1,91	2,22	1,80	1,43	1,65	2,10	2,30	2,73
Cr ₂ O ₃	<LQ	<LQ	<LQ	0,24	0,41	<LQ	<LQ	0,45
FeO	6,74	7,29	6,89	5,63	5,65	7,37	7,40	6,33
MnO	0,10	0,13	0,11	0,11	0,10	0,16	0,11	0,15
MgO	14,95	14,33	14,99	15,72	15,72	13,91	14,13	14,68
CaO	23,30	23,43	23,18	23,51	23,13	23,43	23,38	23,14
Na ₂ O	0,25	0,32	0,26	0,19	0,24	0,41	0,34	0,30
Total	100,31	100,90	100,53	100,55	100,16	100,41	100,32	100,34
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,892	1,881	1,897	1,912	1,901	1,879	1,864	1,856
TAI ³⁺	0,083	0,096	0,078	0,062	0,072	0,092	0,101	0,119
TFe ³⁺	0,025	0,023	0,025	0,026	0,028	0,029	0,035	0,025
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,050	0,059	0,050	0,045	0,048	0,066	0,066	0,067
M1Fe ³⁺	0,026	0,024	0,021	0,002	0,006	0,019	0,027	0,015
M1Cr ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,004	0,007	0,000	0,000	0,008
M1Mg ²⁺	0,823	0,787	0,824	0,861	0,864	0,769	0,782	0,810
M1Fe ²⁺	0,101	0,130	0,105	0,088	0,075	0,146	0,125	0,099
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,057	0,048	0,062	0,058	0,066	0,034	0,043	0,056
M2Mn ²⁺	0,003	0,004	0,003	0,004	0,003	0,005	0,003	0,005
M2Ca ²⁺	0,922	0,925	0,916	0,925	0,914	0,931	0,929	0,918
M2Na ⁺	0,018	0,023	0,019	0,014	0,017	0,030	0,025	0,021
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	84,0	81,6	83,1	85,5	86,0	81,0	82,4	83,9
Em	42,1	40,6	42,1	43,9	44,2	39,8	40,2	42,0
Wo	47,1	47,7	46,8	47,1	46,7	48,1	47,8	47,6
Fs	10,8	11,8	11,0	9,0	9,1	12,1	12,0	10,4
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-I cpx 39 b1	DAPGG-I cpx 39 b5	DAPGG-I cpx 39 c2	DAPGG-I cpx 39 c4	DAPGG-I cpx 39 c3	DAPGG-I cpx 44' b4	DAPGG-I cpx 44' b1	DAPGG-I cpx 44' b2
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	48,07	50,27	52,50	52,59	51,41	48,14	50,56	51,40
TiO ₂	3,13	2,32	1,49	1,38	1,77	3,11	2,07	1,88
Al ₂ O ₃	3,89	2,26	1,26	1,28	2,09	3,90	1,72	1,82
Cr ₂ O ₃	<LQ	<LQ	<LQ	0,31	0,54	<LQ	<LQ	0,03
FeO	8,47	7,71	4,90	5,00	5,33	8,58	8,85	7,02
MnO	0,12	0,14	0,09	0,10	0,09	0,12	0,23	0,10
MgO	13,08	14,08	16,00	15,98	15,43	13,05	12,80	14,72
CaO	23,17	23,01	23,74	23,51	23,29	22,81	23,06	22,49
Na ₂ O	0,41	0,35	0,21	0,21	0,25	0,43	0,64	0,56
Total	100,34	100,14	100,18	100,40	100,19	100,19	99,93	100,06
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,792	1,869	1,927	1,929	1,896	1,798	1,894	1,903
TAI ³⁺	0,171	0,099	0,054	0,055	0,091	0,172	0,076	0,079
TFe ³⁺	0,037	0,031	0,018	0,016	0,013	0,030	0,030	0,018
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,088	0,065	0,041	0,038	0,049	0,087	0,058	0,052
M1Fe ³⁺	0,062	0,025	0,005	0,001	0,004	0,057	0,035	0,031
M1Cr ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,009	0,010	0,000	0,000	0,001
M1Mg ²⁺	0,727	0,781	0,876	0,874	0,849	0,727	0,715	0,812
M1Fe ²⁺	0,124	0,129	0,078	0,079	0,089	0,129	0,192	0,103
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,041	0,054	0,049	0,059	0,059	0,052	0,021	0,065
M2Mn ²⁺	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,004	0,007	0,003
M2Ca ²⁺	0,925	0,917	0,934	0,924	0,920	0,913	0,926	0,892
M2Na ⁺	0,030	0,025	0,015	0,015	0,018	0,031	0,046	0,040
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	81,5	81,0	87,3	86,4	85,1	80,1	77,1	82,9
Em	37,9	40,2	44,6	44,7	43,8	38,0	37,1	42,2
Wo	48,2	47,2	47,6	47,3	47,5	47,8	48,1	46,3
Fs	13,9	12,6	7,8	8,0	8,6	14,2	14,8	11,5
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-I cpx 44' c3	DAPGG-C2 cpx 1 b1	DAPGG-C2 cpx 1 c2	DAPGG-C2 cpx 1 b3	DAPGG-C2 cpx 1 b6	DAPGG-C2 cpx 1 b5	DAPGG-C2 cpx 1 c4	DAPGG-C2 cpx 10 b1
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	51,93	49,19	52,21	51,05	52,04	51,26	52,14	48,82
TiO ₂	1,53	2,77	1,65	2,19	1,92	2,02	1,56	2,93
Al ₂ O ₃	1,46	3,45	1,57	2,07	1,86	2,03	1,46	3,65
Cr ₂ O ₃	0,42	<LQ	0,07	<LQ	<LQ	<LQ	0,23	<LQ
FeO	5,23	7,75	6,18	7,13	6,75	7,15	5,66	7,64
MnO	0,10	0,10	0,13	0,13	0,13	0,13	0,09	0,10
MgO	15,85	13,85	15,43	14,26	15,02	14,68	15,77	13,36
CaO	23,25	22,89	23,15	23,40	23,10	22,96	23,41	23,16
Na ₂ O	0,22	0,37	0,27	0,38	0,29	0,30	0,20	0,43
Total	100,02	100,48	100,69	100,62	101,19	100,53	100,56	100,12
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,916	1,825	1,917	1,886	1,907	1,893	1,914	1,819
TAI ³⁺	0,064	0,151	0,068	0,090	0,081	0,088	0,063	0,160
TFe ³⁺	0,021	0,024	0,015	0,024	0,012	0,019	0,022	0,021
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,042	0,077	0,046	0,061	0,053	0,056	0,043	0,082
M1Fe ³⁺	0,000	0,046	0,008	0,019	0,008	0,016	0,006	0,048
M1Cr ³⁺	0,008	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000
M1Mg ²⁺	0,872	0,766	0,845	0,785	0,821	0,808	0,863	0,742
M1Fe ²⁺	0,078	0,111	0,100	0,135	0,119	0,120	0,084	0,128
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,062	0,060	0,066	0,043	0,068	0,066	0,062	0,041
M2Mn ²⁺	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003
M2Ca ²⁺	0,919	0,910	0,911	0,926	0,907	0,908	0,921	0,924
M2Na ⁺	0,016	0,026	0,019	0,027	0,021	0,021	0,014	0,031
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	86,1	81,8	83,6	81,6	81,5	81,3	85,6	81,4
Em	44,6	39,9	43,3	40,6	42,3	41,6	44,0	38,9
Wo	47,0	47,4	46,7	47,8	46,8	46,8	47,0	48,5
Fs	8,4	12,7	9,9	11,6	10,9	11,6	9,0	12,6
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-C2 cpx 10 b8	DAPGG-C2 cpx 10 b2	DAPGG-C2 cpx 10 b7	DAPGG-C2 cpx 10 b6	DAPGG-C2 cpx 10 c3	DAPGG-C2 cpx 10 c5	DAPGG-C2 cpx 10 c4	DAPGG-C2 cpx 13 b3
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	49,10	49,52	52,79	50,69	50,18	49,86	51,61	48,44
TiO ₂	2,86	2,52	1,05	2,37	2,31	2,36	1,86	3,02
Al ₂ O ₃	3,63	3,26	1,12	2,20	3,01	3,01	2,19	4,00
Cr ₂ O ₃	<LQ	0,05	<LQ	<LQ	0,04	0,56	0,13	0,03
FeO	7,86	7,28	8,03	7,67	7,25	6,15	5,29	8,14
MnO	0,10	0,10	0,23	0,18	0,12	0,10	0,10	0,10
MgO	13,48	14,17	13,73	13,77	14,25	14,74	15,40	13,49
CaO	23,03	22,88	23,16	23,33	23,14	22,83	23,68	23,03
Na ₂ O	0,38	0,37	0,60	0,40	0,35	0,27	0,26	0,44
Total	100,44	100,20	100,71	100,61	100,69	99,92	100,58	100,71
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,824	1,837	1,951	1,879	1,852	1,853	1,894	1,795
TAI ³⁺	0,159	0,143	0,049	0,096	0,131	0,132	0,095	0,175
TFe ³⁺	0,017	0,020	0,001	0,025	0,017	0,015	0,011	0,031
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,080	0,070	0,029	0,066	0,064	0,066	0,051	0,084
M1Fe ³⁺	0,043	0,046	0,033	0,017	0,043	0,015	0,017	0,067
M1Cr ³⁺	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,010	0,002	0,001
M1Mg ²⁺	0,746	0,784	0,756	0,761	0,784	0,816	0,843	0,745
M1Fe ²⁺	0,130	0,099	0,181	0,156	0,108	0,093	0,087	0,104
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,053	0,061	0,033	0,039	0,056	0,068	0,047	0,051
M2Mn ²⁺	0,003	0,003	0,007	0,006	0,004	0,003	0,003	0,003
M2Ca ²⁺	0,917	0,910	0,917	0,926	0,915	0,909	0,931	0,914
M2Na ⁺	0,027	0,026	0,043	0,028	0,025	0,020	0,018	0,031
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	80,3	83,1	77,9	79,6	82,7	83,5	86,2	82,8
Em	39,1	40,8	39,2	39,4	40,7	42,5	43,5	38,9
Wo	48,0	47,3	47,5	48,0	47,5	47,3	48,0	47,7
Fs	12,9	11,9	13,2	12,6	11,8	10,1	8,5	13,3
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-C2 cpx 13 b2	DAPGG-C2 cpx 13 c4	DAPGG-C2 cpx 13' b1	DAPGG-C2 cpx 13' b6	DAPGG-C2 cpx 13' b4	DAPGG-C2 cpx 13' b7	DAPGG-C2 cpx 13' b2	DAPGG-C2 cpx 13' c3
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	50,75	52,54	48,90	49,38	48,11	48,24	51,50	51,09
TiO ₂	2,34	1,69	2,58	2,71	3,29	3,32	0,81	1,89
Al ₂ O ₃	2,11	1,61	3,39	3,48	3,77	3,80	1,35	2,10
Cr ₂ O ₃	<LQ	0,16	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,29
FeO	7,79	5,84	7,81	7,53	8,42	8,43	12,69	6,02
MnO	0,17	0,12	0,12	0,11	0,15	0,15	0,32	0,10
MgO	13,54	15,68	13,59	13,74	12,98	12,72	10,47	15,27
CaO	23,56	23,07	23,28	23,00	23,00	22,94	21,61	22,99
Na ₂ O	0,43	0,21	0,37	0,35	0,51	0,55	1,43	0,22
Total	100,69	100,93	100,05	100,36	100,23	100,18	100,18	100,00
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,881	1,922	1,821	1,834	1,796	1,803	1,941	1,891
TAI ³⁺	0,092	0,070	0,149	0,152	0,166	0,167	0,059	0,092
TFe ³⁺	0,027	0,003	0,030	0,014	0,039	0,029	0,000	0,017
TTi ⁴⁺	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
M1Ti ⁴⁺	0,065	0,041	0,072	0,076	0,092	0,093	0,023	0,053
M1Fe ³⁺	0,019	0,000	0,060	0,040	0,056	0,050	0,115	0,009
M1Cr ³⁺	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005
M1Mg ²⁺	0,748	0,855	0,755	0,761	0,722	0,709	0,588	0,843
M1Fe ²⁺	0,167	0,099	0,113	0,124	0,130	0,148	0,272	0,091
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,028	0,077	0,040	0,056	0,039	0,036	0,012	0,069
M2Mn ²⁺	0,005	0,004	0,004	0,003	0,005	0,005	0,010	0,003
M2Ca ²⁺	0,936	0,904	0,929	0,915	0,920	0,919	0,873	0,912
M2Na ⁺	0,031	0,015	0,027	0,025	0,037	0,040	0,105	0,016
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	79,3	82,9	83,1	80,8	81,1	79,3	67,4	84,0
Em	38,8	44,0	39,1	39,8	37,8	37,4	31,4	43,3
Wo	48,5	46,6	48,1	47,8	48,2	48,5	46,6	46,9
Fs	12,8	9,4	12,8	12,4	14,0	14,2	21,9	9,7
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-C2 cpx 13' c5	DSMU-C cpx 61' b2	DSMU-C cpx 61' b4	DSMU-C cpx 61' c1	DSMU-C cpx 61' c3	DSMU-C cpx 63 c2
	Óxido / %m/m					
SiO ₂	52,39	43,08	42,67	48,36	48,66	42,59
TiO ₂	1,66	4,93	4,93	2,64	2,43	4,92
Al ₂ O ₃	1,43	9,99	10,19	5,36	5,15	10,08
Cr ₂ O ₃	0,12	0,03	<LQ	<LQ	0,04	<LQ
FeO	5,72	7,62	7,87	6,88	6,64	9,01
MnO	0,10	0,11	0,15	0,13	0,11	0,15
MgO	15,55	10,99	10,75	13,49	13,82	10,48
CaO	23,56	22,39	22,32	22,55	22,65	22,32
Na ₂ O	0,23	0,57	0,60	0,40	0,38	0,60
Total	100,78	99,74	99,50	99,82	99,93	100,14
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu					
TSi ⁴⁺	1,921	1,618	1,607	1,798	1,805	1,599
TAI ³⁺	0,062	0,382	0,393	0,202	0,195	0,401
TFe ³⁺	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,060	0,060	0,033	0,030	0,045
M1Ti ⁴⁺	0,046	0,139	0,140	0,074	0,068	0,139
M1Fe ³⁺	0,000	0,083	0,097	0,050	0,055	0,120
M1Cr ³⁺	0,002	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000
M1Mg ²⁺	0,850	0,615	0,604	0,748	0,764	0,587
M1Fe ²⁺	0,102	0,102	0,100	0,095	0,082	0,109
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,055	0,054	0,051	0,068	0,069	0,054
M2Mn ²⁺	0,003	0,003	0,005	0,004	0,003	0,005
M2Ca ²⁺	0,925	0,901	0,901	0,898	0,900	0,898
M2Na ⁺	0,016	0,041	0,044	0,029	0,027	0,044
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	84,4	79,8	80,0	82,0	83,5	78,2
Em	43,5	35,0	34,4	40,1	40,8	33,1
Wo	47,4	51,2	51,3	48,2	48,0	50,7
Fs	9,1	13,8	14,4	11,7	11,2	16,2
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-C cpx 63 c9	DSMU-C cpx 63 c8	DSMU-C cpx 63 c1	DSMU-C cpx 63 c4	DSMU-C cpx 63 c5	DSMU-C cpx 63 c3	DSMU-C cpx 63 c6	DSMU-C cpx 63 c7
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	42,38	44,23	45,50	46,48	47,82	48,74	48,47	48,61
TiO ₂	5,44	3,97	3,87	3,31	2,99	2,63	2,69	2,49
Al ₂ O ₃	10,17	8,79	7,59	6,53	5,98	5,41	5,42	5,27
Cr ₂ O ₃	0,17	<LQ	<LQ	<LQ	0,09	<LQ	0,03	0,03
FeO	7,98	8,04	8,54	7,91	7,29	6,90	6,96	6,87
MnO	0,09	0,09	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12
MgO	11,02	11,45	11,81	12,42	13,15	13,61	13,63	13,57
CaO	22,46	22,32	22,41	22,43	22,51	22,73	22,72	22,76
Na ₂ O	0,47	0,49	0,46	0,45	0,37	0,42	0,43	0,44
Total	100,17	99,38	100,32	99,70	100,32	100,55	100,46	100,16
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,589	1,664	1,699	1,741	1,774	1,798	1,790	1,800
TAI ³⁺	0,411	0,336	0,301	0,259	0,226	0,202	0,210	0,200
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,038	0,054	0,033	0,029	0,036	0,034	0,026	0,030
M1Ti ⁴⁺	0,153	0,112	0,109	0,093	0,083	0,073	0,075	0,069
M1Fe ³⁺	0,094	0,092	0,083	0,076	0,046	0,051	0,063	0,061
M1Cr ³⁺	0,003	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,001	0,001
M1Mg ²⁺	0,616	0,642	0,657	0,693	0,727	0,749	0,750	0,749
M1Fe ²⁺	0,096	0,100	0,118	0,108	0,106	0,093	0,085	0,090
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,061	0,062	0,066	0,063	0,075	0,068	0,067	0,062
M2Mn ²⁺	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,004
M2Ca ²⁺	0,902	0,900	0,897	0,900	0,895	0,899	0,899	0,903
M2Na ⁺	0,034	0,035	0,033	0,033	0,027	0,030	0,031	0,031
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	79,7	79,9	78,1	80,2	80,1	82,3	83,2	83,2
Em	34,8	35,7	36,0	37,6	39,3	40,2	40,2	40,1
Wo	50,9	50,0	49,1	48,8	48,3	48,2	48,1	48,3
Fs	14,3	14,2	14,8	13,6	12,4	11,6	11,7	11,6
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-C cpx 71' b1	DSMU-C cpx 71' c2	DSMU-C cpx 71' c2	DSMU-C cpx 71' c3	DSMU-C cpx 72' c5	DSMU-C cpx 72' c4	DSMU-C cpx 72' c1	DSMU-C cpx 71' c3
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	45,61	45,26	45,26	41,12	44,62	47,98	48,60	41,12
TiO ₂	3,49	3,91	3,91	5,51	4,35	2,68	2,57	5,51
Al ₂ O ₃	8,07	7,70	7,70	11,06	8,86	5,87	5,25	11,06
Cr ₂ O ₃	<LQ	0,06	0,06	0,08	<LQ	<LQ	0,00	0,08
FeO	9,02	7,50	7,50	8,01	7,85	7,21	7,05	8,01
MnO	0,18	0,10	0,10	0,09	0,14	0,11	0,13	0,09
MgO	11,04	11,99	11,99	10,59	11,08	13,03	13,42	10,59
CaO	22,13	22,68	22,68	22,35	22,42	22,43	22,67	22,35
Na ₂ O	0,66	0,41	0,41	0,50	0,59	0,44	0,42	0,50
Total	100,20	99,61	99,61	99,31	99,93	99,75	100,13	99,31
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,707	1,698	1,698	1,554	1,673	1,788	1,803	1,554
TAI ³⁺	0,293	0,302	0,302	0,446	0,327	0,212	0,197	0,446
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,063	0,038	0,038	0,047	0,064	0,046	0,032	0,047
M1Ti ⁴⁺	0,098	0,110	0,110	0,157	0,123	0,075	0,072	0,157
M1Fe ³⁺	0,081	0,070	0,070	0,117	0,060	0,048	0,052	0,117
M1Cr ³⁺	0,000	0,001	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002
M1Mg ²⁺	0,616	0,671	0,671	0,597	0,619	0,724	0,742	0,597
M1Fe ²⁺	0,142	0,110	0,110	0,081	0,134	0,108	0,102	0,081
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,059	0,056	0,056	0,056	0,052	0,069	0,065	0,056
M2Mn ²⁺	0,006	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,003
M2Ca ²⁺	0,887	0,912	0,912	0,905	0,901	0,895	0,901	0,905
M2Na ⁺	0,048	0,030	0,030	0,036	0,043	0,032	0,030	0,036
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	75,4	80,2	80,2	81,4	76,9	80,4	81,6	81,4
Em	34,4	36,8	36,8	33,9	35,0	39,2	39,8	33,9
Wo	49,5	50,1	50,1	51,5	50,9	48,5	48,3	51,5
Fs	16,1	13,1	13,1	14,6	14,1	12,4	11,9	14,6
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-C cpx 72' c2	DSMU-C cpx 72' c3	DSMU-C cpx 72' c5	DSMU-C cpx 72' c4	Amostra Grão Região	DSMU-C cpx 72' c1	DSMU-C cpx 72' c2
Óxido / %m/m							
SiO ₂	41,23	42,77	44,62	47,98	SiO ₂	48,60	41,23
TiO ₂	5,53	5,06	4,35	2,68	TiO ₂	2,57	5,53
Al ₂ O ₃	11,19	9,77	8,86	5,87	Al ₂ O ₃	5,25	11,19
Cr ₂ O ₃	0,07	<LQ	<LQ	<LQ	Cr ₂ O ₃	0,00	0,07
FeO	8,10	8,03	7,85	7,21	FeO	7,05	8,10
MnO	0,07	0,09	0,14	0,11	MnO	0,13	0,07
MgO	10,65	10,96	11,08	13,03	MgO	13,42	10,65
CaO	22,42	22,51	22,42	22,43	CaO	22,67	22,42
Na ₂ O	0,48	0,48	0,59	0,44	Na ₂ O	0,42	0,48
Total	99,76	99,68	99,93	99,75	Total	100,13	99,76
Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,552	1,610	1,673	1,788	TSi ⁴⁺	1,803	1,552
TAI ³⁺	0,448	0,390	0,327	0,212	TAI ³⁺	0,197	0,448
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	TFe ³⁺	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	TTi ⁴⁺	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	ΣT	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,048	0,043	0,064	0,046	M1Al ³⁺	0,032	0,048
M1Ti ⁴⁺	0,157	0,143	0,123	0,075	M1Ti ⁴⁺	0,072	0,157
M1Fe ³⁺	0,118	0,095	0,060	0,048	M1Fe ³⁺	0,052	0,118
M1Cr ³⁺	0,001	0,000	0,000	0,000	M1Cr ³⁺	0,000	0,001
M1Mg ²⁺	0,598	0,615	0,619	0,724	M1Mg ²⁺	0,742	0,598
M1Fe ²⁺	0,078	0,103	0,134	0,108	M1Fe ²⁺	0,102	0,078
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	M1Mn ²⁺	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	ΣM1	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	M2Mg ²⁺	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,059	0,054	0,052	0,069	M2Fe ²⁺	0,065	0,059
M2Mn ²⁺	0,002	0,003	0,004	0,004	M2Mn ²⁺	0,004	0,002
M2Ca ²⁺	0,904	0,908	0,901	0,895	M2Ca ²⁺	0,901	0,904
M2Na ⁺	0,035	0,035	0,043	0,032	M2Na ⁺	0,030	0,035
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	M2K ⁺	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	ΣM2	1,000	1,000
mg#	81,3	79,6	76,9	80,4	mg#	81,6	81,3
Em	34,0	34,6	35,0	39,2	Em	39,8	34,0
Wo	51,4	51,0	50,9	48,5	Wo	48,3	51,4
Fs	14,6	14,4	14,1	12,4	Fs	11,9	14,6
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	Classificação	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-C cpx 72' c3	DSMU-B2 cpx 96 b2	DSMU-B2 cpx 96 c1	DSMU-B2 cpx 96 b4	DSMU-B2 cpx 96 c3	DSMU-B2 cpx 96' b5	DSMU-B2 cpx 96' c2	DSMU-B2 cpx 96' c3
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	42,77	40,89	45,98	40,77	46,89	46,59	45,88	45,50
TiO ₂	5,06	5,51	3,55	5,70	3,09	3,42	3,59	3,56
Al ₂ O ₃	9,77	11,19	6,95	11,16	6,40	6,51	6,88	7,92
Cr ₂ O ₃	<LQ	0,42	0,05	0,31	0,16	0,15	0,11	0,09
FeO	8,03	7,64	7,86	7,99	7,25	7,58	7,48	7,59
MnO	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,13	0,11	0,10
MgO	10,96	10,67	12,48	10,66	13,25	12,90	12,69	12,32
CaO	22,51	22,59	22,18	22,35	22,37	22,31	22,11	22,19
