

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MINERALOGIA E PETROLOGIA DE ENCLAVES
MICROGRANULARES DE NEFELINA SIENITOS DO
MACIÇO ALCALINO POÇOS DE CALDAS (MG-SP).**

Bruna Passarelli Ricardi

Orientador: Prof. Dr. Silvio Roberto Farias Vlach

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
Programa de Pós-graduação em Mineralogia e Petrologia

São Paulo

2010

Resumo

Os nefelina sienitos miasquíticos a intermediários do Maciço Alcalino Poços de Caldas (MAPC), em especial o tipo da Pedreira, possuem enclaves microgranulares félsicos e máfico-ultramáficos intrigantes.

O nefelina sienito da Pedreira (NeS) pode ser dividido em duas fácies texturais: uma de granulação média-grossa a grossa (NeS-g), outra de granulação média-fina a fina (NeS-f). O NeSg possui, mais comumente, enclaves microgranulares félsicos (EMF), de composição fonolítica. Estes enclaves podem envolver enclaves menores, máfico-ultramáficos, gerando “enclaves duplos”. O NeS-f apresenta mais tipicamente enclaves microgranulares máfico-ultramáficos (EMM), ora com feições de rompimento em estado plástico, ora com bordas angulosas e lineares. Diques de composição fonolítica cortam o NeS-g.

As rochas estudadas neste trabalho são constituídas por nefelina, feldspato alcalino e clinopiroxênio. Como fase acessória, têm-se titanita, magnetita e biotita-flogopita. Apatita ocorre também como mineral acessório, com exceção para o NeS-g.

No NeS-g, no NeS-f e nos EMF, o clinopiroxênio possui duas fases texturais: uma prismática, verde (egirina-augita) que também pode ter núcleo róseo/incolor (diopsídio, mais comum no NeS-f e no EMF); outra fibrosa, também verde, porém fortemente pleocroica (egirina). Os EMM são constituídos essencialmente por diopsídio, com M' (médio)~80. Quando porfirítico, o enclave possui macrocristais de diopsídio róseo/incolor ($\#mg\sim 0,9$) imersos numa matriz de diopsídio verde ($\#mg\sim 0,8$), ambos prismáticos. Magnetita dos NeS possui pouca variação, com teores baixos de Ti, diferente da magnetita dos enclaves. A assinatura química da nefelina dos EMM é equivalente à do NeS-f, com mais Fe^{3+} e menos K em relação ao NeS-g. Feldspato alcalino tende a ser mais potássico nos EMF e apresenta maior variação composicional nos EMM ($Ab_{10-33}Or_{72-80}$). Biotita está presente somente nos EMF e flogopita somente nos EMM.

O padrão de elementos terras raras (ETR) do clinopiroxênio róseo/incolor do NeS-f é semelhante ao do EMM. Egirina-augita e egirina possuem enriquecimento em ETR pesados.

Os enclaves máfico-ultramáficos são ultrabásicos, classificados como tefritos/basanitos (Le Bas *et al.*, 1986) ou nefelinitos/ankaratritos (De La Roche *et al.*, 1980), enquanto as rochas félsicas são intermediárias, correspondentes a fonolitos ou nefelina sienitos, dependendo da granulometria. Os diques e o NeS-f são peralcalinos, enquanto o EMF, o NeS-g e os EMM são peralcalinos/metaluminosos.

As rochas ultramáficas/ultrabásicas, aflorantes na porção noroeste do Maciço Alcalino Poços de Caldas (Ulbrich *et al.*, 2002), possuem padrões de ETR que indicam que estas rochas podem estar geneticamente ligadas aos enclaves máfico-ultramáficos.

De uma forma geral, as características estruturais, texturais e químicas das rochas estudadas corroboram com a hipótese de coexistência de pelo menos dois magmas distintos: um félsico sienítico insaturado outro ultramáfico/ultrabásico, que teriam interagido e formado os os EMM e o NeSf, principalmente. Enquanto num estágio posterior de cristalização do magma, porém ainda em estado plástico, o dique teria se colocado, com parcial absorção da rocha pelos nefelina sienitos, formando os EMF.

Abstract

The miaskitic to intermediate nepheline syenites of Poços de Caldas Alkaline Massif, especially the Pedreira type, have intriguing felsic and mafic-ultramafic microgranular enclaves.

The Pedreira's nepheline syenite type (NeS) can be divided into two textural facies: one that is medium-coarse to coarse grained (NeS-c) and the other that varies between medium-fine to fine grained (NeS-f). It is common among the NeS-c microgranular felsic enclaves (MFE) with phonolitic composition. These enclaves may develop smaller ones – mafic-ultramafic, generating “double enclaves”. The NeS-f usually presents mafic-ultramafic enclaves (MME), sometimes showing disrupted features in plastic stage and sometimes angular and linear edges. Phonolitic dykes cut the NeS-c.

The rocks studied in this work are formed by nepheline, alkali-feldspar and clinopyroxene. The accessory phase is characterized by titanite, magnetite and biotite-phlogopite. In exception to the NeS-c, apatite also occurs as an accessory mineral.

In the NeS-c, NeS-f and MFE, the clinopyroxene presents two textural phases: a green prismatic one (aegirine-augite), which also may have a pinkish/colourless core (diopsydite, which is common in the NeS-f and MFE); the other one is fibrous, also green, however with strongly pleochroism (aegirine). Essentially, the MME are formed by diopsydite, with M' (medium)~80. When porphyritic, the enclave has macrocrystals of pinkish/colourless diopsydite (with $mg\# \sim 0,9$) in a green diopsydite ($mg\# \sim 0,8$) matrix, both prismatic. In the NeS, the magnetite varies little: with low levels of Ti, differently from the enclaves' magnetite. The chemical signature of the nepheline in the MME equals to the one present in the NeS-f and has more Fe^{3+} and less K when compared to the NeS-c. The alkaline feldspar in the MFE has more potassium in its structure and presents a higher compositional variation in the MME ($Ab_{10-33}Or_{72-80}$). It is also noticeable that biotite is a component only to the MFE, while the phlogopite occurs in the MME.

The rare earth elements (REE) pattern in the pinkish/colourless clinopyroxene of the NeS-f is similar to the MME. Both aegirine-augite and aegirine present an enrichment regarding the heavy REE.

The MME are ultrabasic, classified as tephrite/basanite (Le Bas *et al.*, 1986) or nephelinite/ankartrites (De La Roche *et al.*, 1980), while the felsic rocks are intermediate, corresponding to phonolite and nepheline syenite, depending on the grain size. The dykes and the NeS-f are peralkaline, while the MFE, NeS-c and the MME are peralkaline/metaluminous.

The ultrabasic/ultrapotassic rocks, outcropping in the northwestern portion of the PCAM (Ulbrich *et al.*, 2002), have REE patterns which indicate that these rocks may be genetically related to mafic-ultramafic enclaves.

Generally, the structural, textural and chemical signatures of the rocks studied in this work confirm the hypothesis of the coexistence of at least two different magmas: a syenitic undersaturated felsic one and a ultramafic/ultrabasic one, and their interaction resulted in the MME and, above all, the NeS-f. While in a late stage of magma crystallization, but still in the plastic state, the dike would be placed, with partial absorption of the rock by the nepheline syenite, resulting in the EMF.

Agradecimentos

Antes de tudo, gostaria de agradecer à minha família e pessoas mais próximas, pelo apoio financeiro, pelo carinho e pela paciência comigo nas horas de aperto.

Agradeço ao meu orientador Silvio, pelo conhecimento transmitido, pela tolerância, pela paciência nesses quatro anos que trabalhamos juntos (ou “separados”) e pelos conselhos (pessoais ou não!).

Agradeço aos técnicos do IGc, pois cada um foi uma peça indispensável para a realização deste trabalho: ao Marcos (microssonda), embora ele seja são-paulino; à Angélica (Óptica) que durante minha temporada ao microscópio fez o tempo passar mais rápido; à Sandra e Margareth (ICP-MS), por suas verdadeiras aulas sobre os equipamentos; ao Ricardo (Lab. Química); ao Paulinho (FRX), que teve muita paciência com o enrosco das minhas amostras; ao Zé Paulo (LTA), pelos longos cigarros e conversas sobre dança (durante o tempo ocioso, claro!) e todos que de alguma forma, direta ao indiretamente, fizeram com que este trabalho fosse possível e menos cansativo.

Queria agradecer minhas companheiras de sala: a Bisteka (agora ela é professora!), não só pela companhia, mas também pelo apoio e por me ajudar com seu vasto conhecimento sobre a rotina do *Laser Ablation*; a Juli, que embora eu não tivesse muito contato, é um amor de pessoa.

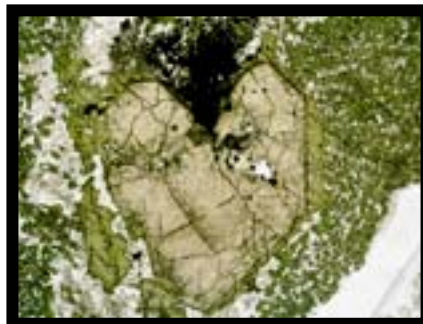
Agradeço também aos companheiros de corredor: Rasga, pelos cafés, cigarros, cervejas, baladas loucas, causos de amor e pelos conselhos quando o *last-minute panic* bateu; Jaú, pelas risadas, shows e cafés na época de seca; John, pelo *pisco sour*, Pavão e Vivi, companheiros de almoço.

Agradeço também ao apoio e conhecimento transmitido dos professores das disciplinas que eu cursei: Ciro, Gergely e Daniel; e das que eu fiz estágio PAE: Eliana, Fábio, Valdecir e Excelso.

Aos amigos que não me deixaram enlouquecer, seja por me proporcionarem momentos de muita satisfação e alegria, seja pelos conselhos: Kacilda, Silas, Itamar, Bitoka, Tropesso, Gustavo, Skrotho, Lampião, Noku, Babby, Mari, Paulinha, Cinthia, Ana Esmeralda, Lea, Thalita, Gustavo-guitarrista, Lis, Bernardo, Marina e Aurora, Uli, Jéssica, Anderson e Karen.

Agradeço a Capes, pelos seis primeiros meses de subsídio e a FAPESP, pelo um ano e meio de auxílio à minha pesquisa.

Obrigada clinopiroxênio, é de coração.



SUMÁRIO

Resumo	
Abstract	
Agradecimentos	
Sumário	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	vii
1	INTRODUÇÃO1
1.1	Localização e acessos2
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....5
2.1	Atividades de campo5
2.2	Atividades de laboratório7
2.2.1	Petrografia..... 7
2.2.2	Química mineral 8
2.2.2.1	<i>Microsonda eletrônica</i> 8
2.2.2.2	<i>Ablação a Laser – ICPMS</i> 10
2.2.3	Química de rocha..... 12
2.2.3.1	<i>Fluorescência de Raios X (FRX)</i> 12
2.2.3.2	<i>Espectrometria de Massas com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS)</i> 16
2.3	Atividades de gabinete..... 18
3	CONTEXTO GEOLÓGICO20
3.1	Geologia regional.....20
3.2	O Maciço Alcalino Poços de Caldas21
4	PETROGRAFIA26
4.1	Nefelina Sienitos26
4.1.1	Nefelina sienito médio-grosso a grosso 26
4.1.2	Nefelina sienito médio-fino a fino 32
4.2	Enclaves e outras estruturas35
4.2.1	Enclaves microgranulares félsicos 35
4.2.2	Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos..... 38
4.2.3	Diques e Outras Estruturas 47
5	QUÍMICA MINERAL50
5.1	Elementos maiores e menores50
5.1.1	Clinopiroxênio 50
5.1.1.1	<i>Nefelina sienitos</i> 50
5.1.1.2	<i>Enclaves microgranulares félsicos</i> 53
5.1.1.3	<i>Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos</i> 55
5.1.2	Titanita 59
5.1.2.1	<i>Nefelina sienitos</i> 59
5.1.2.2	<i>Enclaves microgranulares félsicos</i> 60
5.1.2.3	<i>Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos</i> 61
5.1.3	Minerais opacos 62

5.1.3.1	Nefelina sienitos.....	62
5.1.3.2	<i>Enclaves microgranulares félsicos</i>	63
5.1.3.3	<i>Enclave microgranulares máfico-ultramáficos</i>	64
5.1.4	Biotita-flogopita	66
5.1.4.1	<i>Enclaves microgranulares félsicos</i>	66
5.1.4.2	<i>Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos</i>	66
5.1.5	Apatita	67
5.1.5.1	<i>Nefelina sienito fino</i>	68
5.1.5.2	<i>Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos</i>	69
5.1.6	Feldspato alcalino	70
5.1.6.1	<i>Nefelina sienitos</i>	71
5.1.6.2	<i>Enclaves microgranulares félsicos</i>	72
5.1.6.3	<i>Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos</i>	72
5.1.7	Nefelina	74
5.1.7.1	<i>Nefelina Sienitos</i>	74
5.1.7.2	<i>Enclaves microgranulares félsicos</i>	75
5.1.7.3	<i>Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos</i>	76
5.2	Elementos traços	77
5.2.1	Clinopiroxênio	77
5.2.2	Titanita	82
5.2.3	Apatita.....	83
6	QUÍMICA DE ROCHA	87
6.1	Classificação e nomenclatura	87
6.2	Elementos maiores e menores	89
6.3	Elementos traços e terras raras	90
7	INTERPRETAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

ANEXOS

- ANEXO I - Foto panorâmica do perfil AB da frente de lavra da Pedreira da Prefeitura, com localização das amostras coletadas na Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.
- ANEXO II - Análises químicas quantitativas (WDS) das fases minerais máficas e félsicas mais importantes dos nefelina sienitos e dos enclaves microgranulares máficos da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.
- ANEXO III - Análises químicas por ICPM-LA de clinopiroxênio, titanita e apatita dos nefelina sienitos e dos enclaves microgranulares félsicos e máfico-ultramáficos da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.
- ANEXO IV - Análises químicas por FRX dos nefelina sienitos, dique fonolítico e enclaves microgranulares félsicos e máfico-ultramáficos da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.
- ANEXO V - Análises químicas por ICP-MS dos nefelina sienitos, dique fonolítico e enclaves microgranulares félsicos e máfico-ultramáficos da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.
- ANEXO VI - Análises químicas quantitativas (WDS) de todos os cristais analisados das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Índice de Figuras

Figura 1-1: Mapa rodoviário entre São Paulo e Poços de Caldas, adaptado de ENGEMAP (2005).....	3
Figura 1-2: Imagem de satélite de parte da cidade de Poços de Caldas e arredores, com localização da Pedreira da Prefeitura. Adaptado de Google Earth (imagens de 15/Ago/2007).....	4
Figura 2-1: Diagrama multielementar para cada rotina realizada para o padrão BCR-2G, comparando-os com os recomendados, normalizados pelo condrito (Taylor & McLennan, 1985).....	11
Figura 2-2: Diagrama multielementar para cada rotina realizada para o padrão NISTSRM 610, comparando-os com os recomendados.....	12
Figura 2-3: Resultados do padrão JB-1a analisado em todas as rotinas de FRX, comparando-os com os resultados recomendados, (A) para os elementos maiores e menores (% em peso de óxido); (B) para os elementos traços (ppm).	14
Figura 2-4: Gráfico comparativo da duplicata realizada em 2007. A amostra PPE-37 é de dique fonolítico, (A) dos elementos maiores e menores (% em peso de óxido); (B) dos elementos traços (ppm).	15
Figura 2-5: Gráfico comparativo entre a análise realizada em 2007 e a em 2008 da amostra PPE-21, dique fonolítico, (A) dos elementos maiores e menores (% em peso de óxido); (B) dos elementos traços (ppm).	16
Figura 2-6: Diagramas multielementares das rotinas 1 e 2 por ICP-MS, para os padrões JG-3 e JR-1, comparando-os com os recomendados, normalizados pelo condrito (Taylor & McLennan, 1985).	17
Figura 3-1: Mapa Geológico Regional com a localização dos principais maciços alcalinos da borda leste da Bacia do Paraná (adaptado de Ulbrich et al. 2005).....	21
Figura 3-2: Localização da área de estudo no mapa geológico simplificado do Maciço Alcalino Poços de Caldas (adaptado e modificado de Ulbrich, 1984).....	22
Figura 4-1: Fotografias que compreendem as principais feições macroscópicas do nefelina sienito médio-grosso a grosso.	28
Figura 4-2: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais do nefelina sienito médio-grosso a grosso.	33
Figura 4-3: Diagrama classificatório A-P-F (A- feldspato alcalino, P- plagioclásio e F- feldspatoide). As proporções modais de feldspato alcalino e nefelina das fácies de nefelina sienito estão plotadas.	33
Figura 4-4: Fotografias que compreendem as principais feições macroscópicas do nefelina sienito médio-fino a fino.	34
Figura 4-5: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais do nefelina sienito médio-fino a fino.	36
Figura 4-6: Fotografias que compreendem as principais feições macroscópicas dos enclaves microgranulares félsicos.	37
Figura 4-7: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais dos enclaves microgranulares félsicos.	39
Figura 4-8: Fotografias que compreendem as principais feições macroscópicas dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos.	41
Figura 4-9: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos.....	43
Figura 4-10: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos.....	45
Figura 4-11: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais dos enclaves microgranulares máficos equigranulares.....	47
Figura 4-12: Fotografias que compreendem as principais feições macroscópicas dos diques fonolíticos.	48
Figura 4-13: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais dos diques fonolíticos.	49
Figura 4-14: Venulações preenchidas por feldspato alcalino, zeólitas e egirina. De cor mais clara que o nefelina sienito. <i>In situ</i>	49
Figura 5-1: Diagrama Q-J (Q = Ca+Mg+Fe ²⁺ e J = 2Na) indicando todas as análises obtidas de clinopiroxênios dos nefelina sienitos, enclaves e diques fonolíticos, classificando-os em	