Na ₂ O	0,48	0,44	0,38	0,51	0,36	0,41	0,45	0,41
Total	99,68	99,51	99,57	99,61	99,88	100,02	99,30	99,70
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,610	1,545	1,725	1,539	1,746	1,737	1,722	1,702
TAI ³⁺	0,390	0,455	0,275	0,461	0,254	0,263	0,278	0,298
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,043	0,043	0,032	0,036	0,027	0,023	0,026	0,051
M1Ti ⁴⁺	0,143	0,157	0,100	0,162	0,087	0,096	0,101	0,100
M1Fe ³⁺	0,095	0,114	0,068	0,126	0,073	0,071	0,077	0,072
M1Cr ³⁺	0,000	0,008	0,001	0,006	0,003	0,003	0,002	0,002
M1Mg ²⁺	0,615	0,601	0,698	0,600	0,736	0,717	0,710	0,687
M1Fe ²⁺	0,103	0,077	0,101	0,071	0,074	0,090	0,083	0,087
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,054	0,050	0,078	0,055	0,078	0,075	0,075	0,078
M2Mn ²⁺	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003
M2Ca ²⁺	0,908	0,914	0,891	0,904	0,893	0,891	0,889	0,889
M2Na ⁺	0,035	0,032	0,028	0,037	0,026	0,029	0,033	0,030
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	79,6	82,5	79,7	82,6	82,8	81,3	81,8	80,6
Em	34,6	34,1	37,9	34,1	39,6	38,8	38,6	37,8
Wo	51,0	52,0	48,5	51,4	48,1	48,2	48,4	48,9
Fs	14,4	13,9	13,6	14,5	12,3	13,0	13,0	13,2
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-B2 cpx 96' c4	DSMU-BE2 cpx 18 c2	DSMU-BE2 cpx 18 c3	DSMU-BE2 cpx 18 b4	DSMU-BE2 cpx 18 b5	DSMU-BE2 cpx 18 c6	DSMU-BE2 cpx 18 c7	DSMU-BE2 cpx 18 b8
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	48,64	48,86	47,83	46,32	42,57	47,76	49,31	42,43
TiO ₂	2,53	2,31	2,72	3,33	5,11	2,57	2,26	5,51
Al ₂ O ₃	5,07	4,94	5,32	6,08	10,09	5,59	4,42	9,63
Cr ₂ O ₃	0,34	0,46	0,43	0,06	0,60	0,36	0,41	0,37
FeO	6,53	6,17	6,72	7,63	7,70	6,66	6,13	7,65
MnO	0,14	0,12	0,12	0,12	0,09	0,10	0,10	0,10
MgO	14,00	14,36	13,77	13,00	11,24	13,77	14,36	11,31
CaO	22,35	21,95	22,20	22,52	22,45	22,06	22,51	21,76
Na ₂ O	0,34	0,34	0,34	0,36	0,42	0,38	0,32	0,46
Total	99,96	99,52	99,46	99,46	100,29	99,26	99,83	99,26
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,806	1,818	1,787	1,736	1,595	1,785	1,830	1,606
TAI ³⁺	0,194	0,182	0,213	0,264	0,405	0,215	0,170	0,394
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,028	0,035	0,021	0,005	0,041	0,032	0,023	0,036
M1Ti ⁴⁺	0,071	0,065	0,076	0,094	0,144	0,072	0,063	0,157
M1Fe ³⁺	0,038	0,025	0,047	0,095	0,083	0,053	0,028	0,064
M1Cr ³⁺	0,006	0,008	0,008	0,001	0,011	0,007	0,007	0,007
M1Mg ²⁺	0,775	0,797	0,767	0,726	0,628	0,767	0,794	0,638
M1Fe ²⁺	0,083	0,070	0,080	0,079	0,093	0,069	0,083	0,098
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,082	0,097	0,083	0,065	0,065	0,086	0,079	0,080
M2Mn ²⁺	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003
M2Ca ²⁺	0,889	0,875	0,889	0,904	0,901	0,883	0,895	0,883
M2Na ⁺	0,025	0,024	0,025	0,026	0,030	0,028	0,023	0,034
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	82,5	82,7	82,5	83,4	79,9	83,2	83,1	78,2
Em	41,4	42,7	41,0	38,8	35,4	41,2	42,2	36,1
Wo	47,5	46,9	47,5	48,3	50,8	47,4	47,5	50,0
Fs	11,1	10,5	11,4	13,0	13,8	11,3	10,3	13,9
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-BE2 cpx 18 c9	DSMU-BE2 cpx 18 b11	DSMU-BE2 cpx 18 b12	DSMU-BE2 cpx 18 c13	DSMU-BE2 cpx 18 b5	DSMU-BE2 cpx 18 b8	DSMU-BE2 cpx 18 b10	DSMU-BE2 cpx 18 b12
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	46,64	44,23	42,73	48,42	42,57	42,43	43,06	42,73
TiO ₂	3,51	4,41	4,68	2,87	5,11	5,51	4,71	4,68
Al ₂ O ₃	6,58	8,74	10,38	5,04	10,09	9,63	10,05	10,38
Cr ₂ O ₃	0,11	0,71	0,55	0,41	0,60	0,37	0,32	0,55
FeO	7,76	7,12	7,41	6,82	7,70	7,65	7,68	7,41
MnO	0,10	0,07	0,06	0,08	0,09	0,10	0,06	<LQ
MgO	12,98	11,73	11,02	14,06	11,24	11,31	11,50	11,02
CaO	22,28	22,63	22,37	22,06	22,45	21,76	21,57	22,37
Na ₂ O	0,37	0,45	0,45	0,32	0,42	0,46	0,38	0,45
Total	100,33	100,11	99,68	100,08	100,27	99,22	99,33	99,60
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,734	1,656	1,608	1,798	1,595	1,606	1,624	1,609
TAI ³⁺	0,266	0,344	0,392	0,202	0,405	0,394	0,376	0,391
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,022	0,042	0,069	0,019	0,041	0,036	0,070	0,070
M1Ti ⁴⁺	0,098	0,124	0,132	0,080	0,144	0,157	0,134	0,133
M1Fe ³⁺	0,070	0,060	0,071	0,031	0,083	0,064	0,055	0,069
M1Cr ³⁺	0,002	0,013	0,010	0,007	0,011	0,007	0,006	0,010
M1Mg ²⁺	0,719	0,655	0,618	0,778	0,628	0,638	0,646	0,619
M1Fe ²⁺	0,088	0,106	0,100	0,084	0,093	0,098	0,089	0,100
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,083	0,057	0,063	0,096	0,065	0,080	0,099	0,064
M2Mn ²⁺	0,003	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,002	0,000
M2Ca ²⁺	0,887	0,908	0,902	0,878	0,901	0,883	0,871	0,902
M2Na ⁺	0,027	0,033	0,033	0,023	0,030	0,034	0,028	0,033
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	80,8	80,1	79,2	81,2	79,9	78,2	77,5	79,0
Em	38,9	36,6	35,2	41,6	35,4	36,1	36,7	35,3
Wo	47,9	50,8	51,4	46,9	50,8	50,0	49,5	51,4
Fs	13,2	12,6	13,4	11,5	13,8	13,9	13,9	13,3
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-BE2 cpx 18 b11	DSMU-BE2 cpx 18 b4	DSMU-BE2 cpx 18 c2	DSMU-BE2 cpx 18 c3	DSMU-BE2 cpx 18 c6	DSMU-BE2 cpx 18 c9	DSMU-BE2 cpx 18 c13	DSMPN cpx 3 b1
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	44,23	46,32	48,86	47,83	47,76	46,64	48,42	46,91
TiO ₂	4,41	3,33	2,31	2,72	2,57	3,51	2,87	3,05
Al ₂ O ₃	8,74	6,08	4,94	5,32	5,59	6,58	5,04	6,70
Cr ₂ O ₃	0,71	<LQ	0,46	0,43	0,36	0,11	0,41	0,16
FeO	7,12	7,63	6,17	6,72	6,66	7,76	6,82	7,44
MnO	0,07	0,12	0,12	0,12	0,10	0,10	0,08	0,09
MgO	11,73	13,00	14,36	13,77	13,77	12,98	14,06	13,02
CaO	22,63	22,52	21,95	22,20	22,06	22,28	22,06	22,08
Na ₂ O	0,45	0,36	0,34	0,34	0,38	0,37	0,32	0,48
Total	100,09	99,37	99,51	99,45	99,25	100,33	100,08	99,95
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,656	1,737	1,818	1,787	1,785	1,734	1,798	1,746
TAI ³⁺	0,344	0,263	0,182	0,213	0,215	0,266	0,202	0,254
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,042	0,005	0,035	0,021	0,032	0,022	0,019	0,040
M1Ti ⁴⁺	0,124	0,094	0,065	0,076	0,072	0,098	0,080	0,085
M1Fe ³⁺	0,060	0,096	0,025	0,047	0,053	0,070	0,031	0,073
M1Cr ³⁺	0,013	0,000	0,008	0,008	0,007	0,002	0,007	0,003
M1Mg ²⁺	0,655	0,727	0,797	0,767	0,767	0,719	0,778	0,722
M1Fe ²⁺	0,106	0,078	0,070	0,080	0,069	0,088	0,084	0,077
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,057	0,065	0,097	0,083	0,086	0,083	0,096	0,082
M2Mn ²⁺	0,002	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003
M2Ca ²⁺	0,908	0,905	0,875	0,889	0,883	0,887	0,878	0,880
M2Na ⁺	0,033	0,026	0,024	0,025	0,028	0,027	0,023	0,035
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	80,1	83,5	82,7	82,5	83,2	80,8	81,2	82,0
Em	36,6	38,8	42,7	41,0	41,2	38,9	41,6	39,3
Wo	50,8	48,3	46,9	47,5	47,4	47,9	46,9	47,9
Fs	12,6	13,0	10,5	11,4	11,3	13,2	11,5	12,8
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra	DSMPN	DSMPN	DSMPN	DSMPN	DSMPN	DSMPN
Grão	cpx 3	cpx 3	cpx 3	cpx 3	cpx 3	cpx 3
Região	3b - i	cb11	b10	c4	7c	c8
	Óxido / %m/m					
SiO ₂	47,40	47,37	50,56	50,41	49,38	48,63
TiO ₂	2,89	2,83	1,38	1,61	2,22	2,42
Al ₂ O ₃	6,44	6,16	3,91	4,10	5,12	5,34
Cr ₂ O ₃	0,16	0,16	<LQ	0,24	0,21	0,30
FeO	7,14	6,96	9,90	5,69	6,39	6,75
MnO	0,11	0,09	0,27	0,09	0,12	0,07
MgO	13,21	13,39	11,52	15,09	14,16	13,82
CaO	22,21	22,42	22,29	22,64	22,36	22,61
Na ₂ O	0,43	0,40	1,07	0,31	0,35	0,36
Total	100,03	99,80	100,92	100,21	100,36	100,33
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu					
TSi ⁴⁺	1,762	1,763	1,875	1,854	1,822	1,799
TAI ³⁺	0,238	0,237	0,125	0,146	0,178	0,201
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,044	0,033	0,046	0,032	0,045	0,032
M1Ti ⁴⁺	0,081	0,079	0,038	0,045	0,062	0,067
M1Fe ³⁺	0,058	0,068	0,077	0,039	0,027	0,049
M1Cr ³⁺	0,003	0,003	0,000	0,004	0,004	0,005
M1Mg ²⁺	0,732	0,743	0,637	0,827	0,779	0,762
M1Fe ²⁺	0,082	0,074	0,201	0,053	0,084	0,084
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,081	0,075	0,029	0,083	0,087	0,076
M2Mn ²⁺	0,003	0,003	0,008	0,003	0,004	0,002
M2Ca ²⁺	0,884	0,894	0,886	0,892	0,884	0,896
M2Na ⁺	0,031	0,029	0,077	0,022	0,025	0,026
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	81,7	83,4	73,5	85,9	82,1	82,7
Em	39,7	40,0	34,6	43,6	41,8	40,8
Wo	48,0	48,2	48,2	47,0	47,4	47,9
Fs	12,2	11,8	17,2	9,4	10,8	11,3
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DSMPN cpx 3 c6	DSMPN cpx 4 c1	DSMPN cpx 4 c4	DSMPN cpx 4 c2	DSMPN cpx 4 c3	DSMPN cpx 5 c2	DSMB-B cpx 19 b1	DSMB-B cpx 19 b2
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	48,33	49,49	49,46	46,85	48,62	48,92	38,89	41,63
TiO ₂	2,50	2,25	2,19	3,62	2,35	2,26	6,84	5,29
Al ₂ O ₃	5,88	4,59	4,51	6,87	4,87	4,72	11,68	10,79
Cr ₂ O ₃	0,22	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
FeO	6,86	8,44	7,74	9,09	10,22	9,82	9,86	8,59
MnO	0,10	0,20	0,20	0,21	0,27	0,26	0,14	0,10
MgO	13,56	12,82	12,86	11,17	11,13	11,23	9,55	10,75
CaO	22,25	21,90	22,24	21,94	21,95	22,08	21,53	21,57
Na ₂ O	0,46	0,52	0,83	0,50	0,49	1,15	0,57	0,46
Total	100,19	100,22	100,03	100,26	99,91	100,48	99,07	99,22
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,790	1,843	1,837	1,758	1,835	1,824	1,487	1,576
TAI ³⁺	0,210	0,157	0,163	0,242	0,165	0,176	0,513	0,424
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,046	0,045	0,035	0,062	0,052	0,032	0,014	0,058
M1Ti ⁴⁺	0,070	0,063	0,061	0,102	0,067	0,063	0,197	0,151
M1Fe ³⁺	0,050	0,024	0,065	0,012	0,016	0,099	0,145	0,097
M1Cr ³⁺	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Mg ²⁺	0,749	0,712	0,712	0,625	0,626	0,624	0,545	0,607
M1Fe ²⁺	0,082	0,157	0,127	0,199	0,240	0,181	0,099	0,087
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,081	0,082	0,049	0,075	0,067	0,026	0,071	0,088
M2Mn ²⁺	0,003	0,006	0,006	0,007	0,009	0,008	0,005	0,003
M2Ca ²⁺	0,883	0,874	0,885	0,882	0,888	0,882	0,882	0,875
M2Na ⁺	0,033	0,037	0,060	0,037	0,036	0,083	0,042	0,034
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	82,1	74,8	80,2	69,6	67,1	75,1	76,2	77,6
Em	40,5	38,4	38,6	34,7	33,9	34,3	31,2	34,5
Wo	47,8	47,1	48,0	49,0	48,1	48,4	50,5	49,8
Fs	11,7	14,5	13,4	16,2	18,0	17,3	18,3	15,7
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DSMB-B cpx 19 c3	DSMB-B cpx 19 b4	DSMB-B cpx 19 c6	DSMB-C cpx A1lat b1	DSMB-C cpx A1lat c2	DSMB-C cpx A1lat b3	DSMB-C cpx A1lat c4
	Óxido / %m/m						
SiO ₂	45,32	45,42	47,71	45,47	48,67	47,76	45,71
TiO ₂	3,02	2,87	2,12	3,80	2,58	3,09	3,66
Al ₂ O ₃	9,42	9,44	7,14	7,94	5,20	6,29	8,02
Cr ₂ O ₃	0,13	0,15	0,10	<LQ	0,03	<LQ	<LQ
FeO	7,62	7,27	7,12	7,81	7,37	7,58	7,75
MnO	0,10	0,11	0,12	0,16	0,15	0,19	0,15
MgO	12,24	12,38	13,68	12,45	14,07	12,81	12,57
CaO	21,31	21,38	21,24	22,01	21,93	21,96	21,83
Na ₂ O	0,51	0,51	0,53	0,49	0,41	0,54	0,48
Total	99,69	99,56	99,78	100,14	100,43	100,23	100,18
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu						
TSi ⁴⁺	1,690	1,693	1,767	1,693	1,797	1,774	1,700
TAI ³⁺	0,310	0,307	0,233	0,307	0,203	0,226	0,300
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,104	0,108	0,079	0,041	0,024	0,050	0,051
M1Ti ⁴⁺	0,085	0,080	0,059	0,106	0,072	0,086	0,102
M1Fe ³⁺	0,070	0,069	0,070	0,088	0,063	0,041	0,078
M1Cr ³⁺	0,002	0,003	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000
M1Mg ²⁺	0,680	0,688	0,755	0,691	0,775	0,710	0,697
M1Fe ²⁺	0,060	0,052	0,035	0,073	0,066	0,113	0,071
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,108	0,106	0,116	0,082	0,098	0,081	0,091
M2Mn ²⁺	0,003	0,004	0,004	0,005	0,005	0,006	0,005
M2Ca ²⁺	0,851	0,854	0,843	0,878	0,868	0,874	0,870
M2Na ⁺	0,037	0,037	0,038	0,036	0,029	0,039	0,034
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	80,2	81,3	83,4	81,7	82,5	78,5	81,1
Em	38,4	38,8	41,4	38,0	41,3	38,9	38,4
Wo	48,0	48,2	46,3	48,3	46,3	47,9	48,0
Fs	13,6	13,0	12,3	13,7	12,4	13,2	13,6
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DSMB-C cpx A1lat c5	DSMB-C cpx A1lat c6	DSMB-C cpx A1 b1	DSMB-C cpx A1 b2	DSMB-C cpx A1 c3	DSMB-C cpx A1 c4	DSMB-C cpx A1 c5
	Óxido / %m/m						
SiO ₂	46,00	49,57	45,39	45,30	47,98	48,00	46,94
TiO ₂	2,84	1,76	3,56	3,68	2,45	2,36	2,82
Al ₂ O ₃	8,99	5,23	8,31	7,67	6,72	6,75	7,78
Cr ₂ O ₃	0,34	0,33	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
FeO	7,23	6,51	8,08	7,92	8,08	8,05	8,16
MnO	0,12	0,13	0,13	0,15	0,20	0,23	0,20
MgO	12,59	15,01	12,37	12,28	13,31	13,14	12,88
CaO	21,57	21,03	21,61	22,55	20,74	20,68	20,89
Na ₂ O	0,54	0,42	0,53	0,48	0,69	0,73	0,68
Total	100,22	100,01	100,00	100,06	100,18	99,94	100,41
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu						
TSi ⁴⁺	1,704	1,828	1,691	1,689	1,776	1,781	1,736
TAI ³⁺	0,296	0,172	0,309	0,311	0,224	0,219	0,264
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,097	0,055	0,056	0,026	0,069	0,076	0,076
M1Ti ⁴⁺	0,079	0,049	0,100	0,103	0,068	0,066	0,078
M1Fe ³⁺	0,067	0,038	0,091	0,112	0,068	0,064	0,080
M1Cr ³⁺	0,006	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Mg ²⁺	0,695	0,825	0,687	0,683	0,734	0,727	0,710
M1Fe ²⁺	0,056	0,027	0,066	0,076	0,060	0,068	0,056
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,101	0,135	0,095	0,059	0,121	0,118	0,117
M2Mn ²⁺	0,004	0,004	0,004	0,005	0,006	0,007	0,006
M2Ca ²⁺	0,856	0,831	0,863	0,901	0,822	0,822	0,828
M2Na ⁺	0,039	0,030	0,038	0,035	0,050	0,053	0,049
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	81,5	83,5	81,0	83,5	80,2	79,6	80,4
Em	39,1	44,3	38,0	37,2	40,5	40,2	39,5
Wo	48,1	44,7	47,8	49,1	45,4	45,5	46,1
Fs	12,8	11,0	14,2	13,7	14,1	14,2	14,4
Classificação	diopsídio	augita	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DSMB-C cpx A1 c7	DSMB-C cpx A1 c8	DSMB-C cpx A1 c6	DSMB-C cpx A1 c9	DSMB-C cpx A1 c10	DSMB-C cpx A1 c11	DSMB-C cpx A1 b12	DSMB-C cpx A1 b13
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	47,28	46,75	48,18	48,83	48,93	48,82	45,73	45,89
TiO ₂	2,66	2,84	2,28	2,02	2,05	2,07	3,82	3,43
Al ₂ O ₃	7,78	8,11	6,62	6,21	6,09	6,04	7,86	8,30
Cr ₂ O ₃	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,03	<LQ	<LQ
FeO	7,78	7,96	7,79	7,83	7,70	7,79	7,92	7,79
MnO	0,19	0,18	0,17	0,18	0,23	0,20	0,16	0,14
MgO	12,98	12,68	13,59	13,85	13,66	13,72	12,37	12,41
CaO	20,99	20,88	21,08	20,79	20,89	20,80	21,93	22,14
Na ₂ O	0,70	0,67	0,65	0,64	0,69	0,72	0,52	0,53
Total	100,37	100,09	100,39	100,36	100,25	100,18	100,33	100,64
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,746	1,734	1,777	1,800	1,806	1,803	1,700	1,697
TAI ³⁺	0,254	0,266	0,223	0,200	0,194	0,197	0,300	0,303
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,085	0,089	0,065	0,070	0,071	0,066	0,045	0,059
M1Ti ⁴⁺	0,074	0,079	0,063	0,056	0,057	0,057	0,107	0,095
M1Fe ³⁺	0,070	0,066	0,078	0,064	0,058	0,066	0,079	0,090
M1Cr ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
M1Mg ²⁺	0,715	0,701	0,747	0,761	0,752	0,755	0,686	0,684
M1Fe ²⁺	0,056	0,065	0,047	0,050	0,062	0,055	0,084	0,071
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,114	0,117	0,115	0,128	0,117	0,120	0,084	0,080
M2Mn ²⁺	0,006	0,006	0,005	0,005	0,007	0,006	0,005	0,004
M2Ca ²⁺	0,831	0,830	0,833	0,821	0,826	0,823	0,874	0,877
M2Na ⁺	0,050	0,048	0,047	0,046	0,049	0,051	0,038	0,038
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	80,8	79,5	82,2	81,1	80,7	81,2	80,3	81,9
Em	39,9	39,3	40,9	41,6	41,2	41,4	37,9	37,9
Wo	46,4	46,5	45,6	44,9	45,3	45,1	48,2	48,6
Fs	13,7	14,2	13,5	13,5	13,4	13,5	13,9	13,6
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	augita	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DSMB-C cpx A2 b2	DSMB-C cpx A2 c3	DSMB-C cpx A2 b5	DSMB-C cpx A2 b6	DSMB-C cpx A2 b8	DSMB-C cpx A2 c7	DSMB-C cpx A2 c9
	Óxido / %m/m						
SiO ₂	44,63	48,88	46,46	46,65	47,66	49,14	49,36
TiO ₂	4,10	2,17	3,55	3,40	2,93	2,10	2,15
Al ₂ O ₃	9,33	6,20	7,30	7,15	6,25	5,03	4,82
Cr ₂ O ₃	<LQ	<LQ	<LQ	0,03	0,04	0,02	0,00
FeO	8,13	7,92	7,64	7,69	7,45	7,07	7,08
MnO	0,13	0,20	0,15	0,16	0,16	0,14	0,18
MgO	11,91	13,49	12,68	12,82	13,23	14,33	14,10
CaO	21,87	20,78	22,15	22,02	22,02	21,71	22,18
Na ₂ O	0,52	0,69	0,44	0,49	0,49	0,44	0,47
Total	100,64	100,33	100,40	100,42	100,26	100,01	100,36
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu						
TSi ⁴⁺	1,656	1,805	1,725	1,730	1,767	1,817	1,821
TAI ³⁺	0,344	0,195	0,275	0,270	0,233	0,183	0,179
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,064	0,075	0,044	0,043	0,040	0,037	0,030
M1Ti ⁴⁺	0,114	0,060	0,099	0,095	0,082	0,058	0,060
M1Fe ³⁺	0,089	0,048	0,064	0,071	0,063	0,060	0,063
M1Cr ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000
M1Mg ²⁺	0,659	0,743	0,702	0,709	0,731	0,790	0,775
M1Fe ²⁺	0,074	0,074	0,091	0,082	0,083	0,055	0,072
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,089	0,123	0,082	0,085	0,085	0,104	0,084
M2Mn ²⁺	0,004	0,006	0,005	0,005	0,005	0,004	0,006
M2Ca ²⁺	0,869	0,822	0,881	0,875	0,875	0,860	0,877
M2Na ⁺	0,038	0,049	0,032	0,035	0,035	0,031	0,034
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	80,1	79,1	80,2	80,9	81,3	83,2	83,3
Em	36,9	40,9	38,5	38,8	39,7	42,2	41,3
Wo	48,7	45,3	48,3	47,9	47,5	45,9	46,7
Fs	14,4	13,8	13,3	13,3	12,8	11,9	11,9
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio

Tabela 6A(continuação)

Amostra Grão Região	DSMB-C cpx E b1	DSMB-C cpx E b2	DSMB-C cpx E c3	DSMB-C cpx E c4	DSMB-C cpx E c6	DSMB-C cpx F b1	DSMB-C cpx F i	DSMB-C cpx F c3
	Óxido / %m/m							
SiO ₂	47,44	48,59	45,81	47,17	49,42	47,56	49,07	50,77
TiO ₂	2,96	2,66	3,98	3,21	2,41	2,73	2,23	1,63
Al ₂ O ₃	6,45	5,92	7,71	6,96	5,25	6,34	5,93	4,80
Cr ₂ O ₃	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
FeO	7,80	7,59	8,18	7,58	7,51	7,51	8,28	8,04
MnO	0,17	0,17	0,16	0,13	0,16	0,16	0,24	0,27
MgO	13,13	13,34	12,06	13,06	14,29	13,12	13,35	14,40
CaO	22,08	22,23	22,01	21,92	21,39	22,05	20,86	20,45
Na ₂ O	0,57	0,50	0,48	0,50	0,40	0,49	0,68	0,68
Total	100,62	101,05	100,40	100,53	100,86	99,99	100,66	101,05
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,752	1,787	1,707	1,744	1,816	1,767	1,810	1,858
TAl ³⁺	0,248	0,213	0,293	0,256	0,184	0,233	0,190	0,142
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi ⁴⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,033	0,044	0,045	0,048	0,044	0,045	0,068	0,065
M1Ti ⁴⁺	0,082	0,074	0,112	0,089	0,067	0,076	0,062	0,045
M1Fe ³⁺	0,090	0,057	0,059	0,065	0,036	0,070	0,047	0,036
M1Cr ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Mg ²⁺	0,723	0,732	0,670	0,720	0,783	0,727	0,734	0,786
M1Fe ²⁺	0,071	0,094	0,114	0,078	0,071	0,082	0,089	0,069
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,080	0,083	0,082	0,092	0,124	0,082	0,119	0,141
M2Mn ²⁺	0,005	0,005	0,005	0,004	0,005	0,005	0,008	0,008
M2Ca ²⁺	0,874	0,876	0,879	0,869	0,842	0,878	0,824	0,802
M2Na ⁺	0,041	0,036	0,035	0,036	0,029	0,035	0,049	0,048
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#	82,7	80,6	77,4	80,9	80,0	81,6	77,9	78,9
Em	39,2	39,6	37,0	39,4	42,1	39,4	40,3	42,7
Wo	47,4	47,4	48,6	47,5	45,3	47,6	45,3	43,5
Fs	13,4	12,9	14,4	13,1	12,7	12,9	14,4	13,8
Classificação	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	augita

Tabela 7A: Composição de elementos traços em olivina dos diques de DSMU e DSMB em ppm. Os elementos Nb, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Ho, Lu, Pb, Th e U foram também analisados, mas estiveram abaixo do limite de quantificação da técnica analítica (<LQ) em todas as análises e por isso não constam na tabela. A letra b é a borda e o c é o centro do cristal.

Amostra Grão Região	DSMU-BE2 ol 112 b2	DSMU-BE2 ol 112 c1	DSMU-BE2 ol 112 c2	DSMU-BE2 ol 113 b1	DSMU-BE2 ol 113 b2	DSMU-BE2 ol 113 c1	DSMU-BE2 ol 113 c3	DSMU-B2 ol 96 b1
Li	5,72	2,20	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2,46	<LQ
Na	144	146	151	117	107	149	137	117
P	<LQ	87	110	<LQ	194	143	107	230
Sc	4,85	3,20	3,65	4,51	4,84	3,29	3,13	5,10
Ti	135	80	82	120	149	81	62	190
V	6,75	7,31	7,54	7,08	4,59	7,21	5,77	4,80
Cr	541	454	506	425	210	442	402	240
Co	180	153	146	150	145	153	128	145
Cu	1,70	2,56	2,34	1,55	<LQ	3,05	2,30	<LQ
Zn	93	93	77	82	96	103	74	83
Rb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sr	0,217	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Y	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,317	0,119	<LQ	<LQ
Zr	<LQ	0,154	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ba	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
La	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Eu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,029	<LQ	<LQ
Dy	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Er	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Tm	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Yb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Hf	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ta	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Amostra Grão Região	DSMU-B2 ol 96 c1	DSMU-B2 ol 96 c2	DSMU-B2 ol 96' b1	DSMU-B2 ol 96' b2	DSMU-B2 ol 96' c1	DSMU-B2 ol 96' c2	DSMU-B2 ol 96'' b1	DSMU-B2 ol 96'' b2
Li	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Na	138	137	114	109	131	129	94	91
P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sc	3,44	4,13	4,57	3,10	3,97	2,99	3,80	3,90
Ti	108	106	131	150	92	104	127	157
V	6,96	9,59	5,45	5,33	5,62	5,33	4,05	3,44
Cr	452	440	312	245	380	438	205	178
Co	141	143	147	142	134	142	144	146
Cu	<LQ	3,37	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Zn	81	85	89	88	83	75	87	94
Rb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sr	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Y	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Zr	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ba	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
La	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Eu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Dy	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,125	<LQ	<LQ
Er	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Tm	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Yb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Hf	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ta	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Tabela 7A (continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-B2 ol 96" c1	DSMU-B2 ol 96" c2	DSMU-C ol 63 b1	DSMU-C ol 63 b2	DSMU-C ol 63 c1	DSMU-C ol 63 c2	DSMU-C ol 63' b1	DSMU-C ol 63' b2
Li	<LQ	<LQ	4,63	<LQ	2,19	<LQ	<LQ	<LQ
Na	130	135	133	110	137	161	149	164
P	<LQ	<LQ	232	<LQ	199	<LQ	<LQ	<LQ
Sc	3,58	3,33	3,33	<LQ	3,22	<LQ	<LQ	<LQ
Ti	126	120	133	<LQ	67	103	74	105
V	6,23	6,69	2,45	<LQ	6,75	6,23	5,18	5,93
Cr	496	487	129	186	520	532	449	467
Co	146	148	136	155	132	188	135	176
Cu	3,06	<LQ	<LQ	<LQ	2,85	2,56	3,28	<LQ
Zn	85	82	76	116	82	99	93	98
Rb	<LQ	<LQ	0,82	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sr	<LQ	<LQ	1,76	<LQ	0,401	<LQ	<LQ	<LQ
Y	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,099	<LQ	<LQ	<LQ
Zr	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ba	<LQ	<LQ	2,38	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
La	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Eu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Dy	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Er	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Tm	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Yb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Hf	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,157	<LQ
Ta	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Amostra Grão Região	DSMU-C ol 63' b3	DSMU-C ol 63' c1	DSMU-C ol 71 b1	DSMU-C ol 71 b3	DSMU-C ol 71 c1	DSMU-C ol 72 c1	DSMU-C ol 72 c2	DSMB-C ol A1 b1
Li	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Na	161	159	155	72	141	112	124	72
P	320	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sc	4,13	<LQ	4,29	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	4,17
Ti	105	137	133	59	93	95	134	167
V	8,26	7,20	6,41	2,81	6,42	10,36	<LQ	3,72
Cr	357	323	686	228	500	337	338	<LQ
Co	159	171	157	84	172	162	166	104
Cu	<LQ	<LQ	3,24	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Zn	70	96	114	59	104	93	97	206
Rb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sr	<LQ	<LQ	0,91	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Y	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,24
Zr	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ba	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
La	<LQ	0,033	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Eu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Dy	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Er	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Tm	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Yb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Hf	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ta	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Tabela 7A (continuação)

Amostra Grão Região	DSMB-C ol A1 c1	DSMB-C ol A1 c2	DSMB-C ol A1 c3	DSMB-C ol A2 b1	DSMB-C ol A2 b2	DSMB-C ol A2 b3	DSMB-C ol A2 b4
Li	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Na	72	72	72	79	64	66	71
P	480	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sc	3,86	4,40	3,78	4,45	3,79	3,49	3,79
Ti	143	147	155	150	151	165	182
V	3,11	3,21	3,37	2,97	2,91	3,41	3,53
Cr	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Co	85	90	89	100	94	91	102
Cu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Zn	204	244	231	206	222	214	221
Rb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sr	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Y	0,403	0,274	0,324	0,266	0,21	0,312	0,33
Zr	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ba	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
La	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Eu	<LQ	<LQ	<LQ	0,045	<LQ	<LQ	<LQ
Dy	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Er	<LQ	<LQ	<LQ	0,059	<LQ	<LQ	<LQ
Tm	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,045	0,054
Yb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,26	<LQ	<LQ
Hf	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ta	0,047	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Amostra Grão Região	DSMB-C ol A2 c2	DSMB-C ol A2 c3
Li	<LQ	<LQ
Na	69	75
P	<LQ	<LQ
Sc	3,64	3,26
Ti	165	144
V	2,61	2,79
Cr	<LQ	<LQ
Co	93	90
Cu	<LQ	<LQ
Zn	242	223
Rb	<LQ	<LQ
Sr	<LQ	<LQ
Y	0,365	<LQ
Zr	<LQ	<LQ
Ba	<LQ	<LQ
La	<LQ	<LQ
Eu	<LQ	<LQ
Dy	<LQ	<LQ
Er	<LQ	<LQ
Tm	0,032	<LQ
Yb	<LQ	0,48
Hf	<LQ	<LQ
Ta	<LQ	<LQ

Tabela 8A: Fração mássica de elementos traços em clinopiroxênio dos diques DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB em ppm. As análises foram obtidas por LA-ICP-MS. A região c é o centro do cristal, i é a região intermediária entre a borda e o centro e b é a borda.