variedades Quad, cálcico-sódicas e sódicas. Símbolos em cinza representam análises obtidas anteriormente por Ricardi (2006) e símbolos pretos representam as deste trabalho...	51
Figura 5-2: Diagrama Q-J (Q = Ca+Mg+Fe ²⁺ e J = 2Na) indicando as análises por WDS obtidas de clinopiroxênios das diferentes fácies de nefelina sienitos, classificando-os em variedades Quad, cálcico-sódicas e sódicas.	51
Figura 5-3: (A) Diagrama ternário Mg-Na-(Fe ²⁺ +Mn) para os piroxênios dos nefelina sienitos, comparados com os dados obtidos por Ulbrich (1983) para os nefelina sienitos “híbridos” (nomenclatura dada pela autora para o conjunto de rochas a qual pertencem os nefelina sienitos aqui estudados). (B) Composição catiônica dos piroxênios dos nefelina sienitos através do diagrama ternário WEF-Jd-Eg.	52
Figura 5-4: Diagrama mostrando a correlação entre Fe ³⁺ + Na por Ca + Fe ²⁺ + Mn + Mg para os clinopiroxênios das rochas sieníticas. Observar a excelente correlação, com elevado coeficiente de determinação.	52
Figura 5-5: (A) Diagrama composicional ternário para classificação dos piroxênios dos glomérulos máficos, expresso por moléculas de Wo-En-Fs (wollastonita, enstatita e ferrossilita ou WEF). (B) Diagrama ternário expresso em moléculas de WEF-Jd-Eg (jadeíta e egirina).	53
Figura 5-6: Análises por WDS de clinopiroxênio das amostras PPE-6b (nefelina sienito médio-fino a fino) e PPE-8A (nefelina sienito médio-grosso a grosso). Diagramas mostrando a variação de número de cátions por cela unitária (cpfu) por ponto do perfil núcleo-borda dos cristais, (A) da amostra PPE-6b, (D) da PPE-8A. Imagens BSE-Compo com localização dos pontos analisados nos cristais, (B) da PPE-6b, (E) da PPE-8A. Fotomicrografia com luz plano-polarizada, (C) da PPE-6b, (F) da PPE-8A.	54
Figura 5-7: Diagrama Q-J (Q = Ca+Mg+Fe ²⁺ e J = 2Na) indicando as análises por WDS obtidas de clinopiroxênio dos enclaves microgranulares félsicos, da matriz dos aglomerados máficos destes enclaves e do dique fonolítico, classificando-os em variedades Quad, cálcico-sódicas e sódicas.	55
Figura 5-8: Diagramas ternários para o clinopiroxênio dos enclaves microgranulares félsicos, de seus aglomerados máficos e do dique fonolítico. (A) Diagrama Mg-Na-(Fe ²⁺ +Mn) e (B) Diagrama expresso em moléculas de WEF-Jd-Eg (wollastonita, enstatita e ferrossilita, jadeíta e egirina).	55
Figura 5-9: Análises por WDS de clinopiroxênio da amostra PPE-31 (enclave microgranular félsico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpfu por ponto do perfil núcleo-borda do cristal. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.	56
Figura 5-10: Diagrama Q-J (Q = Ca+Mg+Fe ²⁺ e J = 2Na) indicando as análises por WDS obtidas de clinopiroxênio dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos porfiríticos e dos máficos equigranulares, classificando-os em variedades Quad, cálcico-sódicas e sódicas.	56
Figura 5-11: Diagramas ternários para o clinopiroxênio dos enclaves microgranulares félsicos, de seus aglomerados máficos e do dique fonolítico. (A) Diagrama Mg-Na-(Fe ²⁺ +Mn) e (B) Diagrama expresso em moléculas de WEF-Jd-Eg (wollastonita, enstatita e ferrossilita, jadeíta e egirina).	57
Figura 5-12: Análises por WDS de clinopiroxênio das amostras PC-19 (enclave microgranular máfico-ultramáfico porfirítico) e PPE-5Bb (enclave microgranular máfico equigranular). Diagramas mostrando a variação de número de cpfu por ponto do perfil núcleo-borda dos cristais, (A) da amostra PC-19, (D) da PPE-5Bb. Imagens BSE-Compo com localização dos pontos analisados nos cristais, (B) da PC-19, (E) da PPE-5Bb. Fotomicrografia com luz plano-polarizada, (C) da PC-19, (F) da PPE-5Bb.	58
Figura 5-13: Análises por WDS de titanita da amostra PPE-8A (nefelina sienito médio-grosso a grosso). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpfu. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.	60
Figura 5-14: Análises por WDS de titanita da amostra PPE-7Aa (enclave microgranular máfico-ultramáfico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpfu. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.	61
Figura 5-15: Imagens BSE-Compo destacando a magnetita dos nefelina sienitos (A) grosso-médio a grosso (PPE-8A) e (B) médio-fino a fino (PPE-6b).	63
Figura 5-16: Diagrama ternário composicional dos minerais opacos dos nefelina sienitos, expresso em moléculas de TiO ₂ , FeO e Fe ₂ O ₃ .	63

Figura 5-17: (A) Diagrama ternário composicional dos minerais opacos dos enclaves microgranulares félsicos, expresso em moléculas de TiO_2 , FeO e Fe_2O_3 . (B) Imagem BSE-Compo da magnetita do enclave microgranular félsico (amostra PPE-31).	64
Figura 5-18: Imagens BSE-Compo com destaque para as magnetitas dos enclaves máfico-ultramáficos porfiríticos (amostras PC-19, PPE-7Aa e PPE-1Bg) e dos máficos equigranulares (amostra PPE-5Bb), (A) do contato do enclave com a encaixante (PPE-7Aa), (B) da matriz do enclave (PC-19), (C) opaco incluído no diopsídio com Ti (PPE-1Bg) e (D) da matriz do enclave (PPE-5Bb).	65
Figura 5-19: Diagrama ternário composicional dos minerais opacos dos enclaves microgranulares máfico-ultramáfico e máfico equigranular, expresso em moléculas de TiO_2 , FeO e Fe_2O_3 .	65
Figura 5-20: Diagrama Al-Fe-Mg para as biotitas presentes nos enclaves félsicos e máfico-ultramáficos.	66
Figura 5-21: Análises por WDS de clinopiroxênio da amostra PPE-31 (enclave microgranular félsico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.	68
Figura 5-22: Análises por WDS de biotita da amostra PPE-33 (enclave microgranular máfico-ultramáfico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.	68
Figura 5-23: Análises por WDS de apatita da amostra PPE-6b (nefelina sienito médio-fino a fino). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados.	69
Figura 5-24: Análises por WDS de apatita da amostra PPE-7Aa (enclave microgranular máfico-ultramáfico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.	70
Figura 5-25: Diagrama composicional ternário, expresso por moléculas de Ab-An-Or, dos feldspatos analisados.	71
Figura 5-26: Análises por WDS de feldspato alcalino da amostra PPE-31 (enclave microgranular félsico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados.	73
Figura 5-27: Análises por WDS de feldspato alcalino da amostra PPE-7Aa (enclave microgranular máfico-ultramáfico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados.	73
Figura 5-28: Análises por WDS de nefelina da amostra PPE-6b (nefelina sienito médio-fino a fino). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados.	75
Figura 5-29: Análises por WDS de nefelina da amostra PPE-31 (enclave microgranular félsico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.	76
Figura 5-30: Análises por WDS de nefelina da amostra PPE-1Bg (enclave microgranular máfico-ultramáfico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados.	77
Figura 5-31: Dados obtidos por LA-ICPMS para clinopiroxênio verde-oliva do nefelina sienito médio-grosso a grosso (amostra PPE-8A). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz refletida do cristal, com os pontos analisados destacados, (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal (lado maior das fotos = 3,2mm).	78
Figura 5-32: Dados obtidos para clinopiroxênio de núcleo róseo e borda verde-oliva do nefelina sienito médio-fino a fino (amostra PPE-6b). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz refletida do cristal, com os pontos analisados destacados, (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal (lado maior das fotos = 1,3mm).	79
Figura 5-33: Dados obtidos para clinopiroxênio de núcleo róseo e borda verde-oliva pleocroica do enclave microgranular félsico (amostra PPE-31). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz	

refletida do cristal, com os pontos analisados destacados, (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal (lado maior das fotos = 0,81mm).....	79
Figura 5-34: Dados obtidos para clinopiroxênio de núcleo róseo e borda verde do glomérulo máfico presente no enclave microgranular félsico (amostra PPE-31). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz refletida do cristal, com os pontos analisados destacados (lado maior da foto = 1,3mm), (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal (lado maior da foto = 0,81mm).....	80
Figura 5-35: Dados obtidos para macrocristal de clinopiroxênio de núcleo róseo/incolor e borda verde do enclave microgranular máfico-ultramáfico “porfirítico” (amostra PPE-22). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz refletida do cristal, com os pontos analisados destacados, (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal (lado maior das fotos = 2mm).....	81
Figura 5-36: Diagramas binários das médias das concentrações de elementos traços dos principais clinopiroxênios analisados, normalizados pelo condrito de Taylor & McLennan (1985). (A) Para os ETR e (B) para alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR. Cpx = clinopiroxênio.....	82
Figura 5-37: Média dos dados obtidos para titanita dos nefelina sienitos e do enclave microgranular máfico-ultramáfico. (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito de Taylor & McLennan (1985).....	83
Figura 5-38: Dados obtidos para apatita do nefelina sienito médio-fino a fino (amostra PPE-6b). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz refletida do cristal, com os pontos analisados destacados, (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal. A porção rosada que aparece na foto (D) é devida a marcações com caneta indelével vermelha no vidro da lâmina (lado maior das fotos = 0,26mm).....	84
Figura 5-39: Dados obtidos para apatita do enclave microgranular máfico-ultramáfico “porfirítico” (amostra PPE-32A). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal com os pontos analisados destacados (lado maior da foto = 0,65mm).....	84
Figura 5-40: Dados obtidos para apatita do enclave microgranular máfico-ultramáfico equigranular (amostra PPE-5B). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz refletida da apatita 1, com os pontos analisados destacados (lado maior da foto = 0,65mm), (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada da apatita 2, com os pontos analisados em destaque (lado maior da foto = 1,3mm).....	85
Figura 5-41: Diagramas binários das médias das concentrações de elementos traços apatitas analisadas, normalizadas pelo condrito de Taylor & McLennan (1985). (A) Para os ETR e (B) para alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR.	86
Figura 6-1: Diagrama classificatório TAS (Le Bas <i>et al.</i> , 1986), com amostras da Pedreira da Prefeitura.....	88
Figura 6-2: Diagrama classificatório $R_1 - R_2$ (De La Roche <i>et al.</i> , 1980) para as amostras de enclave microgranular máfico-ultramáfico.	88
Figura 6-3: Diagrama de classificação das rochas da Pedreira da Prefeitura, de acordo com seu grau de peralcalinidade (Shand, 1943).....	89
Figura 6-4: Diagrama de variação para MgO das amostras analisadas com exceção dos enclaves máfico-ultramáficos, utilizando sílica como índice de diferenciação. Valores estão em % em peso.	90
Figura 6-5: Diagramas de variação para TiO_2 e K_2O , das amostras analisadas, utilizando Índice de Diferenciação (soma de Q, Or, Ab, Ne, Ks e Lc normativos). Valores dos óxidos estão em % em peso.	90
Figura 6-6: Diagramas de variação para Zr, Zn, La e Th das amostras analisadas, utilizando Nb como índice. Valores estão em ppm.....	91

Figura 6-7: Diagramas de variação Th/U e Sr/Ba das amostras analisadas. Valores estão em ppm.	92
Figura 6-8: Diagrama multielementar para os elementos traços dos litotipos analisados, normalizados em relação ao Manto Primitivo de Sun & McDonough (1989).	93
Figura 6-9: Diagrama para os elementos terras-raras dos litotipos analisados, normalizados em relação ao condrito de Taylor & McLennan (1985).	93
Figura 6-10: Diagrama para os elementos terras-raras das rochas sílico-carbonatíticas da pedreira Minas Pedra (amostras PC-3.1, 3.2, 5.1, 11B e 11S) e dos enclaves máfico-ultramáficos deste trabalho (PPE-1B, 7A). Os dados normalizados pelo condrito de Taylor & McLennan (1985).	94
Figura 7-1: Diagramas ternários Na – Mg – Fe ²⁺ +Mn, mostrando as tendências composicionais do clinopiroxênio: (A) do nefelina sienito médio-grosso a grosso, (B) do nefelina sienito médio-fino a fino, (C) dos enclaves máfico-ultramáficos, (D) dos enclaves félsicos e (E) dos glomérulos máficos presentes no nefelina sienito fino e no enclave félsico.	97
Figura 7-2: Diagramas ternários expressos por Na – Mg – Fe ²⁺ +Mn mostrando (A) todos os pontos de análise (por WDS) dos cristais de clinopiroxênio deste trabalho; (B) Compilação de tendências composicionais de clinopiroxênio publicados, comparativamente à dos analisados neste trabalho (PC); adaptada de Larsen (1976) e Mitchell & Platt (1982).	97

Índice de Tabelas

Tabela 2-1: Relação das amostras coletadas na Pedreira da Prefeitura, separadas por etapas de campo realizadas.	6
Tabela 2-2: Padrões e tempo de contagem dos elementos químicos analisados por WDS.	9
Tabela 2-3: Resultados obtidos através do ICP-MS para os padrões analíticos, das rotinas 1 e 2, comparativamente aos recomendados. Valores em ppm.	18
Tabela 4-1: Análises modais (% em volume) de amostras típicas dos enclaves microgranulares e dos nefelina sienitos hospedeiros da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas (tr = traços; FA = Feldspato Alcalino; Nef = Nefelina; NeS = nefelina sienito).	29
Tabela 4-2: Ângulo de extinção dos clinopiroxênios (x ^{^c} na variedade fibrosa, z ^{^c} nas demais variedades) de enclaves microgranulares e rochas hospedeiras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas (Cpx = clinopiroxênio, NeS = nefelina sienito).	31
Tabela 5-1: Fórmulas gerais médias das nefelinas das amostras analisadas.	74

1 INTRODUÇÃO

Enclaves (*lato sensu*) de natureza e composições variadas ocorrem em muitas rochas magmáticas e o seu estudo tem se revelado de grande importância em petrologia ígnea. Enclaves podem representar fragmentos de segmentos do manto e/ou da crosta capturados durante a ascensão de magmas, resíduos sólidos da fusão de rochas-fonte transportados, acumulados de minerais de cristalização precoce, frações previamente cristalizadas de magmas primários ou híbridos coexistentes, autólitos ou ainda simples xenólitos capturados de rochas encaixantes circunvizinhas. Assim, o seu estudo é fundamental para a elaboração de quaisquer hipóteses sobre a gênese e a evolução das rochas que os contêm (e.g. Nixon, 1987; Didier & Barbarin, 1991; Dorais, 2003; Plá Cid *et al.*, 2003).