Amostra Grão Região	DAPGG-BE cpx 1 c	DAPGG-BE cpx 5' c	DAPGG-B cpx 47 b1	DAPGG-B cpx 47 b2	DAPGG-B cpx 47 c1	DAPGG-B cpx 48 c1	DAPGG-B cpx 48 b2	DAPGG-B cpx 48' b
Li	<LQ	<LQ	1,47	<LQ	<LQ	<LQ	2,03	6,53
P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sc	107	96	90	132	88	153	114	167
V	73	58	155	77	104	101	120	135
Cr	1616	1166	18	2197	82	2742	1448	3145
Mn	312	313	729	467	462	494	543	728
Co	18	17	32	26	24	27	27	32
Ni	93	99	83	174	100	181	157	157
Zn	9,6	9,5	22,4	13,1	14,6	14,4	16,0	19,4
Rb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,80	2,90
Sr	106	100	386	231	257	213	201	276
Y	4,09	4,31	18,1	6,64	5,18	6,61	6,79	11,1
Zr	61	44	276	68	65	101	112	137
Nb	0,56	0,37	1,31	0,78	0,24	0,52	0,91	1,72
Cs	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,04	0,28
Ba	<LQ	<LQ	0,63	1,58	0,37	<LQ	1,41	18,0
La	7,20	5,33	24,2	9,41	8,22	9,0	10,7	13,7
Ce	18,2	14,8	57,4	20,8	21,7	23,1	28,2	30,6
Pr	2,89	2,61	11,4	3,59	3,75	3,70	4,68	5,28
Nd	16,7	14,0	59,9	20,0	18,7	20,2	21,4	29,9
Sm	3,06	2,26	11,2	4,69	3,55	5,30	4,53	5,50
Eu	0,82	0,87	3,16	1,09	1,04	1,24	1,27	1,93
Gd	2,29	2,36	6,98	3,55	2,31	3,09	2,99	4,95
Tb	0,29	0,22	0,96	0,39	0,29	0,35	0,41	0,48
Dy	1,32	1,30	3,71	2,08	1,31	1,62	1,94	2,74
Ho	<LQ	0,20	0,76	0,26	0,22	0,32	0,26	0,45
Er	0,47	<LQ	1,30	0,50	0,39	0,55	0,65	0,96
Tm	<LQ	<LQ	0,18	0,073	<LQ	<LQ	0,12	<LQ
Yb	<LQ	<LQ	0,79	0,41	0,30	0,40	0,44	<LQ
Lu	<LQ	<LQ	0,18	0,10	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Hf	2,75	2,59	10,7	4,45	2,71	5,50	5,87	6,86
Ta	<LQ	<LQ	0,39	0,13	<LQ	0,13	0,15	0,19
Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,16	0,20	<LQ
Th	<LQ	<LQ	0,21	0,08	0,12	<LQ	0,64	1,19
U	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,065	0,14

Tabela 8A (continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-I cpx A b1	DAPGG-I cpx A c1	DAPGG-I cpx A c2	DAPGG-I cpx B b1	DAPGG-I cpx B b3	DAPGG-I cpx B c2	DAPGG-I cpx B' c1	DAPGG-I cpx B' c2
Li	18,90	<LQ	<LQ	4,14	<LQ	<LQ	4,77	6,26
P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	75
Sc	15	100	109	153	108	92	171	170
V	246	75	70	162	92	88	120	124
Cr	36	2580	2103	3222	592	1190	2265	3282
Mn	959	492	460	692	645	548	677	<LQ
Co	24	32	30	38	37	34	38	36
Ni	41	310	304	351	292	291	307	<LQ
Zn	37,0	<LQ	13,4	24,1	19,9	18,4	19,3	<LQ
Rb	19,3	<LQ	<LQ	2,85	<LQ	<LQ	0,96	4,54
Sr	436	170	171	349	187	297	179	<LQ
Y	8,37	2,81	2,96	5,81	5,78	3,84	7,93	7,12
Zr	145	20	24	78	48	28	75	<LQ
Nb	5,10	<LQ	<LQ	1,06	<LQ	<LQ	0,60	<LQ
Cs	1,18	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,16
Ba	15,1	0,34	<LQ	8,44	<LQ	4,16	11,5	3,49
La	14,5	4,28	5,02	9,23	6,74	6,68	8,91	8,90
Ce	30,5	12,7	14,7	28,2	21,1	21,6	24,9	24,9
Pr	4,49	2,23	2,33	4,88	3,71	3,50	4,42	4,46
Nd	20,7	12,0	13,1	24,4	18,2	21,4	25,2	20,4
Sm	4,21	2,58	1,81	4,69	3,85	2,67	4,53	<LQ
Eu	1,08	0,67	0,69	1,07	1,24	0,78	1,09	1,49
Gd	3,09	1,72	2,24	3,60	3,13	2,25	4,36	<LQ
Tb	0,27	0,18	<LQ	0,36	0,37	0,17	0,42	0,40
Dy	1,65	0,74	1,02	2,06	1,74	1,82	2,71	<LQ
Ho	0,28	<LQ	<LQ	0,23	0,20	0,18	0,42	0,41
Er	0,86	<LQ	<LQ	0,59	0,49	0,53	0,75	<LQ
Tm	0,091	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,057
Yb	0,78	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Lu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,087
Hf	5,52	1,13	1,44	4,07	2,13	1,34	3,85	<LQ
Ta	0,32	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,081
Pb	0,84	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Th	3,88	0,049	<LQ	0,55	<LQ	<LQ	0,38	<LQ
U	0,65	0,055	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Tabela 8A (continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-I cpx B' c3	DAPGG-I cpx C' b1	DAPGG-I cpx 2 c3	DAPGG-I cpx 39 b1	DAPGG-I cpx 39 b2	DAPGG-I cpx 39 c2	DAPGG-I cpx 44' b1	DAPGG-I cpx 44' i
Li	8,29	<LQ	<LQ	<LQ	8,15	<LQ	<LQ	<LQ
P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sc	170	121	118	134	140	118	101	83
V	126	130	128	120	110	80	176	147
Cr	3499	2044	691	1009	2827	2205	520	<LQ
Mn	747	573	629	524	536	463	677	750
Co	40	36	33	30	28	26	38	41
Ni	367	288	173	209	269	227	206	185
Zn	22,5	17,4	18,2	16,0	18,4	13,9	24,7	24,9
Rb	3,76	<LQ	0,87	<LQ	7,63	0,74	6,53	1,93
Sr	199	190	242	206	187	177	290	238
Y	6,9	4,6	6,7	6,6	5,9	4,0	8,5	8,0
Zr	68	62	85	93	68	34	127	78
Nb	0,47	0,75	0,56	0,76	1,15	0,34	0,88	0,69
Cs	<LQ	<LQ	<LQ	0,33	0,36	<LQ	1,21	<LQ
Ba	2,73	1,61	<LQ	<LQ	8,93	<LQ	10,7	<LQ
La	9,08	8,54	10,4	10,8	8,18	5,97	14,3	8,56
Ce	24,7	26,5	30,2	27,8	20,2	15,9	35,3	26,6
Pr	4,44	4,42	4,84	5,06	3,72	2,92	5,92	4,89
Nd	23,5	21,3	27,1	24,3	20,1	14,9	33,1	25,5
Sm	4,21	4,27	6,07	5,26	5,36	2,90	5,94	5,11
Eu	1,24	1,09	1,52	1,11	1,11	0,93	2,15	1,66
Gd	3,78	2,64	3,20	3,78	2,67	2,41	4,83	4,18
Tb	0,46	0,36	0,48	0,29	0,30	0,27	0,59	0,37
Dy	1,69	2,03	2,12	1,44	<LQ	<LQ	2,49	2,70
Ho	<LQ	<LQ	<LQ	0,24	<LQ	<LQ	0,34	0,27
Er	0,69	<LQ	0,88	0,81	0,58	<LQ	<LQ	<LQ
Tm	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Yb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Lu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Hf	3,67	3,87	3,23	4,22	2,84	1,50	4,96	4,55
Ta	<LQ	0,183	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Th	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,39	<LQ	0,30	0,56
U	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Tabela 8A (continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-I cpx 44' c1	DAPGG-I cpx 44' c2	DAPGG-C2 cpx 1 b1	DAPGG-C2 cpx 1 b3	DAPGG-C2 cpx 10 b1	DAPGG-C2 cpx 10 b2	DAPGG-C2 cpx 10 b4	DAPGG-C2 cpx 10 b3
Li	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	6,87	<LQ	5,65
P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sc	18	177	160	164	54	112	<LQ	117
V	310	89	132	116	125	161	169	<LQ
Cr	<LQ	2232	2373	2516		866	283	539
Mn	1677	568	576	599	813	714	706	669
Co	34	26	33	30	39	40	39	37
Ni	<LQ	210	198	234	92	190	164	178
Zn	46,0	11,3	19,7	16,8	25,8	<LQ	18,7	19,2
Rb	1,49	<LQ	<LQ	0,510	0,490	1,62	2,14	<LQ
Sr	1171	154	213	169	283	238	<LQ	230
Y	7,3	7,3	6,8	6,4	7,5	7,5	7,9	7,0
Zr	200	70	104	90	92	117	122	<LQ
Nb	2,45	0,54	0,96	0,58	0,48	0,95	0,93	<LQ
Cs	3,17	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,25	<LQ	0,45
Ba	<LQ	<LQ	1,59	<LQ	<LQ	2,92	1,69	<LQ
La	13,5	7,75	10,8	9,12	10,8	11,5	12,1	<LQ
Ce	30,8	20,9	29,5	25,9	31,4	34,1	37,8	<LQ
Pr	5,03	4,09	4,87	4,60	5,70	6,04	6,72	5,21
Nd	22,5	24,5	28,2	23,6	30,0	29,3	33,9	22,9
Sm	3,77	4,94	4,56	4,57	5,99	5,22	7,31	4,25
Eu	1,21	1,39	1,18	1,32	1,85	1,51	<LQ	1,27
Gd	3,55	3,91	4,54	4,68	4,00	<LQ	3,31	3,04
Tb	0,34	0,44	0,47	0,57	0,52	0,37	0,38	0,49
Dy	<LQ	2,05	2,51	2,02	2,35	2,18	2,01	2,64
Ho	0,28	0,29	0,27	<LQ	0,26	0,23	<LQ	0,24
Er	1,04	0,91	0,82	<LQ	1,04	<LQ	0,85	0,78
Tm	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Yb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Lu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Hf	6,53	3,44	5,35	4,33	4,46	4,92	5,30	4,09
Ta	<LQ	<LQ	<LQ	0,236	<LQ	0,150	<LQ	<LQ
Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Th	1,28	<LQ	0,37	0,21	<LQ	0,45	<LQ	0,25
U	0,31	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Tabela 8A (continuação)

Amostra Grão Região	DAPGG-C2 cpx 10 c1	DAPGG-C2 cpx 13 b1	DAPGG-C2 cpx 13 b2	DAPGG-C2 cpx 13' b1	DAPGG-C2 cpx 13' b2	DAPGG-C2 cpx 13' c1	DAPGG-C2 cpx 13' c2	DSMU-BE2 cpx 118 c2
Li	<LQ	<LQ	16,80	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,29
P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	199
Sc	119	49	144	37	65	129	135	145
V	117	143	138	213	165	86	82	266
Cr	298	<LQ	1244	16	14	405	357	618
Mn	490	862	785	966	688	569	591	661
Co	31	35	36	36	37	33	33	24
Ni	216	<LQ	281	<LQ	96	200	216	67
Zn	18,0	25,5	37,7	33,4	21,3	18,9	19,7	18,8
Rb	<LQ	<LQ	10,90	0,980	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sr	213	317	199	556	297	178	196	194
Y	4,1	8,1	8,2	8,0	7,8	4,8	4,9	26,8
Zr	48	106	97	171	129	37	45	354
Nb	0,64	0,63	0,91	0,89	0,88	<LQ	<LQ	3,62
Cs	<LQ	<LQ	2,84	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ba	1,97	3,73	10,4	<LQ	<LQ	1,60	<LQ	<LQ
La	6,39	11,1	10,4	15,8	13,6	6,00	6,49	13,3
Ce	17,4	31,3	28,9	40,8	36,5	17,9	17,8	53,2
Pr	3,21	5,66	5,08	6,78	6,33	3,10	2,89	9,43
Nd	14,5	30,9	26,5	35,6	32,2	16,0	17,7	44,8
Sm	2,67	6,46	6,15	5,66	5,94	3,95	4,15	11,0
Eu	1,09	1,54	1,40	2,06	1,79	1,14	1,04	4,08
Gd	<LQ	2,55	4,07	4,47	4,56	2,44	2,49	13,8
Tb	0,28	0,58	0,50	0,42	0,48	0,29	0,29	1,30
Dy	1,45	2,11	2,39	2,24	2,50	1,24	1,87	8,00
Ho	0,28	0,32	0,45	0,30	0,39	0,18	0,28	1,61
Er	<LQ	1,03	<LQ	0,72	<LQ	<LQ	<LQ	2,36
Tm	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,44
Yb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,92
Lu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,4
Hf	2,15	4,56	4,77	6,45	5,19	1,96	1,83	16,8
Ta	0,073	<LQ	<LQ	0,30	<LQ	<LQ	<LQ	1,1
Pb	<LQ	<LQ	2,23	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Th	0,27	0,16	0,45	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,42
U	<LQ	<LQ	<LQ	0,008	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Tabela 8A (continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-BE2 cpx 118 b2	DSMU-B2 cpx 96 c	DSMU-B2 cpx 96 c	DSMU-C cpx 71' b1	DSMU-C cpx 71' c1	DSMU-C cpx 72' b1	DSMU-C cpx 72' c1	DSMPN cpx 3 b1
Li	2,10	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	4,55
P	84	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sc	139	121	146	61	81	85	56	46
V	170	259	285	303	273	305	325	298
Cr	2624	982	1092	<LQ	359	<LQ	<LQ	<LQ
Mn	620	633	697	714	610	778	684	954
Co	24	25	26	27	26	31	27	26
Ni	107	75	118	<LQ	<LQ	114	<LQ	58
Zn	23,3	22,8	26,7	41,5	29,1	33,8	39,2	42,1
Rb	<LQ	2,25	<LQ	<LQ	<LQ	1,29	3,72	5,78
Sr	159	201	186	329	283	310	353	133
Y	18,1	30,8	32,6	30,6	31,9	34,0	33,5	29,3
Zr	167	331	352	402	342	368	392	278
Nb	0,91	5,75	3,47	10,9	4,72	5,94	11,1	1,93
Cs	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,19
Ba	0,77	7,09	2,68	14,1	<LQ	2,06	37,9	8,32
La	8,22	19,0	17,4	36,8	29,9	29,3	35,3	11,2
Ce	30	49	48	110	82	88	97	28
Pr	5,53	8,72	9,21	16,1	12,6	13,1	14,2	6,14
Nd	27,9	50,3	53,4	79,4	62,4	64,6	71,4	33,7
Sm	7,39	13,7	13,9	20,9	15,1	16,7	16,6	10,2
Eu	2,49	3,90	4,23	5,52	4,01	5,28	4,05	2,64
Gd	7,14	11,3	12,5	15,0	12,8	12,7	13,4	9,15
Tb	0,92	1,47	1,79	2,09	1,70	2,01	1,59	1,43
Dy	5,48	6,75	8,67	9,11	8,21	8,85	8,48	6,46
Ho	0,85	1,12	1,73	1,41	1,55	1,63	1,54	1,21
Er	1,70	2,66	3,38	3,75	3,60	3,17	2,94	2,64
Tm	0,21	0,39	0,47	<LQ	<LQ	0,50	<LQ	0,27
Yb	1,68	2,07	2,27	3,47	<LQ	1,94	2,26	1,93
Lu	0,214	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,29
Hf	7,48	11,3	13,1	13,0	11,0	14,1	13,1	9,79
Ta	0,18	1,03	1,14	2,16	1,26	1,09	1,81	0,31
Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2,80	<LQ
Th	0,14	0,76	<LQ	1,47	0,79	0,65	1,19	0,49
U	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Tabela 8A (continuação)

Amostra Grão Região	DSMPN cpx 3 b2	DSMPN cpx 3 c1	DSMPN cpx 3 c2	DSMPN cpx c1	DSMPN cpx 4 c2	DSMB-B cpx 19 b1	DSMB-B cpx 19 b3	DSMB-B cpx 19 i
Li	7,09	6,63	7,78	46,61	13,34	6,06	<LQ	<LQ
P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	356	509	<LQ
Sc	65	102	99	34	35	80	107	89
V	368	219	200	20	122	411	344	390
Cr	41	<LQ	1490	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	882
Mn	739	548	523	1322	935	850	872	752
Co	27	28	28	21	27	26	30	30
Ni	82	147	149	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	69
Zn	26,8	23,1	23,5	52,8	33,1	38,3	34,8	25,6
Rb	<LQ	0,041	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sr	185	126	115	264	188	271	237	249
Y	28,4	<LQ	14,6	59,8	33,9	39,6	34,9	27,9
Zr	176	89	70	631	203	183	156	81
Nb	1,07	0,37	0,31	5,42	1,27	5,55	2,33	0,85
Cs	<LQ	0,01	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ba	<LQ	0,15	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
La	10,3	5,76	5,09	36,9	13,3	24,1	12,8	8,2
Ce	24,2	16,0	14,0	90,9	35,5	78,1	45,8	28,2
Pr	5,25	3,16	3,29	18,2	7,49	15,5	9,30	5,96
Nd	34,5	20,5	18,9	90,4	45,6	80,9	54,9	35,9
Sm	9,33	6,20	4,65	25,3	12,0	19,7	15,3	9,80
Eu	2,72	1,51	1,44	4,35	3,00	6,97	5,32	3,65
Gd	9,90	5,72	5,23	24,2	12,6	19,2	14,1	10,0
Tb	1,18	0,71	0,62	3,10	1,55	2,18	1,86	1,26
Dy	6,11	4,45	3,21	15,5	8,32	11,5	8,04	6,38
Ho	1,20	0,72	0,53	2,74	1,25	1,95	1,47	1,06
Er	2,64	1,39	1,50	6,65	2,98	4,71	3,06	2,80
Tm	0,29	0,14	0,14	0,76	0,34	0,58	<LQ	0,29
Yb	1,62	0,99	0,94	4,78	2,30	2,54	2,33	1,46
Lu	0,23	0,10	0,088	0,84	0,25	<LQ	0,33	0,29
Hf	6,30	4,54	3,59	24,83	8,01	5,63	7,20	4,02
Ta	0,223	0,144	0,126	1,880	0,264	1,990	0,580	<LQ
Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Th	0,13	0,07	<LQ	0,62	0,15	0,61	0,34	<LQ
U	<LQ	<LQ	<LQ	0,065	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Tabela 8A (continuação)

Amostra Grão Região	DSMB-B cpx 19 c1	DSMB-B cpx 19 c2	DSMB-C cpx A b1	DSMB-C cpx A b2	DSMB-C cpx A c1	DSMB-C cpx A i	DSMB-C cpx Alat b1	DSMB-C cpx A2 b1
Li	<LQ	<LQ	2,98	1,94	<LQ	1,83	2,04	2,80
P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sc	89	72	101	105	75	83	110	117
V	355	278	225	243	194	156	277	254
Cr	889	629	15	75	12	11	793	68
Mn	724	733	1144	950	1501	1388	1050	584
Co	32	29	17	18	14	10	19	21
Ni	<LQ	72	30	32	4	6	68	28
Zn	20,2	27,7	34,5	29,0	31,1	42,7	26,6	24,3
Rb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sr	224	207	328	353	315	250	299	288
Y	22,0	17,2	52,3	42,4	47,4	56,7	37,6	33,2
Zr	57	41	200	148	112	79	163	122
Nb	0,54	0,43	2,51	1,18	1,04	0,74	2,01	1,21
Cs	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ba	<LQ	0,51	<LQ	0,80	<LQ	<LQ	9,73	<LQ
La	6,16	4,60	19,1	14,7	16,2	14,6	12,5	12,9
Ce	24,6	16,8	61,6	47,1	59,6	49,5	42,9	36,6
Pr	5,32	3,67	14,5	10,7	12,4	10,3	9,13	9,35
Nd	31,7	23,0	76,4	61,0	70,9	68,0	52,5	33,5
Sm	8,19	6,87	22,5	19,1	23,5	24,5	16,2	15,4
Eu	3,26	2,04	6,53	5,17	6,43	6,27	5,02	4,26
Gd	8,44	7,03	21,3	13,6	20,0	15,5	13,1	13,5
Tb	0,89	0,84	2,40	1,86	2,26	1,95	1,82	1,60
Dy	6,21	4,04	15,3	11,6	13,6	13,1	10,6	8,66
Ho	0,89	0,89	2,16	1,97	2,28	2,60	1,85	2,07
Er	2,20	1,63	4,81	3,87	3,83	3,92	3,33	4,28
Tm	<LQ	0,23	0,61	0,40	0,52	0,61	0,40	0,37
Yb	1,60	<LQ	3,27	2,68	4,10	3,07	2,47	2,33
Lu	<LQ	<LQ	0,33	0,32	0,43	0,33	0,28	0,27
Hf	3,29	2,29	11,4	7,20	5,39	3,94	7,91	6,49
Ta	<LQ	<LQ	0,41	0,50	0,18	0,19	0,58	0,43
Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Th	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,12	0,23	0,13
U	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Tabela 8A (continuação)

Amostra Grão Região	DSMB-C cpx A2 c1	DSMB-C cpx A2lat b	DSMB-C cpx E b1	DSMB-C cpx E b2	DSMB-C cpx E b3	DSMB-C cpx F b1	DSMB-C cpx F b2
Li	<LQ	2,46	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Sc	96	85	69	73	65	58	76
V	181	227	249	283	246	242	265
Cr	9	156	49	59	35	26	39
Mn	1217	763	1035	1079	1211	1201	1143
Co	17	16	19	20	18	19	20
Ni	<LQ	37	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	33
Zn	30,1	23,9	35,2	38,8	32,9	38,5	38,7
Rb	<LQ	0,340	<LQ	<LQ	<LQ	0,490	<LQ
Sr	392	273	298	316	329	337	325
Y	47,0	32,6	30,0	31,3	41,8	40,4	34,8
Zr	90	105	104	112	148	138	117
Nb	0,89	1,35	1,30	1,47	1,72	1,87	1,30
Cs	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ba	<LQ	0,73	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
La	13,8	12,6	16,8	18,3	24,7	21,8	18,5
Ce	41,7	33,7	63,3	63,3	81,8	72,6	63,2
Pr	12,6	8,64	12,3	12,2	15,6	13,3	11,5
Nd	66,8	54,8	69,5	66,2	81,0	72,5	65,8
Sm	22,6	13,6	16,4	15,9	21,3	19,2	16,7
Eu	6,34	4,48	6,33	6,25	7,16	7,06	5,58
Gd	14,8	14,8	13,5	11,9	15,4	15,8	13,5
Tb	2,44	1,23	1,66	1,79	1,95	1,82	1,72
Dy	11,9	9,77	8,87	10,4	12,2	10,7	8,56
Ho	1,99	1,52	1,38	1,42	1,78	1,76	1,44
Er	4,80	3,39	2,76	3,09	4,19	3,79	3,32
Tm	0,47	0,34	0,32	0,34	0,49	0,36	0,32
Yb	3,22	2,39	2,30	2,11	1,96	1,95	1,99
Lu	0,42	0,34	0,46	0,32	0,43	0,33	0,27
Hf	3,78	6,33	4,04	5,06	6,46	5,32	5,50
Ta	<LQ	0,34	0,34	0,48	0,31	0,45	0,33
Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Th	<LQ	0,11	<LQ	<LQ	0,15	<LQ	<LQ
U	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Tabela 8 (continuação)

Amostra Grão Região	DSMB-C cpx F b3	DSMB-C cpx F i	DSMB-C cpx F c1
Li	<LQ	5,21	<LQ
P	<LQ	<LQ	<LQ
Sc	59	51	54
V	247	178	158
Cr	<LQ	<LQ	<LQ
Mn	1334	1741	1735
Co	18	13	14
Ni	<LQ	<LQ	<LQ
Zn	33,9	43,0	46,0
Rb	<LQ	<LQ	<LQ
Sr	337	269	268
Y	49,8	41,0	32,1
Zr	<LQ	76	55
Nb	2,38	1,22	0,75
Cs	<LQ	<LQ	<LQ
Ba	<LQ	<LQ	<LQ
La	27,5	20,3	14,9
Ce	93,2	70,1	<LQ
Pr	17,6	13,9	<LQ
Nd	89,8	73,6	55,8
Sm	23,7	20,2	15,4
Eu	8,09	8,76	6,13
Gd	20,4	16,4	12,7
Tb	2,50	2,11	1,35
Dy	12,6	10,4	9,22
Ho	2,10	1,88	1,14
Er	4,64	3,68	3,37
Tm	0,40	0,56	0,33
Yb	3,39	2,11	1,55
Lu	0,51	0,33	0,23
Hf	5,59	3,23	1,89
Ta	0,58	<LQ	<LQ
Pb	<LQ	<LQ	<LQ
Th	<LQ	<LQ	<LQ
U	<LQ	<LQ	<LQ

Tabela 9A: Composição química média de elementos maiores, menores e traços e fórmula estrutural de cristais de olivina de DSMU e DSMB. A fração mássica é dada em % para os óxidos. Esses dados são baseados nas Tabelas 5A e 7A. São apresentados também valores de fração mássica de elementos traços em ppm.

Amostra Grão Região	DSMU-BE2 ol 112a b1		DSMU-BE2 ol 112a c		DSMU-BE2 ol 112b b2		DSMU-BE2 ol 112b c2		DSMU-BE2 ol 113a b1	
Óxidos	X(2)	DP (2)	X(2)	DP(2)	X(3)	DP(3)	X(2)	DP(2)	X(2)	DP(2)
SiO ₂	40,08	0,44	40,74	0,01	40,20	0,17	40,70	0,35	40,55	0,03
FeO	14,66	0,92	11,73	0,10	14,01	0,27	11,68	0,04	13,99	0,28
MnO	0,25	0,01	0,15	0,01	0,21	0,01	0,16	0,00	0,21	0,06
MgO	44,29	0,24	46,98	0,32	45,20	0,14	46,98	0,05	44,84	0,13
CaO	0,45	0,11	0,19	0,03	0,36	0,05	0,21	0,02	0,33	0,04
NiO	0,14	0,04	0,32	0,01	0,20	0,00	0,32	0,22	0,18	0,01
Total	99,87		100,10		100,18		100,04		100,10	
Si ⁴⁺	1,007		1,004		1,012		1,008		1,006	
Fe ²⁺	0,308		0,293		0,292		0,242		0,279	
Mn ²⁺	0,005		0,004		0,005		0,003		0,005	
Mg ²⁺	1,658		1,682		1,668		1,727		1,692	
Ca ²⁺	0,012		0,010		0,009		0,005		0,008	
Ni ²⁺	0,003		0,004		0,004		0,007		0,005	
Σ cátions	2,993		2,996		2,988		2,992		2,994	
mg#	84,3		85,2		85,1		87,7		85,8	
n	X(1)		X(1)		X(1)		X(1)		X(1)	
Li	2,49		2,20		5,72		<LQ		<LQ	
Na	116		146		144		151		117	
P	166		87		<LQ		110		<LQ	
Sc	3,87		3,20		4,85		3,65		4,51	
Ti	159		80		135		82		120	
V	5,48		7,31		6,75		7,54		7,08	
Cr	311		454		541		506		425	
Co	144		153		180		146		150	
Cu	1,78		2,56		1,70		2,34		1,55	
Zn	79		93		93		77		82	
Rb	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Sr	0,21		<LQ		0,22		<LQ		<LQ	
Y	0,13		<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Zr	<LQ		0,15		<LQ		<LQ		<LQ	
Nb	0,062		<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Ba	0,94		<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
La	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Eu	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Dy	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Er	0,088		<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Tm	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Yb	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Hf	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Ta	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	

Tabela 9 (Continuação)

Amostra	DSMU-BE2		DSMU-BE2		DSMU-BE2		DSMU-B2		DSMU-B2	
Grão	ol 113b		ol 113a		ol 113b		ol 96		ol 96'	
Região	b2		c1		c2		c		b	
Óxidos	X(2)	DP(2)	X(2)	DP(2)	X(1)	X(4)	DP(4)	X (3)	DP(3)	
SiO ₂	39,99	0,16	40,73	0,14	40,31	40,26	0,11	39,70	0,26	
FeO	14,47	0,49	11,70	0,20	13,36	11,89	0,27	13,75	0,12	
MnO	0,22	0,03	0,12	0,01	0,22	0,15	0,02	0,22	0,02	
MgO	44,95	0,13	46,78	0,37	45,46	47,85	0,26	46,03	0,60	
CaO	0,43	0,61	0,19	0,02	0,29	0,19	0,03	0,33	0,33	
NiO	0,15	0,04	0,33	0,01	0,23	0,32	0,03	0,21	0,01	
Total	100,21		99,86		99,87	100,66		100,24		
Si ⁴⁺	0,992		0,991		0,992	0,992		0,993		
Fe ²⁺	0,245		0,287		0,240	0,293		0,243		
Mn ²⁺	0,003		0,005		0,003	0,005		0,003		
Mg ²⁺	1,757		1,713		1,762	1,703		1,757		
Ca ²⁺	0,005		0,009		0,005	0,010		0,005		
Ni ²⁺	0,006		0,004		0,006	0,004		0,006		
Σ cátions	3,008		3,009		3,008	3,008		3,007		
mg#	87,8		85,6		88,0	85,3		87,9		
n	X(1)		X(1)		X(1)	X(2)	DP(2)	X(2)	DP(2)	
Li	<LQ		<LQ		2,46	<LQ		<LQ		
Na	107		149		137	137	1	112	4	
P	194		143		107	<LQ		<LQ		
Sc	4,84		3,29		3,13	3,79	0,49	3,84	1,04	
Ti	149		81		62	107	2	140	13	
V	4,59		7,21		5,77	8,28	1,86	5,39	0,08	
Cr	210		442		402	446	9	278	48	
Co	145		153		128	142	1	145	4	
Cu	<LQ		3,05		2,30	3,37		<LQ		
Zn	96		103		74	83	3	88	1	
Rb	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ		<LQ		
Sr	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ		<LQ		
Y	0,32		0,12		<LQ	<LQ		<LQ		
Zr	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ		<LQ		
Nb	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ		<LQ		
Ba	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ		<LQ		
La	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ		<LQ		
Eu	<LQ		0,029		<LQ	<LQ		<LQ		
Dy	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ		<LQ		
Er	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ		<LQ		
Tm	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ		<LQ		
Yb	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ		<LQ		
Hf	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ		<LQ		
Ta	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ		<LQ		

Tabela 9 (Continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-B2 ol 96' c		DSMU-B2 ol 96" b		DSMU-B2 ol 96" c		DSMU-C ol 63 b	
Óxidos	X(5)	DP(5)	X(4)	DP(4)	X(3)	DP(3)	X(3)	DP(3)
SiO ₂	40,17	0,26	39,81	0,56	40,18	0,20	39,96	0,17
FeO	11,61	0,08	14,06	0,22	11,73	0,17	14,48	0,47
MnO	0,14	0,01	0,23	0,02	0,16	0,01	0,22	0,02
MgO	47,85	0,18	45,84	0,23	47,68	0,12	45,38	
CaO	0,19	0,01	0,39	0,03	0,20	0,02	0,34	0,06
NiO	0,31	0,02	0,18	0,02	0,31	0,02	0,19	0,06
Total	100,26		100,51		100,27		100,58	
Si ⁴⁺	0,997		0,994		0,994		0,992	
Fe ²⁺	0,302		0,245		0,313		0,293	
Mn ²⁺	0,005		0,003		0,006		0,004	
Mg ²⁺	1,687		1,753		1,680		1,707	
Ca ²⁺	0,009		0,005		0,011		0,008	
Ni ²⁺	0,004		0,006		0,003		0,005	
Σ cátions	3,003		3,006		3,006		3,008	
mg#	84,8		87,8		84,3		85,4	
n	X(2)	DP(2)	X(2)	DP(2)	X(2)	DP(2)	X(1)	
Li	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Na	130	1	92	2	133	4	110	
P	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Sc	3,48	0,69	3,85	0,07	3,46	0,18	<LQ	
Ti	98	9	142	21	123	4	<LQ	
V	5,48	0,21	3,75	0,43	6,46	0,33	<LQ	
Cr	409	41	192	19	492	6	186	
Co	138	6	145	2	147	2	155	
Cu	<LQ		<LQ		3,06		<LQ	
Zn	79	6	90	5	84	2	116	
Rb	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Sr	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Y	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Zr	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Nb	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Ba	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
La	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Eu	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Dy	0,13	0,07	<LQ		<LQ		<LQ	
Er	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Tm	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Yb	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Hf	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Ta	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	

Tabela 9 (Continuação)

Amostra Grão Região	DSMU-C ol 63' c		DSMU-C ol 71 b		DSMU-C ol 63 b	DSMU-C ol 72 c		DSMU-C ol 71 c
Óxidos	X(4)	DP(4)	X(3)	DP(3)	X(1)	X(3)	DP(3)	X(1)
SiO ₂	40,37	0,11	39,78	0,10	39,77	40,15	0,14	40,31
FeO	11,88	0,38	14,98	1,26	14,04	12,60	0,20	11,69
MnO	0,16	0,01	0,27	0,04	0,19	0,15	0,01	0,18
MgO	47,77	0,33	45,10	1,25	45,91	47,05	0,13	47,51
CaO	0,21	0,05	0,40	0,11	0,31	0,20	0,01	0,21
NiO	0,30	0,03	0,14	0,03	0,24	0,29	0,02	0,30
Total	100,69		100,68		100,46	100,43		100,19
Si ⁴⁺	0,994		0,996		0,990	0,994		0,997
Fe ²⁺	0,261		0,242		0,486	0,484		0,484
Mn ²⁺	0,003		0,004		0,010	0,011		0,011
Mg ²⁺	1,737		1,751		1,516	1,512		1,505
Ca ²⁺	0,005		0,006		0,007	0,005		0,006
Ni ²⁺	0,006		0,006		0,000	0,000		0,000
Σ cátions	3,006		3,004		3,010	3,006		3,003
mg#	86,9		87,9		75,7	75,8		75,7
n	X(4)	DP(4)	X(2)	DP(2)	X(1)	X(2)	DP(2)	X(1)
Li	<LQ		3,72	1,24	4,63	<LQ		<LQ
Na	158	7	146	13	133	118	118	141
P	320		<LQ		232	<LQ		<LQ
Sc	4,13		5,10	1,14	3,33	<LQ		<LQ
Ti	105	26	159	36	133	114	114	93
V	6,64	1,36	5,81	0,85	2,45	10,4	10,4	6,42
Cr	399	70	478	295	129	337	337	500
Co	160	18	160	4	136	164	164	172
Cu	3,28		3,24			<LQ		<LQ
Zn	90	13	111	4	76	95	95	104
Rb	<LQ		<LQ		0,82	<LQ		<LQ
Sr	<LQ		0,91	0,15	1,76	<LQ		<LQ
Y	<LQ		<LQ			<LQ		<LQ
Zr	<LQ		<LQ			<LQ		<LQ
Nb	<LQ		<LQ			<LQ		<LQ
Ba	<LQ		<LQ		2,38	<LQ		<LQ
La	0,033	0,019	<LQ			<LQ		<LQ
Eu	<LQ		<LQ			<LQ		<LQ
Dy	<LQ		<LQ			<LQ		<LQ
Er	<LQ		<LQ			<LQ		<LQ
Tm	<LQ		<LQ			<LQ		<LQ
Yb	<LQ		<LQ			<LQ		<LQ
Hf	0,157	0,092	<LQ			<LQ		<LQ
Ta	<LQ		<LQ			<LQ		<LQ