Em rochas alcalinas félsicas, enclaves microgranulares máfico-ultramáficos são descritos com maior frequência nos tipos de caráter vulcânico e ocasionalmente em variedades plutônicas, principalmente em tipos supersaturados (Dorais, 2003; Plá Cid *et al.*, 2003, 2005).

O nefelina sienito da Pedreira, principalmente na região norte do Maciço Alcalino Poços de Caldas (MG-SP), a nordeste da cidade homônima, contém dois grupos de enclaves microgranulares intrigantes. O primeiro grupo reúne enclaves félsicos arredondados, de dimensões centimétricas a decimétricas e granulação fina a fina-média; são em geral equigranulares e apresentam composição modal fonolítica (e.g. Ulbrich *et al.* 2002). Estes enclaves são conhecidos na literatura há muitos anos e em geral interpretados como possíveis autólitos (Ulbrich *et al.*, 1979; Ulbrich, 1983; Ulbrich, 1984). O segundo grupo, descritos pela primeira vez recentemente em trabalhos de campo do orientador e colegas, inclui enclaves mais angulosos, milimétricos a centimétricos, que apresentam em geral textura inequigranular fina a muito fina, frequentemente com aspecto porfirítico dado por macrocristais de clinopiroxênio e de composição modal máfica-ultramáfica, rica em clinopiroxênio. Estes enclaves ocorrem ora isolados, ora no interior dos enclaves fonolíticos, resultando em um aspecto de “enclaves duplos”.

A análise petrográfica dos megacristais de clinopiroxênio presentes nestes enclaves mostrou que correspondem opticamente a “titano-augita”, adicionalmente, análises químicas pontuais preliminares mostraram que são relativamente ricos em Ca, Mg e Ti. Merece ser destacado que Ulbrich (1983) em seu estudo detalhado sobre o quimismo dos piroxênios dos nefelina sienitos hospedeiros mostrou que estes apresentam núcleos “augíticos”, por vezes com aspecto corroído e bordas que gradam de egrina-augita a egrina. Por fim, vale a

pena destacar que a “titano-augita” está entre os minerais máficos mais típicos das rochas ultramáficas que afloram nas proximidades (e.g. Ulbrich *et al.*, 2005).

Rochas máfico-ultramáficas ocorrem especialmente no Vale do Quartel, região leste do maciço. Constituem tufos, lúpilli e brechas vulcânicas, classificadas como ankaratritos: rochas vulcânicas básicas/ultrabásicas nefelínicas (Ellert, 1959; Ulbrich & Ulbrich, 1992). Alguns destes tipos possuem matriz vítrea a criptocristalina com cristais maiores de clinopiroxênio idiomórfico, geminados ou zonados, em geral incolores ou pouco pleocroicos, com birrefringência anômala (Alves, 2003). Estes ankaratritos podem estar relacionados com a gênese dos enclaves máfico-ultramáficos encontrados nos nefelina sienitos da Pedreira.

Apesar da literatura abundante sobre o maciço, muitas questões ainda anseiam respostas, principalmente as que tratam da petrogênese e sequência de colocação das rochas ali presentes.

O objetivo desta dissertação é elucidar a petrogênese dos enclaves microgranulares félsicos e, principalmente, dos máfico-ultramáficos presentes no Maciço, bem como explorar a hipótese de coexistência e interação de magmas fonolíticos com ultrabásicos nesta área, com base em dados petrográficos, de química mineral e de rocha dos enclaves e da rocha hospedeira.

Esta dissertação complementou e agrupou os dados já obtidos pelas pesquisas iniciadas em 2006, pela mestranda e orientador, através dos projetos: de iniciação científica (FAPESP), intitulado “Evolução textural e mineralogia de enclaves microgranulares em nefelina sienitos da Pedreira da Prefeitura, Maciço Alcalino Poços de Caldas (MG-SP)”; e da Monografia de Trabalho de Formatura, intitulada “Petrografia e mineralogia de enclaves máfico-ultramáficos em nefelina sienitos da Pedreira da Prefeitura, Maciço Alcalino Poços de Caldas (MG-SP)”, apresentada para a obtenção do título de bacharel em geologia.

1.1 Localização e acessos

O Maciço Alcalino Poços de Caldas aflora na região limítrofe entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais, a cerca de 250 km da Cidade de São Paulo por acesso rodoviário. Ele é delimitado aproximadamente pelas cidades de Poços de Caldas (MG) a norte, Águas da Prata (SP) a oeste, Caldas (MG) a leste e Andradas (MG) a sul.

Para se chegar a Poços de Caldas a partir do Município de São Paulo, se segue pela rodovia SP-330 ou SP-348 (Rodovias Anhanguera e Bandeirantes, respectivamente) até o Município de Campinas, então pela rodovia SP-340 até Aguai, tornando em direção a Minas Gerais (leste) pela SP-344, passando por São João da Boa Vista, Águas da Prata e Cascata, até chegar a Poços de Caldas (Figura 1-1).

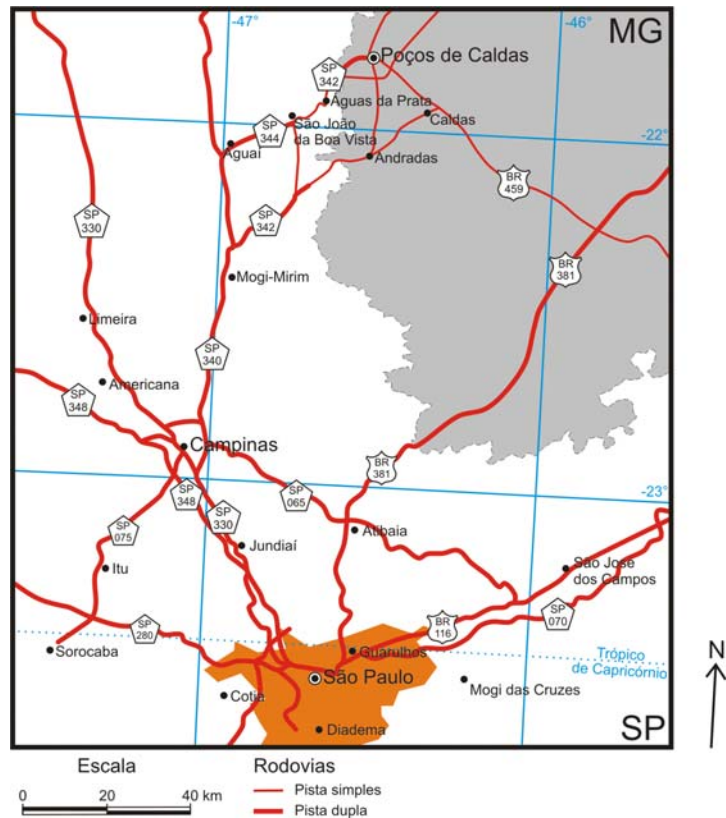


Figura 1-1: Mapa rodoviário entre São Paulo e Poços de Caldas, adaptado de ENGEMAP (2005).

A Pedreira da Prefeitura (ou Pedreira Municipal) localiza-se a nordeste do centro da cidade de Poços de Caldas. O acesso a esta pedreira é feito por ruas no interior do município: a partir da Av. Pres. Wenceslau Braz, contorna-se o trevo em direção a nordeste e se segue pela Estr. Alcifrino Leite Miranda até a pedreira. (Figura 1-2).