Tabela 9 (Continuação)

Amostra Grão Região	DSMB-C ol A1 b		DSMU-C ol A1 c		DSMB-C ol A2 b		DSMB-C ol A2 c
Óxidos	X(2)	DP(2)	X(1)		X(1)		X(1)
SiO ₂	38,34	0,22	38,58		38,79		38,56
FeO	22,52	0,21	22,45		22,52		22,64
MnO	0,48	0,02	0,52		0,48		0,49
MgO	39,39	0,24	39,39		39,29		39,42
CaO	0,24	0,02	0,20		0,23		0,21
NiO	0,00	0,02	0,01		0,01		0,00
Total	100,97		101,14		101,32		101,33
Si ⁴⁺	0,992		0,994		0,997		0,992
Fe ²⁺	0,487		0,484		0,484		0,487
Mn ²⁺	0,011		0,011		0,011		0,011
Mg ²⁺	1,512		1,512		1,505		1,512
Ca ²⁺	0,006		0,005		0,006		0,006
Ni ²⁺	0,000		0,000		0,000		0,000
Σ cátions	3,008		3,006		3,003		3,008
mg#	75,6		75,8		75,7		75,6
n	X(2)	DP(2)	X(3)	DP(3)	X(4)	DP(4)	X(1)
Li	<LQ		<LQ		<LQ		3,00
Na	72	2	72	0	70	6	72
P	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ
Sc	4,26	0,12	4,01	0,34	3,88	0,41	3,54
Ti	160	11	148	6	162	15	148
V	3,46	0,37	3,23	0,13	3,21	0,31	2,79
Cr	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ
Co	97	10	88	3	97	5	90
Cu	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ
Zn	213	10	226	21	216	7	228
Rb	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ
Sr	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ
Y	0,26	0,02	0,33	0,07	0,28	0,05	0,31
Zr	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ
Nb	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ
Ba	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ
La	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ
Eu	<LQ		<LQ		0,045	0,023	<LQ
Dy	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ
Er	<LQ		<LQ		0,059	0,035	<LQ
Tm	<LQ		<LQ		0,050	0,006	0,036
Yb	0,34	0,12	<LQ		0,26	0,11	0,48
Hf	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ
Ta	0,068	0,025	0,047		<LQ		<LQ

Tabela 10A: Composição de elementos maiores, menores e traços por zona analisada de cada cristal de clinopiroxênio de DAPGG, DSMU, DSMPN e DSMB. Os dados foram organizados por zonas de acordo com os resultados das Tabelas 6A e 8A. A letra X é a fração mássica e DP é o desvio padrão. Em parênteses após X e DP, está indicado o número de análises realizadas na zona em que constituem a média X, quando a quantidade é maior que 1. * mg# = $[Mg/(Mg + Fe^{2+})] \times 100$

Amostra Grão Regiões	DAPGG-BE cpx 1 c2	DAPGG-BE cpx 5' c2	DAPGG-B cpx 47 b1	DAPGG-B cpx 47 b2	DAPGG-B cpx 47 c2	DAPGG-B cpx 47' c1		
Óxido / %	X (1)	X (1)	X (2)	DP (2)	X (1)	X (3)	DP (3)	X (1)
SiO ₂	50,10	51,88	49,03	0,42	51,06	51,93	0,26	49,79
TiO ₂	2,32	1,64	2,50	0,23	2,02	1,50	0,21	2,32
Al ₂ O ₃	2,69	1,41	3,15	0,08	2,00	1,61	0,16	2,63
Cr ₂ O ₃	0,50	0,18	0,50	0,01	<LQ	0,14	0,06	0,54
FeO	6,30	5,65	6,91	0,67	7,06	5,08	0,26	6,18
MnO	0,10	0,13	0,10	0,00	0,14	0,09	0,02	0,11
MgO	14,56	15,76	14,24	0,45	14,04	15,53	0,27	14,54
CaO	22,83	23,18	22,97	0,14	23,39	23,58	0,12	23,10
Na ₂ O	0,31	0,20	0,34	0,01	0,31	0,24	0,04	0,30
K ₂ O	<LQ	<LQ	0,02	0,00	<LQ	<LQ		<LQ
Total	99,71	100,03	99,74	0,95	100,02	99,69	0,55	99,51
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,864	1,913	1,826		1,899	1,919		1,855
TAI ³⁺	0,118	0,061	0,138		0,088	0,070		0,116
TFe ³⁺	0,019	0,026	0,036		0,013	0,011		0,029
ΣT	2,000	2,000	2,000		2,000	2,000		2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000		0,000
M1Fe ³⁺	0,015	0,005	0,044		0,011	0,011		0,020
M1Ti ⁴⁺	0,065	0,045	0,070		0,057	0,042		0,065
M1Cr ³⁺	0,015	0,005	0,015		0,000	0,004		0,016
M1Mg ²⁺	0,807	0,866	0,791		0,778	0,855		0,808
M1Fe ²⁺	0,098	0,078	0,081		0,154	0,088		0,091
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000		0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000		1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000		0,000
M2Fe ²⁺	0,064	0,065	0,055		0,041	0,047		0,052
M2Mn ²⁺	0,003	0,004	0,003		0,004	0,003		0,003
M2Ca ²⁺	0,910	0,916	0,917		0,932	0,933		0,922
M2Na ⁺	0,023	0,015	0,024		0,023	0,017		0,022
M2K ⁺	0,000	0,000	0,001		0,000	0,000		0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000		1,000
mg#*	83,28	85,83	85,37		79,93	86,36		84,95
Nomenclatura	diopsídio	diopsídio	diopsídio		diopsídio	diopsídio		diopsídio
Elementos / ppm	X (1)	X (1)	X (1)		X (1)	X (1)		X (1)
Li	<LQ	<LQ	<LQ		1,47	<LQ		6,53
P	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ		<LQ
Sc	107	96	132		90	88		167
V	73	58	77		155	104		135
Cr	1616	1166	2197		18	82		3145
Mn	312	313	467		729	462		728
Co	18	17	26		32	24		32
Ni	93	99	174		83	100		157
Zn	10	9	13		22	15		19
Rb	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ		3
Sr	106	<LQ	231		386	257		276
Y	4,09	99,8	6,64		18,1	5,18		11,1
Zr	61	4,3	68		276	65		137
Nb	0,56	44,0	0,78		1,31	0,24		1,72
Cs	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ		0,3
Ba	<LQ	0,37	1,58		0,63	0,37		18,0
La	7,20	<LQ	9,41		24,2	8,22		13,7
Ce	18,2	5,33	20,8		57,4	21,7		30,6
Pr	2,89	14,8	3,59		11,4	3,75		5,28
Nd	16,7	2,61	20,0		59,9	18,7		29,9
Sm	3,06	14,0	4,69		11,2	3,55		5,50
Eu	0,82	2,26	1,09		3,16	1,04		1,93
Gd	2,29	0,87	3,55		6,98	2,31		4,95
Tb	0,29	2,36	0,39		0,96	0,29		0,48
Dy	1,32	0,22	2,08		3,71	1,31		2,74
Ho	<LQ	1,30	0,26		0,76	0,22		0,45
Er	0,47	0,20	0,50		1,30	0,39		0,96
Tm	<LQ	<LQ	0,07		0,18	<LQ		<LQ
Yb	<LQ	<LQ	0,41		0,79	0,30		<LQ
Lu	<LQ	<LQ	0,10		0,18	<LQ		<LQ
Hf	2,75	<LQ	4,45		10,7	2,71		6,86
Ta	<LQ	<LQ	0,13		0,39	<LQ		0,19
Pb	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ		<LQ
Th	<LQ	2,59	0,08		0,21	0,12		1,19
U	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ		0,14

Tabela 10A (continuação)

Amostra Grão Regiões	DAPGG-B cpx 48 b2	DAPGG-B cpx 48 c4	DAPGG-I1 cpx 39 b1	DAPGG-I1 cpx 39 b2	DAPGG-I1 cpx 39 c1	DAPGG – I1 cpx 44' b1		
Óxido / %	X (1)	X (4)	DP (4)	X (1)	X (1)	X (2)	DP (2)	X (1)
SiO ₂	48,23	50,17	0,12	48,07	50,27	52,55	0,06	48,14
TiO ₂	2,80	2,08	0,11	3,13	2,32	1,43	0,08	3,11
Al ₂ O ₃	3,47	2,42	0,07	3,89	2,26	1,27	0,02	3,90
Cr ₂ O ₃	<LQ	0,46	0,08	<LQ	<LQ	0,31	0,01	<LQ
FeO	8,43	5,75	0,07	8,47	7,71	4,95	0,07	8,58
MnO	0,21	0,09	0,01	0,12	0,14	0,09	0,01	0,12
MgO	12,98	14,88	0,13	13,08	14,08	15,99	0,01	13,05
CaO	22,87	23,02	0,06	23,17	23,01	23,63	0,16	22,81
Na ₂ O	0,49	0,28	0,01	0,41	0,35	0,21	0,00	0,43
K ₂ O		0,10	0,00	<LQ		<LQ		0,01
Total	99,48	99,24	0,25	100,34	100,14	100,42	0,20	100,15
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,812	1,870		1,792	1,869	1,926		1,798
TAI ³⁺	0,154	0,106		0,171	0,099	0,055		0,172
TFe ³⁺	0,034	0,024		0,037	0,031	0,019		0,030
ΣT	2,000	2,000		2,000	2,000	2,000		2,000
M1Al ³⁺	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000		0,000
M1Fe ³⁺	0,065	0,025		0,063	0,026	0,001		0,059
M1Ti ⁴⁺	0,079	0,058		0,088	0,065	0,040		0,087
M1Cr ³⁺	0,000	0,014		0,000	0,000	0,009		0,000
M1Mg ²⁺	0,727	0,826		0,727	0,781	0,874		0,727
M1Fe ²⁺	0,129	0,077		0,123	0,129	0,077		0,127
M1Mn ²⁺	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000		0,000
ΣM1	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000		1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000		0,000
M2Fe ²⁺	0,037	0,053		0,041	0,054	0,055		0,052
M2Mn ²⁺	0,007	0,003		0,004	0,004	0,003		0,004
M2Ca ²⁺	0,921	0,919		0,925	0,917	0,928		0,913
M2Na ⁺	0,036	0,020		0,030	0,025	0,015		0,031
M2K ⁺	0,000	0,005		0,000	0,000	0,000		0,001
ΣM2	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000		1,000
mg#*	81,44	86,39		81,59	81,03	86,88		80,24
Nomenclatura	diopsídio	diopsídio		diopsídio	diopsídio	diopsídio		diopsídio
Elementos / ppm	X (1)	X (1)		X (1)	X (1)	X (1)		X (1)
Li	2,03	<LQ		<LQ	8,15	<LQ		<LQ
P	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ		<LQ
Sc	114	153		134	140	118		101
V	120	101		120	111	80		177
Cr	1448	2742		1009	2827	2205		520
Mn	543	494		524	536	463		677
Co	27	27		30	28	26		38
Ni	157	181		209	269	227		206
Zn	16	14		16	18	14		25
Rb	1	<LQ		<LQ	8	1		7
Sr	201	213		206	187	177		290
Y	6,79	6,61		6,60	5,90	4,00		8,50
Zr	112	101		93	68	34		127
Nb	0,91	0,52		0,80	1,20	0,30		0,90
Cs	0,04	<LQ		0,3	0,4	<LQ		1,2
Ba	1,41	<LQ		<LQ	8,93	<LQ		10,7
La	10,7	8,98		10,8	8,18	5,97		14,3
Ce	28,2	23,1		27,8	20,2	15,9		35,3
Pr	4,68	3,70		5,06	3,72	2,92		5,92
Nd	21,4	20,2		24,3	20,1	14,9		33,1
Sm	4,53	5,30		5,26	5,36	2,90		5,94
Eu	1,27	1,24		1,11	1,11	0,93		2,15
Gd	2,99	3,09		3,78	2,67	2,41		4,83
Tb	0,41	0,35		0,29	0,30	0,27		0,59
Dy	1,94	1,62		1,44	<LQ	<LQ		2,49
Ho	0,26	0,32		0,24	<LQ	<LQ		0,34
Er	0,65	0,55		0,81	0,58	<LQ		<LQ
Tm	0,12	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ		<LQ
Yb	0,44	40,0		<LQ	<LQ	<LQ		<LQ
Lu	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ		<LQ
Hf	5,87	5,50		4,22	2,84	1,50		4,96
Ta	0,15	0,13		<LQ	<LQ	<LQ		<LQ
Pb	0,15	0,13		<LQ	<LQ	<LQ		<LQ
Th	0,64	<LQ		<LQ	0,39	<LQ		0,30
U	0,070	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ		<LQ

Tabela 10A (continuação)

Amostra Grão Regiões	DAPGG-I1 cpx 44' b2	DAPGG-I1 cpx 44' i	DAPGG-I1 cpx 44' c	DAPGG-I2 cpx A b	DAPGG-I2 cpx A c	DAPGG-I2 cpx B b		
Óxido / %	X (1)	X (1)	X (1)	X(3)	DP (3)	X (1)	X (2)	DP (2)
SiO ₂	50,56	51,40	51,93	48,05	0,45	52,80	50,20	0,40
TiO ₂	2,07	1,88	1,53	3,37	0,19	1,25	2,09	0,11
Al ₂ O ₃	1,72	1,82	1,46	3,71	0,34	1,28	2,33	0,43
Cr ₂ O ₃	<LQ	0,03	0,42	<LQ		0,28	<LQ	
FeO	8,85	7,02	5,23	8,48	0,15	4,81	7,28	0,03
MnO	0,23	0,10	0,10	0,15	0,01	0,07	0,11	0,00
MgO	12,80	14,72	15,85	12,70	0,19	16,07	14,56	0,17
CaO	23,06	22,49	23,25	23,06	0,00	23,52	23,24	0,05
Na ₂ O	0,64	0,56	0,22	0,52	0,06	0,22	0,33	0,03
K ₂ O	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	
Total	99,93	100,02	99,99	100,05	0,65	100,30	100,11	0,62
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,894	1,903	1,913	1,799		1,935	1,861	
TAl ³⁺	0,076	0,079	0,063	0,164		0,055	0,102	
TFe ³⁺	0,030	0,018	0,023	0,037		0,010	0,038	
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000		2,000	2,000	
M1Al ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	
M1Fe ³⁺	0,036	0,032	0,006	0,049		0,004	0,047	
M1Ti ⁴⁺	0,058	0,052	0,042	0,095		0,035	0,058	
M1Cr ³⁺	0,000	0,001	0,012	0,000		0,008	0,000	
M1Mg ²⁺	0,715	0,812	0,871	0,709		0,878	0,805	
M1Fe ²⁺	0,191	0,103	0,069	0,147		0,076	0,091	
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	
M2Fe ²⁺	0,021	0,065	0,063	0,032		0,058	0,050	
M2Mn ²⁺	0,007	0,003	0,003	0,005		0,002	0,003	
M2Ca ²⁺	0,926	0,892	0,918	0,925		0,924	0,923	
M2Na ⁺	0,046	0,040	0,016	0,038		0,016	0,023	
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000	1,000	
mg#*	77,14	82,92	86,80	79,81		86,75	85,06	
Nomenclatura	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio		diopsídio	diopsídio	
Elementos / ppm	X (1)	X (1)	X (1)	X (1)		X (2)	DP (2)	X (1)
Li	<LQ	<LQ	<LQ	18,90		1,02	0,46	<LQ
P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ		38	27	<LQ
Sc	18	83	177	15		104	6	108
V	310	147	89	246		72	4	92
Cr	<LQ	<LQ	2232	36		2341	338	592
Mn	1677	750	568	959		476	23	645
Co	34	41	26	24		31	1	37
Ni	<LQ	185	210	41		307	4	292
Zn	46	25	11.3	37		13	2	20
Rb	2	2	<LQ	19		<LQ		<LQ
Sr	1171	238	154	436		171	1	187
Y	7,30	8,00	7,30	8,37		2,89	0,11	5,78
Zr	200	78	69	145		22	3	48
Nb	2,50	0,70	0,50	5,10		<LQ		<LQ
Cs	3,2	<LQ		1,18		<LQ		<LQ
Ba	<LQ	<LQ	7,75	15,1		0,34	0,11	<LQ
La	13,5	8,56	20,9	14,5		4,65	0,52	6,74
Ce	30,8	26,6	4,09	30,5		13,7	1,42	21,1
Pr	5,03	4,89	24,5	4,49		2,28	0,07	3,71
Nd	22,5	25,5	4,54	20,7		12,6	0,73	18,2
Sm	3,77	5,11	1,39	4,21		2,20	0,54	3,85
Eu	1,21	1,66	3,51	1,08		0,68	0,01	1,24
Gd	3,55	4,18	0,44	3,09		1,98	0,37	3,13
Tb	0,34	0,37	2,05	0,27		0,18	0,04	0,37
Dy	<LQ	2,70	0,29	1,65		0,88	0,20	1,74
Ho	0,28	0,27	0,91	0,28		<LQ		0,20
Er	1,04	<LQ	<LQ	0,86		<LQ		0,49
Tm	<LQ	<LQ	<LQ	0,09		<LQ		<LQ
Yb	<LQ	<LQ	<LQ	0,78		<LQ		<LQ
Lu	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ		<LQ
Hf	6,53	4,55	3,44	5,52		1,29	0,22	2,13
Ta	<LQ	<LQ	<LQ	0,32		<LQ		<LQ
Pb	<LQ	<LQ		0,84		<LQ		<LQ
Th	1,28	0,56	<LQ	3,88		<LQ		<LQ
U	0,31	<LQ	<LQ	0,65		0,055	0,023	<LQ

Tabela 10A (continuação)

Amostra Grão Regiões	DAPGG-I2 cpx B c		DAPGG-I2 cpx B' c		DAPGG-I2 cpx c' b1		DAPGG-I2 cpx c' c	
Óxido / %	X (2)	DP (2)	X (2)	DP (2)	X (2)	DP (2)	X (2)	DP (2)
SiO ₂	51,61	0,14	51,03	0,37	49,88	0,78	53,06	0,10
TiO ₂	1,90	0,13	1,85	0,10	2,40	0,15	1,30	0,01
Al ₂ O ₃	1,63	0,13	11,32	6,63	2,75	0,62	1,15	0,07
Cr ₂ O ₃	0,10	0,05	0,16	0,09	<LQ		0,45	0,01
FeO	5,34	0,16	6,18	0,40	7,44	0,06	4,36	0,04
MnO	0,07	0,02	0,11	0,00	0,12	0,00	0,08	0,01
MgO	15,62	0,09	15,37	0,21	14,25	0,13	16,48	0,15
CaO	23,68	0,02	23,32	0,12	23,25	0,19	23,71	0,01
Na ₂ O	0,28	0,03	0,28	0,00	0,34	0,01	0,23	0,02
K ₂ O	<LQ		<LQ		0,02	0,00	<LQ	
Total	100,22	0,30	100,30	0,24	100,42	1,04	100,80	0,20
Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu								
TSi ⁴⁺	1,898		1,88		1,846		1,932	
TAl ³⁺	0,071		0,09		0,120		0,050	
TFe ³⁺	0,031		0,03		0,034		0,019	
ΣT	2,000		2,00		2,000		2,000	
M1Al ³⁺	0,000		0,00		0,000		0,000	
M1Fe ³⁺	0,014		0,03		0,046		0,000	
M1Ti ⁴⁺	0,052		0,05		0,067		0,036	
M1Cr ³⁺	0,003		0,01		0,000		0,013	
M1Mg ²⁺	0,856		0,84		0,786		0,894	
M1Fe ²⁺	0,075		0,07		0,101		0,057	
M1Mn ²⁺	0,000		0,00		0,000		0,000	
ΣM1	1,000		1,00		1,000		1,000	
M2Mg ²⁺	0,000		0,00		0,000		0,000	
M2Fe ²⁺	0,045		0,06		0,049		0,057	
M2Mn ²⁺	0,002		0,00		0,004		0,002	
M2Ca ²⁺	0,933		0,92		0,922		0,925	
M2Na ⁺	0,020		0,02		0,024		0,016	
M2K ⁺	0,000		0,00		0,001		0,000	
ΣM2	1,000		1,00		1,000		1,000	
mg#*	87,78		87,27		83,92		88,68	
Nomenclatura	diopsídio		diopsídio		diopsídio		diopsídio	
Elementos / ppm	X (1)		X (2)	DP (2)	X (1)		X (1)	
Li	<LQ		6,92		<LQ		6,36	
P	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Sc	92		163	0	121		101	
V	88		128	3	130		87	
Cr	1190		3273	659	2044		3072	
Mn	548		681	50	573		577	
Co	34		38	2	36		36	
Ni	291		341	42	288		377	
Zn	18		22	2	17		18	
Rb	<LQ		3	2	<LQ		1	
Sr	297		194	15	190		191	
Y	3,84		6,88	0,55	4,59		3,93	
Zr	28		74	5	62		20	
Nb	<LQ		0,63	0,09	0,75		<LQ	
Cs	<LQ		0,2	0,0	0,4		<LQ	
Ba	4,16		7,18	4,85	1,61		<LQ	
La	6,68		8,96	0,10	8,54		4,32	
Ce	21,6		25,1	0,11	26,5		15,4	
Pr	3,50		4,42	0,02	4,42		2,55	
Nd	21,4		24,6	2,43	21,3		14,0	
Sm	2,67		4,31	0,23	4,27		3,96	
Eu	0,78		1,15	0,20	1,09		0,57	
Gd	2,25		3,69	0,41	2,64		2,43	
Tb	0,17		0,41	0,03	0,36		<LQ	
Dy	1,82		2,06	0,72	2,03		<LQ	
Ho	0,18		0,42	0,01	<LQ		<LQ	
Er	0,53		0,70	0,04	<LQ		<LQ	
Tm	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Yb	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Lu	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Hf	1,34		3,82	0,13	3,87		1,14	
Ta	<LQ		<LQ		0,18		<LQ	
Pb	<LQ		<LQ		0,38		<LQ	
Th	<LQ		0,38	0,09	<LQ		<LQ	
U	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	

Tabela 10A (continuação)

Amostra Grão Regiões	DAPGG-C2 cpx 1 LAT b	DAPGG-C2 cpx 10 b1	DAPGG-C2 cpx 10 i1	DAPGG-C2 cpx 10 c	DAPGG-C2 cpx 13 b2	DAPGG-C2 cpx 13 c		
Óxido / %	X (1)	X (3)	DP (3)	X (1)	X (1)	X (1)	X (2)	DP (2)
SiO ₂	51,05	49,15	0,35	50,69	51,61	50,75	52,27	0,39
TiO ₂	2,19	2,77	0,22	2,37	1,86	2,34	1,77	0,11
Al ₂ O ₃	2,07	3,51	0,22	2,20	2,19	2,11	1,69	0,11
Cr ₂ O ₃	<LQ	0,05	0,01	<LQ	0,13	<LQ	0,22	0,07
FeO	7,13	7,59	0,29	7,67	5,29	7,79	5,92	0,11
MnO	0,13	0,10	0,00	0,18	0,10	0,17	0,12	0,01
MgO	14,26	13,67	0,44	13,77	15,40	13,54	15,63	0,01
CaO	23,40	23,02	0,14	23,33	23,68	23,56	15,63	0,07
Na ₂ O	0,38	0,39	0,03	0,40	0,26	0,43	23,16	0,12
K ₂ O	0,02	0,01	0,00	<LQ	0,02	<LQ	0,19	0,02
Total	100,62	100,27	0,72	100,61	100,53	100,69	100,94	0,46
	Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,866	1,826		1,879	1,893	1,881	1,913	
TAI ³⁺	0,090	0,154		0,096	0,095	0,092	0,073	
TFe ³⁺	0,024	0,020		0,025	0,012	0,027	0,014	
ΣT	2,000	2,000		2,000	2,000	2,000	2,000	
M1Al ³⁺	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	
M1Fe ³⁺	0,021	0,047		0,018	0,020	0,020	0,000	
M1Ti ⁴⁺	0,061	0,077		0,066	0,051	0,065	0,049	
M1Cr ³⁺	0,000	0,001		0,000	0,004	0,000	0,006	
M1Mg ²⁺	0,785	0,757		0,761	0,842	0,748	0,853	
M1Fe ²⁺	0,133	0,117		0,156	0,083	0,167	0,092	
M1Mn ²⁺	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	
ΣM1	1,000	1,000		1,000	1,000	2,000	1,000	
M2Mg ²⁺	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	
M2Fe ²⁺	0,042	0,051		0,039	0,047	0,028	0,077	
M2Mn ²⁺	0,004	0,003		0,006	0,003	0,005	0,004	
M2Ca ²⁺	0,926	0,916		0,926	0,931	0,936	0,908	
M2Na ⁺	0,027	0,028		0,028	0,018	0,031	0,014	
M2K ⁺	0,001	0,001		0,000	0,001	0,000	0,000	
ΣM2	1,000	1,000		1,000	1,000	1,000	1,000	
mg#*	81,75	81,77		79,61	86,61	79,32	83,42	
Nomenclatura	diopsídio	diopsídio		diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	
Elementos / ppm	X (1)	X (3)	DP (3)	X (1)	X (1)	X (1)	X (1)	
Li	<LQ	6,26	0,86	<LQ	<LQ	<LQ	16,80	
P	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
Sc	160	114	3	54	119	49	144	
V	132	165	6	125	117	143	138	
Cr	2373	563	292	<LQ	298	<LQ	1244	
Mn	576	697	24	813	490	862	785	
Co	33	39	2	39	31	35	36	
Ni	198	177	13	92	216	<LQ	282	
Zn	20	19	0	26	18	26	38	
Rb	<LQ	2	0	0	<LQ	<LQ	11	
Sr	213	234	6	283	213	317	199	
Y	6,80	7,51	0,45	7,51	4,14	8,07	8,15	
Zr	104	119	3	92	48	106	97	
Nb	0,96	0,94	0,01	0,48	0,64	0,63	0,91	
Cs	0,3	0,1	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2,84	
Ba	1,59	2,31	0,87	<LQ	1,97	3,73	10,4	
La	10,8	11,8	0,40	10,8	6,39	11,11	10,4	
Ce	29,5	36,0	2,61	31,4	17,4	31,3	28,9	
Pr	4,87	5,99	0,76	5,70	3,21	5,66	5,08	
Nd	28,2	28,7	5,56	30,0	14,5	30,9	26,5	
Sm	4,56	5,59	1,56	5,99	2,67	6,46	6,15	
Eu	1,18	1,39	0,17	1,85	1,09	1,54	1,40	
Gd	4,54	3,18	0,19	4,00	<LQ	2,55	4,07	
Tb	0,47	0,41	0,07	0,52	0,28	0,58	0,50	
Dy	2,51	2,28	0,33	2,35	1,45	2,11	2,39	
Ho	0,27	0,23	0,01	0,26	0,28	0,32	0,45	
Er	0,82	0,82	0,05	1,04	<LQ	1,03	<LQ	
Tm	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
Yb	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
Lu	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
Hf	<LQ	4,77	0,62	4,46	2,15	4,56	4,77	
Ta	5,35	0,15		<LQ	0,07	<LQ	<LQ	
Pb	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ	2,23	
Th	<LQ	0,35	0,14	<LQ	0,27	0,16	0,45	
U	0,374	<LQ		<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	

Tabela 10A (continuação)

Amostra Grão Regiões	DAPGG-C2 cpx 13' b1		DAPGG-C2 cpx 13' b2		DAPGG-C2 cpx 13' c2	DSMU-BE2 cpx 18 b
Óxido / %	X (2)	DP (2)	X (2)	DP (2)	X (1)	X (1)
SiO ₂	48,18	0,09	49,14	0,34	52,39	46,32
TiO ₂	3,31	0,02	2,65	0,09	1,66	3,33
Al ₂ O ₃	3,79	0,02	3,44	0,06	1,43	6,08
Cr ₂ O ₃	<LQ		<LQ		0,12	<LQ
FeO	8,43	0,01	7,67	0,20	5,72	7,63
MnO	0,15	0,00	0,12	0,01	0,10	0,12
MgO	12,85	0,18	13,67	0,11	15,55	13,00
CaO	22,97	0,04	23,14	0,20	23,56	22,52
Na ₂ O	0,53	0,03	0,36	0,02	0,23	0,36
K ₂ O	0,02	0,00	<LQ		<LQ	<LQ
Total	100,21	0,21	100,16	0,47	100,74	99,37
Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu						
TSi ⁴⁺	1,799		1,827		1,920	1,737
TAI ³⁺	0,167		0,151		0,062	0,263
TFe ³⁺	0,035		0,022		0,018	0,000
ΣT	2,000		2,000		2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,000		0,000		0,000	0,005
M1Fe ³⁺	0,055		0,050		0,001	0,094
M1Ti ⁴⁺	0,093		0,074		0,046	0,096
M1Cr ³⁺	0,000		0,000		0,003	0,000
M1Mg ²⁺	0,715		0,758		0,850	0,727
M1Fe ²⁺	0,137		0,118		0,100	0,078
M1Mn ²⁺	0,000		0,000		0,000	0,000
ΣM1	1,000		1,000		1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000		0,000		0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,037		0,048		0,056	0,065
M2Mn ²⁺	0,005		0,004		0,003	0,004
M2Ca ²⁺	0,919		0,922		0,925	0,905
M2Na ⁺	0,038		0,026		0,016	0,026
M2K ⁺	0,001		0,000		0,000	0,000
ΣM2	1,000		1,000		1,000	1,000
mg#*	80,46		82,02		84,53	83,51
Nomenclatura	diopsídio		diopsídio		diopsídio	
Elementos / ppm	X (1)		X (1)		X (2)	DP (2)
Li	<LQ		<LQ		<LQ	2,10
P	<LQ		<LQ		<LQ	84
Sc	37		65		132	4
V	213		165		84	3
Cr	16		688		381	34
Mn	966		37		580	16
Co	36		37		33	0
Ni	<LQ		96		208	11
Zn	33		21		19	1
Rb	1		<LQ		<LQ	<LQ
Sr	556		297		187	12
Y	7,98		7,81		4,81	0,06
Zr	171		129		41	6
Nb	0,89		0,88		<LQ	167
Cs	<LQ		<LQ		<LQ	0,91
Ba	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ
La	15,8		13,6		1,60	0,41
Ce	40,8		36,5		6,25	0,35
Pr	6,78		6,33		17,9	0,05
Nd	35,6		32,2		3,00	0,15
Sm	5,66		5,94		16,8	1,20
Eu	2,06		1,79		4,05	0,14
Gd	4,47		4,56		1,09	0,07
Tb	0,42		0,48		2,47	0,04
Dy	2,24		2,50		0,29	0,00
Ho	0,30		0,39		1,56	0,45
Er	0,72		<LQ		0,23	0,07
Tm	<LQ		<LQ		<LQ	1,70
Yb	<LQ		<LQ		<LQ	0,21
Lu	<LQ		<LQ		<LQ	1,68
Hf	6,45		5,19		<LQ	0,21
Ta	0,30		<LQ		1,90	0,09
Pb	<LQ		<LQ		<LQ	7,48
Th	<LQ		<LQ		<LQ	0,18
U	0,008		<LQ		<LQ	<LQ

Tabela 10A (continuação)

Amostra Grão Regiões	DSMU-B2 cpx 96 c	DSMU-B2 cpx 96' c	DSMU-BE2 cpx 18 c	DSMU-C cpx 71' c	DSMU-C cpx 72' b	DSMU-C cpx 72' c
Óxido / %	X (1)	X (1)	X (1)	X (1)	X (1)	X (1)
SiO ₂	46,89	45,88	49,31	41,12	42,77	47,98
TiO ₂	3,09	3,59	2,26	5,51	5,06	2,68
Al ₂ O ₃	6,40	6,88	4,42	11,06	9,77	5,87
Cr ₂ O ₃	0,16	0,11	0,41	0,08	<LQ	<LQ
FeO	7,25	7,48	6,13	8,01	8,03	7,21
MnO	0,10	0,11	0,10	0,09	0,09	0,11
MgO	13,25	12,69	14,36	10,59	10,96	13,03
CaO	22,37	22,11	22,51	22,35	22,51	22,43
Na ₂ O	0,36	0,45	0,32	0,50	0,48	0,44
K ₂ O	<LQ	<LQ	0,00	<LQ	<LQ	<LQ
Total	99,88	99,30	99,83	99,31	99,68	99,75
Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu						
TSi ⁴⁺	1,746	1,722	1,830	1,554	1,610	1,788
TAI ³⁺	0,254	0,278	0,170	0,446	0,390	0,212
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,027	0,026	0,023	0,047	0,043	0,046
M1Fe ³⁺	0,087	0,101	0,063	0,157	0,143	0,075
M1Ti ⁴⁺	0,073	0,077	0,029	0,117	0,095	0,048
M1Cr ³⁺	0,003	0,002	0,007	0,002	0,000	0,000
M1Mg ²⁺	0,736	0,710	0,794	0,597	0,615	0,724
M1Fe ²⁺	0,074	0,083	0,083	0,081	0,103	0,108
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,078	0,075	0,079	0,056	0,054	0,069
M2Mn ²⁺	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004
M2Ca ²⁺	0,893	0,889	0,895	0,905	0,908	0,895
M2Na ⁺	0,026	0,033	0,023	0,036	0,035	0,032
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
mg#*	82,82	81,82	83,10	81,43	79,62	80,36
Nomenclatura	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio
Elementos / ppm	X (1)	X (1)	X (1)	X (2)	DP (2)	X (1)
Li	<LQ	<LQ	1,29	<LQ	<LQ	<LQ
P	<LQ	<LQ	199	<LQ	<LQ	<LQ
Sc	121	146	145	71	14	56
V	259	285	266	288	21	305
Cr	982	1092	618	359	314	<LQ
Mn	633	697	661	662	74	778
Co	25	26	24	27	1	31
Ni	75	118	67	<LQ	<LQ	114
Zn	23	27	19	35	9	34
Rb	2	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1
Sr	201	186	194	306	33	310
Y	30,8	32,6	26,8	31,3	0,93	34,0
Zr	331	352	354	372	42	368
Nb	5,75	3,47	3,62	7,81	4,37	5,94
Cs	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Ba	7,09	2,68	0,28	14,1	2,83	2,06
La	19,0	17,4	13,3	33,4	4,88	29,3
Ce	48,9	48,1	53,2	96,1	20,2	87,9
Pr	8,72	9,21	9,43	14,4	2,47	13,1
Nd	50,3	53,4	44,8	70,9	12,0	64,6
Sm	13,7	13,9	11,0	18,0	4,09	16,7
Eu	3,90	4,23	4,08	4,77	1,07	5,28
Gd	11,3	12,5	13,8	13,9	1,55	12,7
Tb	1,47	1,79	1,30	1,90	0,28	2,01
Dy	6,75	8,67	8,00	8,66	0,64	8,85
Ho	1,12	1,73	1,61	1,48	0,10	1,63
Er	2,66	3,38	2,36	3,68	0,11	3,17
Tm	0,39	0,47	0,44	<LQ	<LQ	0,50
Yb	2,07	2,27	1,92	3,47	<LQ	1,94
Lu	<LQ	<LQ	0,37	<LQ	<LQ	<LQ
Hf	11,3	13,1	16,8	12,0	1,41	14,1
Ta	1,03	1,14	1,14	1,71	0,64	1,09
Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
Th	0,76	<LQ	0,42	1,13	0,48	0,65
U	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ

Tabela 10A (continuação)