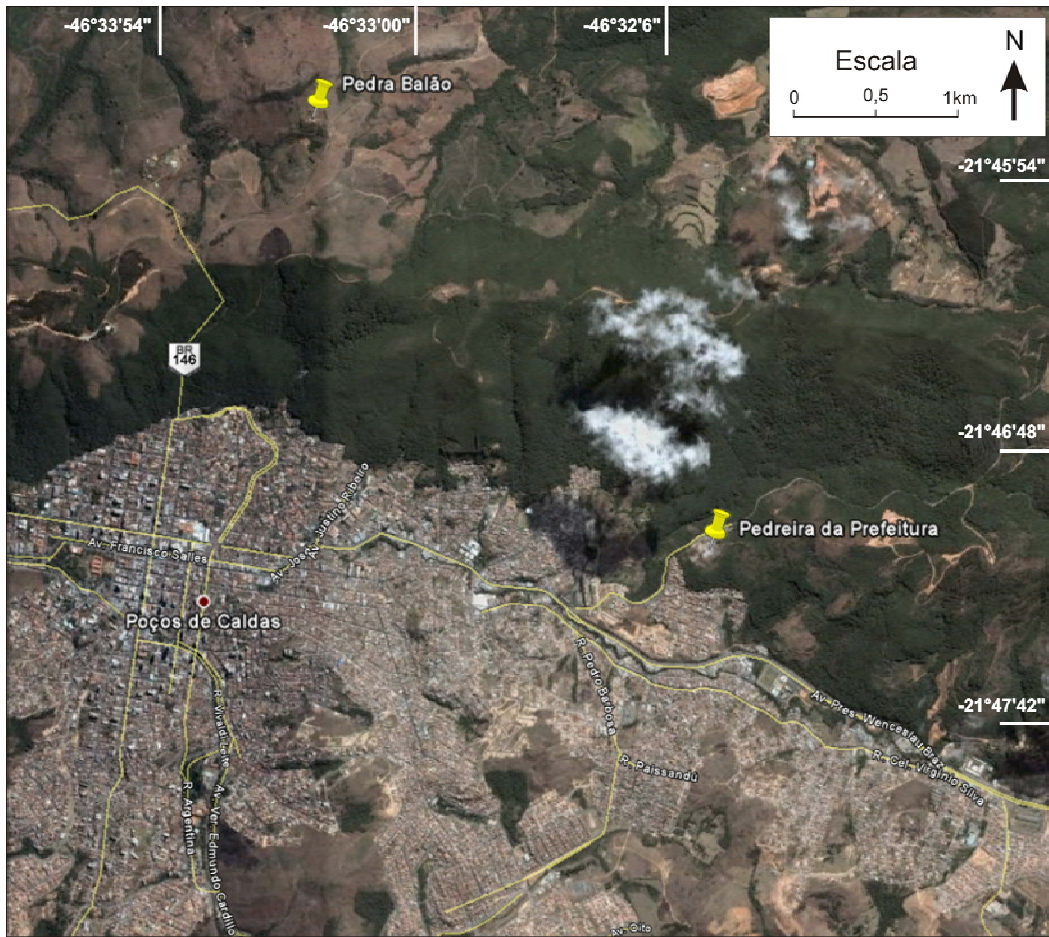


Figura 1-2: Imagem de satélite de parte da cidade de Poços de Caldas e arredores, com localização da Pedreira da Prefeitura. Adaptado de Google Earth (imagens de 15/Ago/2007).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a obtenção e tratamento dos dados deste trabalho foram feitas atividades de campo, laboratoriais e de gabinete, além dos estudos bibliográficos, como detalhadas a seguir.

2.1 Atividades de campo

Trabalho de campo com duração de um dia foi realizado na Pedreira da Prefeitura (Pedreira Municipal) de Poços de Caldas, no início de Setembro de 2007, com o intuito de complementar a coleção de amostras obtidas nos trabalhos anteriores. Durante o Trabalho de Formatura, foram feitas descrições detalhadas em todo o corte da pedreira, das rochas encaixantes e dos enclaves amostrados na ocasião. Nesta última atividade de campo, a amostragem e descrição dos litotipos coletados foram enfatizadas.

Durante o presente trabalho, foram coletadas 21 amostras, distribuídas em 16 locais de amostragem, representativas das principais variedades de nefelina sienitos, dos enclaves microgranulares félsicos e máficos e dos diques fonolíticos. Para a amostragem de alguns enclaves máficos de difícil acesso, foi utilizada uma motosserra adaptada com perfuratriz. A localização das amostras é apresentada no Anexo I. As amostras coletadas foram identificadas com o prefixo PPE (Pedreira da Prefeitura, Enclaves) seguido de um número indicador do local de amostragem (*e.g.* PPE-1). Nos locais em que foram coletadas mais de uma amostra, utilizou-se uma letra maiúscula para distinguí-las (*e.g.* PPE-1A, PPE-1B) (Tabela 2-1 e ver também ANEXO I).

Tabela 2-1: Relação das amostras coletadas na Pedreira da Prefeitura, separadas por etapas de campo realizadas.

AMOSTRAS COLETADAS - PEDREIRA DA PREFEITURA			
Etapa de Campo JUN/2006		Etapa de Campo SET/2007	
Amostra	Descrição	Amostra	Descrição
PPE-01 A, B	nefelina sienito grosso com enclave "duplo"	PPE-21	Dique fonolítico
PPE-02 A, B	nefelina sienito grosso com enclave máfico-ultramáfico	PPE-22 A, B	Nefelina sienito fino com enclave máfico-ultramáfico
PPE-03	nefelina sienito grosso com enclave félsico	PPE-23	Nefelina sienito fino com enclave máfico-ultramáfico
PPE-04 A, B	Nefelina sienito grosso	PPE-24	Nefelina sienito fino com enclave máfico-ultramáfico
PPE-05 A, B	Nefelina sienito fino com enclave máfico equigranular	PPE-25	Nefelina sienito fino com enclave máfico-ultramáfico
PPE-06	Nefelina sienito fino com venulações	PPE-26	Nefelina sienito fino com enclave máfico-ultramáfico
PPE-07 A, B	Nefelina sienito fino com enclave máfico-ultramáfico	PPE-27 A, B	Nefelina sienito fino
PPE-08 A, B, C, D, E	nefelina sienito grosso em contato com dique fonolítico	PPE-28 A, B	Nefelina sienito fino
PPE-09	Dique fonolítico	PPE-29	Nefelina sienito grosso
PPE-12	Nefelina sienito grosso	PPE-31	Enclave félsico
PPE-13	Nefelina sienito grosso	PPE-32 A, B	Nefelina sienito fino com enclave máfico-ultramáfico
PPE-14	Nefelina sienito grosso	PPE-33	Nefelina sienito fino com enclave máfico-ultramáfico
PPE-15	nefelina sienito grosso	PPE-34	Nefelina sienito fino
PPE-16	Nefelina sienito grosso com enclave félsico	PPE-35	Nefelina sienito fino
		PPE-36 A, B	Nefelina sienito fino
		PPE-37	Nefelina sienito fino ou Dique fonolítico

2.2 Atividades de laboratório

As atividades de laboratório incluíram, em uma primeira etapa, a organização da coleção de amostras obtidas, bem como descrições petrográficas macroscópicas das amostras, com o objetivo do reconhecimento criterioso da litologia.

A seguir foi efetuada a seleção de amostras representativas para estudos de química de rocha, química mineral e petrografia microscópica. Os dados petrográficos e os de química mineral obtidos por microsonda eletrônica foram utilizados para complementar os já obtidos no Trabalho de Formatura.

Para a distinção das seções polidas obtidas de uma mesma amostra foi acrescentada uma letra minúscula (*e.g.* PPE-1Aa, PPE-1Ab) à nomenclatura de campo adotada.

2.2.1 Petrografia

As descrições petrográficas principais e estimativas modais, obtidas visualmente através das seções delgadas polidas mais típicas, foram realizadas no Laboratório de Microscopia Petrográfica do Departamento de Mineralogia e Geotectônica (GMG) do Instituto de Geociências (IGc) da USP, durante o Trabalho de Formatura. No trabalho atual, as descrições limitaram-se à complementação dos dados petrográficos dos enclaves e detalhamento da mineralogia. Para tal foi utilizado o microscópio petrográfico ZEISS Axioplan™ sob luz transmitida, para reconhecimento dos minerais transparentes, e sob luz refletida, para minerais opacos, aplicando-se as técnicas clássicas de petrografia microscópica (*e.g.* Mackenzie *et al.*, 1995).

A distinção entre nefelina e feldspato alcalino nas rochas de granulação mais fina e na matriz dos enclaves foi efetuada considerando-se particularmente o hábito cristalino (a nefelina apresenta seções tipicamente quadráticas ou retangulares ao longo do eixo *c*, enquanto o feldspato aparece tabular ou ripiforme), os contrastes de relevo (a nefelina possui índices de refração mais altos) e, em parte, as cores de máxima interferência (nefelina apresenta cores comparativamente inferiores). A análise detalhada dos piroxênios ao microscópio revelou diferentes gerações texturais, caracterizadas por propriedades ópticas próprias. O ângulo de extinção α_c (α_z no caso da egirina) dos ciferente cristais foi medido em cortes paralelos a (010), de máxima birrefringência. Magnetita foi reconhecida sob luz refletida.

A etapa seguinte consistiu na escolha de alguns cristais representativos das principais fases minerais para posterior análise química.

As características mineralógicas, microestruturais e texturais mais típicas encontradas nas seções, além dos cristais escolhidos para análise em microsonda, foram documentadas através de imagens digitais obtidas com câmera fotográfica digital

Olympus™ C-5050Z de 5.0 mega-pixels de resolução, acoplada ao microscópio petrográfico Olympus™ BXP-50 ou, para fotografias sob luz refletida, ao ZEISS Axioplan™.

2.2.2 *Química mineral*

2.2.2.1 Microsonda eletrônica

Durante o Trabalho de Formatura, foram analisadas, através da microsonda eletrônica, 6 seções delgadas polidas, compreendendo 4 amostras de enclaves máfico-ultramáficos e 2 dos nefelina sienitos típicos. Os dados obtidos no atual projeto visam complementar os resultados já adquiridos, acrescentando na rotina minerais como biotita-flogopita e apatita.

No trabalho atual, foram selecionadas seções delgadas polidas de 09 amostras, dentre as descritas petrograficamente, para estas análises, compreendendo 03 enclaves máficos, 02 enclaves félsicos, 02 diques fonolíticos, 01 nefelina sienito fino e 01 nefelina sienito grosso. Estas seções foram previamente capeadas por uma fina película de carbono (ca. 250 nm) com evaporador Edwards™ Auto 306. Os cristais previamente escolhidos foram devidamente imageados e analisados, dentre eles clinopiroxênio, magnetita, titanita, nefelina, feldspato alcalino e apatita. Foi dada ênfase ao estudo do clinopiroxênio, particularmente para definir o seu marcado zoneamento composicional.

As análises das composições químicas de minerais e suas variações foram realizadas no Laboratório de Microsonda Eletrônica do GMG (IGc-USP), com a microsonda Jeol™ JXA-8600S e sistema de automação da Noran Instruments™ Voyager 3.6.1. Estas análises incluíram imageamento de elétrons retroespalhados em modo composicional (BSE-Compo), análises químicas pontuais qualitativas com espectrometria de dispersão de energia (EDS) e, finalmente, quantitativas com espectrometria de dispersão de comprimentos de onda (WDS) dos cristais selecionados. As correções para os efeitos de matriz (absorção e número atômicos e fluorescência secundária), bem como conversões para óxidos foram efetuadas automaticamente com o programa PROZA (Bastin & Heijligers 1990).

As imagens eletrônicas BSE-Compo e ópticas (obtidas ao microscópio), foram utilizadas como referencial para as análises pontuais quantitativas, uma vez que essas permitem o fácil reconhecimento das principais microestruturas dos cristais (fraturas, alterações, etc.) e aquelas denotam claramente o seu zoneamento composicional, marcado em um caso por contrastes no número atômico médio e, no outro, por variações nas cores de pleocroísmo. As imagens eletrônicas foram também utilizadas para diferenciar cristais de feldspato alcalino e nefelina, nos casos de difícil distinção ao microscópio petrográfico.

As configurações analíticas empregadas para imagens BSE-Compo e análises EDS foram de 15 KeV para a voltagem de aceleração, 20 nA para a corrente e 5 µm de diâmetro

para o feixe eletrônico. Nas análises quantitativas por WDS, o diâmetro do feixe eletrônico foi variável, entre 5 e 10 μm , no caso de nefelina e feldspato alcalino, respectivamente. As rotinas analíticas empregadas foram as disponíveis no laboratório: linhas espectrais, cristais analisadores, padrões e tempos totais de integração de contagem, igualmente repartidos entre pico e “background” são sumarizados para cada mineral analisado na Tabela 2-2.

Tabela 2-2: Padrões e tempo de contagem dos elementos químicos analisados por WDS.

Linha	Cristal	Padrões						t (s)
		Clinopiroxênio	Magnetita/ Ilmenita	Titanita	Feldspato/ Nefelina	Biotita- Flogopita	Apatita	
Si K α	TAP	wollastonita	wollastonita	wollastonita	microclínio	wollastonita	wollastonita	5-20
Ti K α	LiF	rutilo	rutilo	rutilo	rutilo	TiO ₂	---	10-30
Al K α	TAP	hornblenda	anortita	anortita	anortita	anortita	---	10-20
Fe K α	LiF	olivina	ilmenita	olivina	olivina	olivina	olivina	5-20
Cr K α	LiF	Cr ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	---	---	---	---	50
Mn K α	LiF	olivina	olivina	olivina	olivina	olivina	olivina	20-30
Mg K α	TAP	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	diopsídio	20-30
Ca K α	PET	wollastonita	wollastonita	wollastonita	anortita	wollastonita	apatita	10
Na K α	TAP	albita	---	albita	albita	albita	albita	5-20
K K α	PET	microclínio	---	---	microclínio	albita	---	10
Zn K α	LiF	ZnO	ZnO	---	---	---	---	50
Zr L α	PET	zircão	---	zircão	---	---	zircônio sintético	40
Ni K α	LiF	---	NiO	---	---	---	---	50
Nb L α	PET	---	Nb metálico	Nb metálico	---	---	---	40-50
La L α	LiF	---	---	ree3	---	---	ree3	50
Ce L α	LiF	---	---	ree3	---	---	ree3	20-40
Nd L β	LiF	---	---	ree2	---	---	ree2	40-50
Sm L β	LiF	---	---	ree1	---	---	ree2	40-50
Gd L β	LiF	---	---	ree1	---	---	ree1	60
Pr L β	---	---	---	---	---	---	ree3	50
Th M α	---	---	---	---	---	---	ThO ₂	60
U M β	---	---	---	---	---	---	UO ₂	40
F K α	---	---	---	A 408	---	A 408	A 408	5
P K α	---	---	---	---	---	---	apatita	5
Cl K α	---	---	---	---	---	cloro-apatita	cloro-apatita	10
Dy L β	---	---	---	---	---	---	ree4	50
Y L α	PET	---	---	YAG	---	---	YAG	40
Ba L α	LiF	---	---	---	barita	BaSi	---	50
Sr L α	PET	---	---	---	SrAn	---	SrAn	50

2.2.2.2 Ablação a Laser – ICPMS

As análises pontuais das composições químicas de minerais feitas por LA-ICPMS foram realizadas após a etapa de microsonda eletrônica, por se tratar de um método destrutivo.

Para análises por LA-ICPMS, foram feitas lâminas delgada-polidas com espessura de 60 a 80µm. A maior espessura da lâmina, comparativamente às feitas para petrografia, é importante para se obter maior tempo de análise com a ablação do laser. Para estas análises, foram selecionados cristais de titanita, apatita e clinopiroxênio mais típicos, previamente analisados por microsonda eletrônica, dos nefelina sienitos, dos enclaves máfico-ultramáficos e dos félsicos.

Estas análises foram realizadas no Laboratório de Química e ICP-AES/MS do GMG – IGc/USP. Para tal, foi utilizado o ICP-MS da *Perkin Elmer/Sciex™*, modelo Elan 6100DRC (quadrupolo) acoplado ao sistema de ablação a laser da *New Wave™*, modelo UP-213. Este sistema de ablação possui laser com cristal Y(Nd)AG, com luz de 213 nm de amplitude e pulso de 5 ns. A frequência do laser e o tamanho do *spot* variaram de acordo com o tamanho e potencial de ablação dos cristais analisados. A taxa de formação de óxido diário foi controlada pela formação de ThO, mantida menor do que 1%. O protocolo analítico utilizado no laboratório para elementos menores e traços é uma adaptação de Gao *et al.* (2002). O tempo total de cada análise foi 120s, igualmente repartido entre leitura de branco (intensidades de fundo considerando o fluxo de gases na cela) e de amostra. Foram analisados 39 elementos, com tempo de integração de sinal e *dwell time* constantes, de 2241ms e 8,3ms respectivamente.

Os padrões de controle utilizados foram: BCR-2G (basalto da USGS, EUA) e SRM-610 (vidro sintético da NIST, EUA). O SRM-612 (vidro sintético da NIST, EUA), foi utilizado somente em uma rotina, juntamente com os dois padrões citados anteriormente. O padrão de referência utilizado, na maioria dos casos, foi o BHVO-2G (basalto da USGS, EUA).