Amostra Grão Regiões	DSMPN cpx 3 b1		DSMPN cpx 3 c		DSMPN cpx 4 c1		DSMPN cpx 4 c2		DSMB-C cpx A1 b	
Óxido / %	X (3)	DP (3)	X (2)	DP (2)	X (2)	DP (2)	X (2)	DP (2)	X (2)	DP (2)
SiO ₂	47,23	0,27	49,01	0,53	47,74	1,25	49,48	0,02	45,35	0,06
TiO ₂	2,92	0,11	2,32	0,14	2,99	0,90	2,22	0,04	3,62	0,08
Al ₂ O ₃	6,43	0,27	5,23	0,16	5,87	1,41	4,55	0,06	7,99	0,45
Cr ₂ O ₃	0,16	0,00	0,26	0,06	<LQ		<LQ		<LQ	
FeO	7,18	0,24	6,57	0,25	9,66	0,80	8,09	0,49	8,00	0,11
MnO	0,10	0,01	0,10	0,03	0,24	0,05	0,20	0,01	0,14	0,01
MgO	13,21	0,19	13,99	0,24	11,15	0,03	12,84	0,03	12,33	0,06
CaO	22,24	0,17	22,49	0,18	21,95	0,01	22,07	0,24	22,08	0,66
Na ₂ O	0,44	0,04	0,36	0,00	0,50	0,01	0,67	0,22	0,51	0,03
K ₂ O	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	
Total	99,90		100,31		100,08		100,12		100,01	
Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu										
TSi ⁴⁺	1,757		1,811		1,797		1,840		1,690	
TAI ³⁺	0,243		0,189		0,203		0,160		0,310	
TFe ³⁺	0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	
ΣT	2,000		2,000		2,000		2,000		2,000	
M1Al ³⁺	0,039		0,039		0,057		0,040		0,041	
M1Fe ³⁺	0,082		0,064		0,085		0,062		0,101	
M1Ti ⁴⁺	0,066		0,038		0,014		0,044		0,101	
M1Cr ³⁺	0,003		0,005		0,000		0,000		0,000	
M1Mg ²⁺	0,732		0,771		0,626		0,712		0,685	
M1Fe ²⁺	0,078		0,084		0,219		0,142		0,071	
M1Mn ²⁺	0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	
ΣM1	1,000		1,000		1,000		1,000		1,000	
M2Mg ²⁺	0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	
M2Fe ²⁺	0,079		0,081		0,071		0,066		0,077	
M2Mn ²⁺	0,003		0,003		0,008		0,006		0,004	
M2Ca ²⁺	0,886		0,890		0,885		0,880		0,882	
M2Na ⁺	0,032		0,026		0,036		0,049		0,037	
M2K ⁺	0,000		0,000		0,000		0,000		0,000	
ΣM2	1,000		1,000		1,000		1,000		1,000	
mg#*	82,35		82,36		68,31		77,44		82,23	
Nomenclatura	diopsídio		diopsídio		diopsídio		diopsídio		diopsídio	
Elementos / ppm	X (2)	DP (2)	X (2)	DP (2)	X (1)		X (1)		X (1)	
Li	5,82	1,80	7,21	0,81	46,61		13,34		2,98	
P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ		<LQ	
Sc	55	14	100	2	34		35		101	
V	333	49	209	13	20		122		225	
Cr	41	2	1490	81	<LQ		<LQ		15	
Mn	846	152	536	17	1322		935		1144	
Co	27	1	28	0	21		27		17	
Ni	70	17	148	2	<LQ		<LQ		30	
Zn	34	11	23	0	53		33		35	
Rb	6	1	0	0	<LQ		<LQ		<LQ	
Sr	159	36	120	8	264		188		328	
Y	28,8	0,63	14,6	0,75	59,8		33,9		52,3	
Zr	227	72	79	13	631		203		200	
Nb	1,50	0,61	0,34	0,04	5,42		1,27		2,51	
Cs	0,2	0,029	0,0	0,0041	<LQ		<LQ		<LQ	
Ba	8,32	0,69	0,15	0,05	<LQ		<LQ		<LQ	
La	10,7	0,63	5,43	0,47	36,9		13,3		19,1	
Ce	26,0	2,50	15,0	1,45	90,9		35,5		61,6	
Pr	5,70	0,63	3,23	0,09	18,2		7,49		14,5	
Nd	34,1	0,54	19,72	1,11	90,4		45,6		76,4	
Sm	9,77	0,62	5,43	1,10	25,3		12,0		22,5	
Eu	2,68	0,06	1,48	0,05	4,35		3,00		6,53	
Gd	9,53	0,53	5,48	0,35	24,2		12,6		21,3	
Tb	1,30	0,18	0,67	0,07	3,10		1,55		2,40	
Dy	6,29	0,25	3,83	0,88	15,5		8,32		15,3	
Ho	1,21	7,07	0,63	0,13	2,74		1,25		2,16	
Er	2,64	0,00	1,45	0,08	6,65		2,98		4,81	
Tm	0,28	0,01	0,14	0,01	0,76		0,34		0,61	
Yb	1,78	0,22	0,97	0,04	4,78		2,30		3,27	
Lu	0,26	0,04	0,10	0,01	0,84		0,25		0,33	
Hf	8,05	2,47	4,07	0,67	24,8		8,01		11,4	
Ta	0,27	0,06	0,14	0,01	1,88		0,26		0,41	
Pb	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ		<LQ	
Th	0,31	0,26	0,07	0,02	0,62		0,15		<LQ	
U	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,065		<LQ		<LQ	

Tabela 10A (continuação)

Amostra Grão Regiões	DSMB-C cpx A1 b2		DSMB-C cpx A1 i		DSMB-C cpx A1 c		DSMB-C cpx A1L b	DSMB-C cpx - A2 b1
Óxido / %	X (2)	DP (2)	X (2)	DP (2)	X (2)	DP (2)	X (1)	X (1)
SiO ₂	45,81	0,11	48,88	0,08	47,99	0,01	45,47	44,63
TiO ₂	3,63	0,28	2,06	0,01	2,41	0,06	3,80	4,10
Al ₂ O ₃	8,08	0,31	6,07	0,04	6,74	0,02	7,94	9,33
Cr ₂ O ₃	<LQ		0,03	0,01	<LQ		<LQ	<LQ
FeO	7,86	0,09	7,75	0,06	8,07	0,02	7,81	8,13
MnO	0,15	0,02	0,21	0,03	0,22	0,02	0,16	0,13
MgO	12,39	0,03	13,69	0,04	13,23	0,12	12,45	11,91
CaO	22,04	0,15	20,85	0,06	20,71	0,04	22,01	21,87
Na ₂ O	0,53	0,01	0,70	0,02	0,71	0,03	0,49	0,52
K ₂ O	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	<LQ
Total	100,47		100,23		100,06		100,13	100,63
Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu								
TSi ⁴⁺	1,699		1,804		1,778		1,693	1,656
TAI ³⁺	0,301		0,196		0,222		0,307	0,344
TFe ³⁺	0,000		0,000		0,000		0,000	0,000
ΣT	2,000		2,000		2,000		2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,052		0,068		0,072		0,041	0,064
M1Fe ³⁺	0,101		0,057		0,067		0,106	0,114
M1Ti ⁴⁺	0,084		0,062		0,066		0,088	0,089
M1Cr ³⁺	0,000		0,001		0,000		0,000	0,000
M1Mg ²⁺	0,685		0,753		0,731		0,691	0,659
M1Fe ²⁺	0,078		0,059		0,064		0,073	0,074
M1Mn ²⁺	0,000		0,000		0,000		0,000	0,000
ΣM1	1,000		1,000		1,000		1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000		0,000		0,000		0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,082		0,119		0,120		0,082	0,089
M2Mn ²⁺	0,005		0,007		0,007		0,005	0,004
M2Ca ²⁺	0,876		0,824		0,822		0,878	0,869
M2Na ⁺	0,038		0,050		0,051		0,036	0,038
M2K ⁺	0,000		0,000		0,000		0,000	0,000
ΣM2	1,000		1,000		1,000		1,000	1,000
mg#*	81,12		80,95		79,91		81,69	80,14
Nomenclatura	diopsídio		diopsídio		diopsídio		diopsídio	diopsídio
Elementos / ppm	X (1)		X (1)		X (1)		X (1)	X (1)
Li	1,94		1,83		<LQ		2,04	2,80
P	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	<LQ
Sc	105		83		75		110	117
V	243		156		194		277	254
Cr	75		11		12		793	68
Mn	950		1388		1501		1050	584
Co	18		10		14		19	21
Ni	32		6		4		68	28
Zn	29		43		31		27	24
Rb	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	<LQ
Sr	353		250		315		299	288
Y	42,44		56,71		47,39		37,61	33,2
Zr	148		79		112		163	122
Nb	1,18		0,74		1,04		2,01	1,21
Cs	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	<LQ
Ba	0,80		<LQ		<LQ		9,73	<LQ
La	14,7		14,6		16,2		12,5	12,9
Ce	47,1		49,5		59,6		42,9	36,6
Pr	10,7		10,28		12,4		9,13	9,35
Nd	61,0		67,96		70,9		52,5	33,5
Sm	19,1		24,49		23,5		16,2	15,4
Eu	5,17		6,27		6,43		5,02	4,26
Gd	13,6		15,5		20,0		13,1	13,5
Tb	1,86		1,95		2,26		1,82	1,60
Dy	11,6		13,1		13,6		10,6	8,66
Ho	1,97		2,60		2,28		1,85	2,07
Er	3,87		3,92		3,83		3,33	4,28
Tm	0,40		0,61		0,52		0,40	0,37
Yb	2,68		3,07		4,10		2,47	2,33
Lu	0,32		0,33		0,43		0,28	0,27
Hf	7,20		3,94		5,39		7,91	6,49
Ta	0,50		0,19		0,18		0,58	0,43
Pb	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	<LQ
Th	<LQ		0,12		<LQ		0,23	0,13
U	<LQ		<LQ		<LQ		<LQ	<LQ

Tabela 10A (continuação)

Amostra Grão Regiões	DSMB-C cpx - A2 b1	DSMB-C cpx A2L b	DSMB-C cpx E b	DSMB-C cpx F i	DSMB-C cpx F b		
Óxido / %	X (1)	X (3)	DP (3)	X (2)	DP (2)	X (1)	X(1)
SiO ₂	48,88	46,92	0,65	48,02	0,81	49,07	47,56
TiO ₂	2,17	3,29	0,32	2,81	0,21	2,23	2,73
Al ₂ O ₃	6,20	6,90	0,57	6,19	0,37	5,93	6,34
Cr ₂ O ₃	<LQ	0,04	0,01	<LQ		<LQ	<LQ
FeO	7,92	7,59	0,13	7,70	0,15	8,28	7,51
MnO	0,20	0,16	0,01	0,17	0,00	0,24	0,16
MgO	13,49	12,91	0,29	13,24	0,15	13,35	13,12
CaO	20,78	22,06	0,08	22,16	0,11	20,86	22,05
Na ₂ O	0,69	0,47	0,03	0,54	0,05	0,68	0,49
K ₂ O	<LQ	<LQ		<LQ		<LQ	<LQ
Total	100,32	100,35		100,80		100,64	99,96
Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu							
TSi ⁴⁺	1,805	1,741		1,770		1,810	1,767
TAI ³⁺	0,195	0,259		0,230		0,190	0,233
TFe ³⁺	0,000	0,000		0,000		0,000	0,000
ΣT	2,000	2,000		2,000		2,000	2,000
M1Al ³⁺	0,075	0,042		0,039		0,068	0,045
M1Fe ³⁺	0,060	0,092		0,078		0,062	0,076
M1Ti ⁴⁺	0,048	0,066		0,073		0,047	0,070
M1Cr ³⁺	0,000	0,001		0,000		0,000	0,000
M1Mg ²⁺	0,743	0,714		0,727		0,734	0,727
M1Fe ²⁺	0,074	0,086		0,083		0,089	0,082
M1Mn ²⁺	0,000	0,000		0,000		0,000	0,000
ΣM1	1,000	1,000		1,000		1,000	1,000
M2Mg ²⁺	0,000	0,000		0,000		0,000	0,000
M2Fe ²⁺	0,123	0,084		0,081		0,119	0,082
M2Mn ²⁺	0,006	0,005		0,005		0,008	0,005
M2Ca ²⁺	0,822	0,877		0,875		0,824	0,878
M2Na ⁺	0,049	0,034		0,038		0,049	0,035
M2K ⁺	0,000	0,000		0,000		0,000	0,000
ΣM2	1,000	1,000		1,000		1,000	1,000
mg#*	79,10	80,78		81,62		77,86	81,61
Nomenclatura	diopsídio	diopsídio		diopsídio		augita	diopsídio
Elementos / ppm	X (1)	X (1)	X (2)	DP (2)	X (1)	X (3)	DP (3)
Li	<LQ	2,46	<LQ	<LQ	5,21	<LQ	
P	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	
Sc	96	85	71	3	51	64	10
V	181	227	266	24	178	251	12
Cr	9	156	54	7	<LQ	32	10
Mn	1217	763	1057	31	1741	1226	98
Co	17	16	20	1	13	19	1
Ni	<LQ	37	<LQ		<LQ	33	11
Zn	30	24	37	3	43	37	3
Rb	<LQ	0	<LQ		<LQ	0	0
Sr	392	273	307	13	269	333	7
Y	47,0	32,6	30,7	0,95	41,0	41,7	7,60
Zr	90	105	108	6	76	127	15
Nb	0,89	1,35	1,39	0,12	1,22	1,85	0,54
Cs	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	
Ba	<LQ	0,73	<LQ		<LQ	<LQ	
La	13,8	12,6	17,5	1,03	20,3	22,6	4,56
Ce	41,7	33,7	63,3	0,03	70,1	76,3	15,4
Pr	12,6	8,64	12,3	0,05	13,9	14,1	3,12
Nd	66,8	54,8	67,8	2,34	73,6	76,0	12,4
Sm	22,6	13,6	16,1	0,38	20,2	19,9	3,55
Eu	6,34	4,48	6,29	0,06	8,76	6,91	1,26
Gd	14,8	14,8	12,7	1,12	16,4	16,6	3,53
Tb	2,44	1,23	1,73	0,09	2,11	2,01	0,42
Dy	11,9	9,77	9,63	1,07	10,4	10,6	2,0
Ho	1,99	1,52	1,40	0,03	1,88	1,77	0,33
Er	4,80	3,39	2,93	0,23	3,68	3,92	0,67
Tm	0,47	0,34	0,33	0,02	0,56	0,36	0,04
Yb	3,22	2,39	2,21	0,13	2,11	2,44	0,82
Lu	0,42	0,34	0,39	0,10	0,33	0,37	0,12
Hf	3,78	6,33	4,55	0,72	3,23	5,47	0,14
Ta	<LQ	0,34	0,41	0,10	<LQ	0,45	0,12
Pb	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	
Th	<LQ	0,11	<LQ		<LQ	<LQ	
U	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	<LQ	

Tabela 10A (continuação)

Amostra Grão Regiões	DSMB-C cpx F c	DSMB-B cpx 19 i	DSMB-B cpx 19 c1		DSMB-B cpx 19 c2	
Óxido / %	X (1)	X (1)	X (2)	DP (2)	X (1)	
SiO ₂	50,77	41,63	45,37	0,07	47,71	
TiO ₂	1,63	5,29	2,95	0,11	2,12	
Al ₂ O ₃	4,80	10,79	9,43	0,01	7,14	
Cr ₂ O ₃	<LQ	<LQ	0,14	0,02	0,10	
FeO	8,04	8,59	7,45	0,25	7,12	
MnO	0,27	0,10	0,11	0,01	0,12	
MgO	14,40	10,75	12,31	0,10	13,68	
CaO	20,45	21,57	21,35	0,05	21,24	
Na ₂ O	0,68	0,46	0,51	0,00	0,53	
K ₂ O	<LQ	<LQ	<LQ		<LQ	
Total	101,05	99,18	99,61		99,76	
Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios e 4 cátions / apfu						
TSi ⁴⁺	1,858	1,576	1,691		1,767	
TAI ³⁺	0,142	0,424	0,309		0,233	
TFe ³⁺	0,000	0,000	0,000		0,000	
ΣT	2,000	2,000	2,000		2,000	
M1Al ³⁺	0,065	0,058	0,106		0,079	
M1Fe ³⁺	0,045	0,151	0,083		0,059	
M1Ti ⁴⁺	0,036	0,097	0,069		0,070	
M1Cr ³⁺	0,000	0,000	0,003		0,002	
M1Mg ²⁺	0,786	0,607	0,684		0,755	
M1Fe ²⁺	0,069	0,087	0,056		0,035	
M1Mn ²⁺	0,000	0,000	0,000		0,000	
ΣM1	1,000	1,000	1,000		1,000	
M2Mg ²⁺	0,000	0,000	0,000		0,000	
M2Fe ²⁺	0,141	0,088	0,107		0,116	
M2Mn ²⁺	0,008	0,003	0,003		0,004	
M2Ca ²⁺	0,802	0,875	0,853		0,843	
M2Na ⁺	0,048	0,034	0,037		0,038	
M2K ⁺	0,000	0,000	0,000		0,000	
ΣM2	1,000	1,000	1,000		1,000	
mg#*	78,90	77,65	80,77		83,37	
Nomenclatura	augita		diopsídio		diopsídio	
Elementos / ppm	X (1)	X (2)	DP (2)	X (2)	DP (2)	X (1)
Li	<LQ	6,06	1,05	<LQ		<LQ
P	<LQ	433	108	<LQ		<LQ
Sc	54	94	14	89	0	72
V	158	373	34	372	24	278
Cr	<LQ	<LQ		886	5	629
Mn	1735	826	61	738	19	733
Co	14	28	2	31	1	29
Ni	<LQ	36	6	69	39	72
Zn	46	35	4	23	4	28
Rb	<LQ	<LQ		<LQ		<LQ
Sr	268	257	17	236	18	207
Y	32,1	38,01	2,69	24,9	4,12	17,18
Zr	55	170	13	69	17	41
Nb	0,75	3,84	1,62	0,70	0,22	0,43
Cs	<LQ	<LQ		<LQ		<LQ
Ba	<LQ	4,36	0,76	<LQ		0,51
La	14,90	18,4	5,66	7,16	1,41	4,60
Ce	<LQ	62,6	16,2	26,4	2,54	16,8
Pr	<LQ	12,0	3,16	5,64	0,45	3,67
Nd	55,8	68,1	13,0	33,8	2,97	23,0
Sm	15,4	17,7	2,23	9,00	1,14	6,87
Eu	6,13	5,97	0,88	3,46	0,28	2,04
Gd	12,7	17,0	2,58	9,23	1,11	7,03
Tb	1,35	1,91	0,25	1,08	0,26	0,84
Dy	9,22	9,52	1,75	6,30	0,12	4,04
Ho	1,14	1,67	0,25	0,98	0,12	0,89
Er	3,37	3,77	0,85	2,50	0,42	1,63
Tm	0,33	0,58	0,08	0,29	0,06	0,23
Yb	1,55	2,67	0,42	1,53	0,33	<LQ
Lu	0,23	0,40	0,11	0,29	0,07	<LQ
Hf	1,89	6,23	0,85	3,66	0,52	2,29
Ta	<LQ	1,16	0,74	<LQ		<LQ
Pb	<LQ	<LQ		<LQ		<LQ
Th	<LQ	0,45	0,14	<LQ		<LQ
U	<LQ	<LQ		<LQ		<LQ