Como padrão interno das análises foi utilizada a concentração de CaO (% em peso), que no caso das amostras foi anteriormente obtida em análises de microsonda eletrônica. Para o clinopiroxênio foi utilizado um *spot* de 40µm, com frequência 10Hz e para apatita e titanita foi utilizado um *spot* de 25µm, com frequência 5Hz, todos os casos com potência em 70%.

Para a normalização dos resultados foram utilizados os valores condríticos de Taylor & McLennan (1985). A necessidade de correções fica clara pela comparação entre os valores medidos e os recomendados para o padrão BCR-2G (ver Figura 2-1). Observa-se que há maior coerência de resultados para os elementos terras raras mais leves (La, Ce, Pr, Nd). A rotina para clinopiroxênio da lâmina PPE-8A apresentou os resultados mais coerentes para os ETR do padrão BCR.

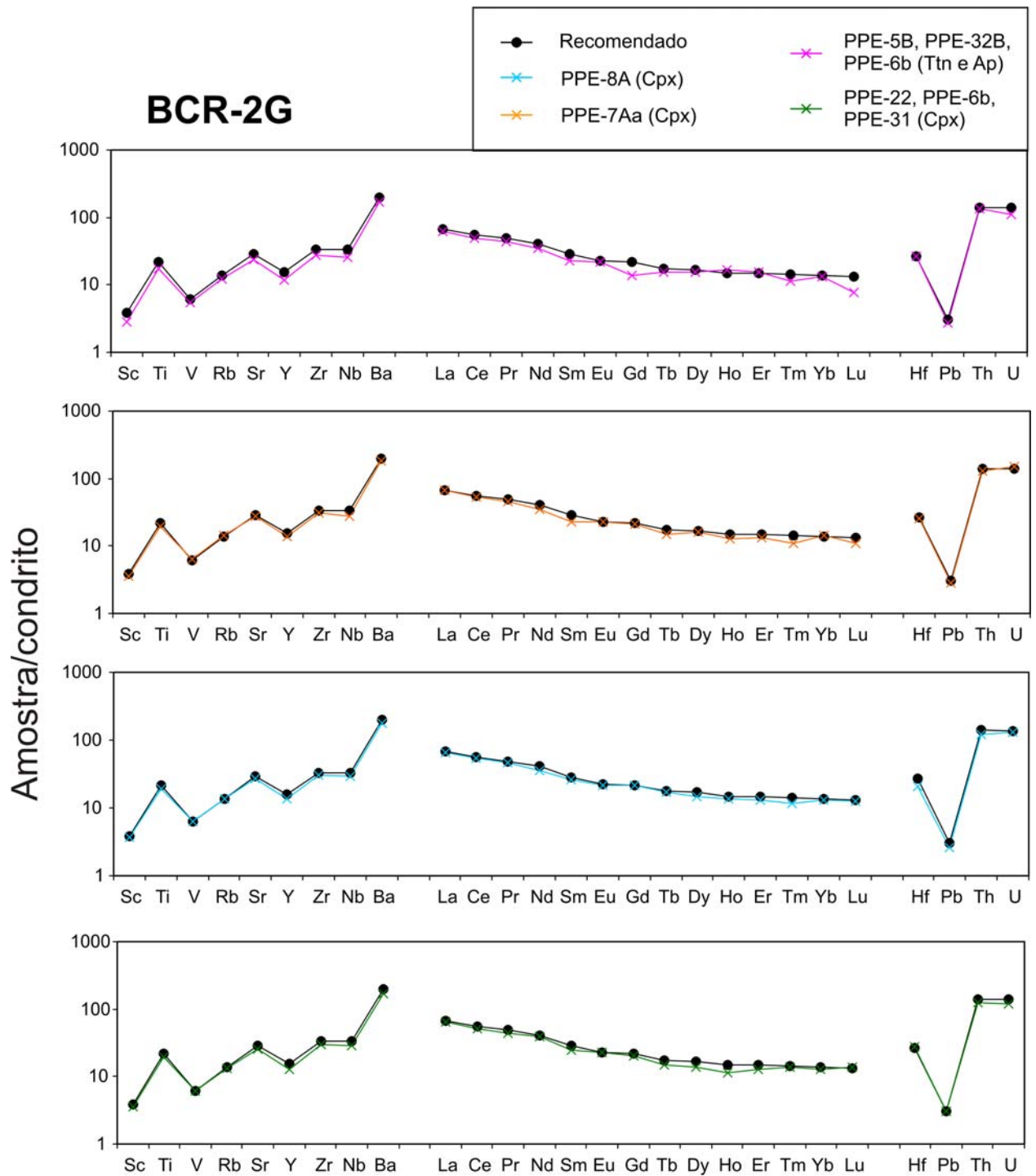


Figura 2-1: Diagrama multielementar para cada rotina realizada para o padrão BCR-2G, comparando-os com os recomendados, normalizados pelo condrito (Taylor & McLennan, 1985).

O vidro sintético NIST SRM-610, por sua vez, apresentou uma ótima correlação com o recomendado, para todas as rotinas (Figura 2-2).

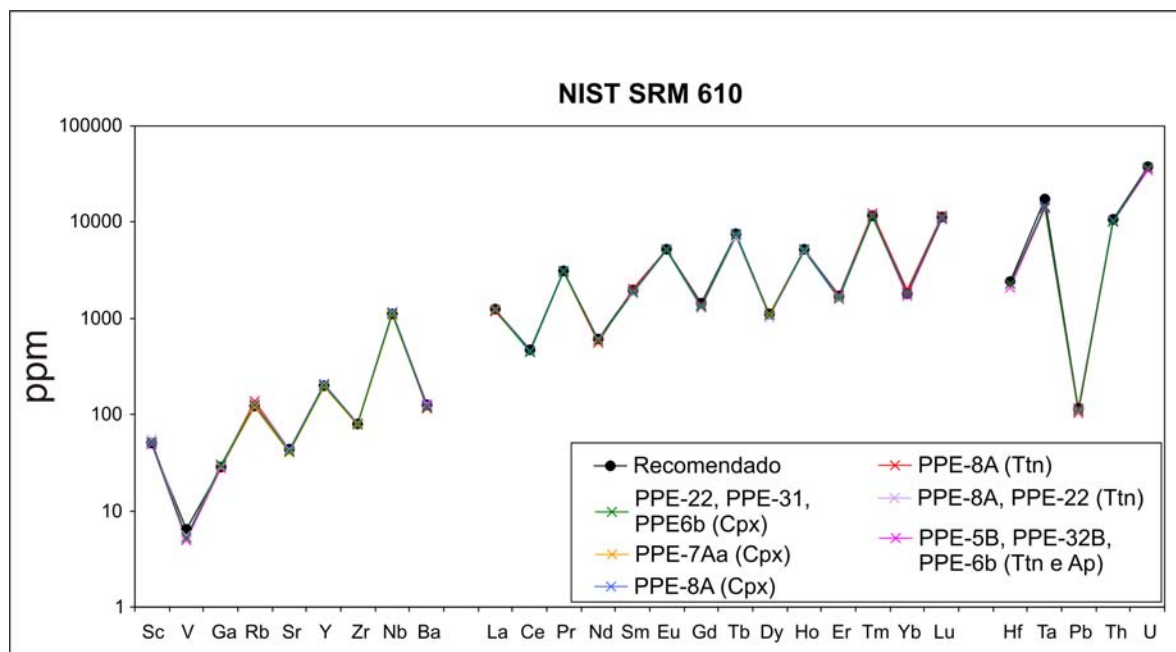


Figura 2-2: Diagrama multielementar para cada rotina realizada para o padrão NISTSRM 610, comparando-os com os recomendados.

2.2.3 Química de rocha

2.2.3.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

Excepcionalmente, 04 amostras (02 do nefelina sienito fino e 02 do grosso) foram analisadas anteriormente para a disciplina *GMG-5861 – Técnicas analíticas de materiais geológicos: FRX, ICP-AES, ICP-MS*, cursada no 1º semestre de 2007. Estas amostras seguiram o mesmo padrão de preparação das selecionadas posteriormente, como é descrito adiante.

Foram selecionadas mais 09 amostras para as análises de química de rocha por FRX, compreendendo 01 amostra do nefelina sienito grosso, 02 do nefelina sienito fino, 02 dos enclaves félsicos, 02 dos máficos e 02 do dique fonolítico. As amostras foram preparadas no Laboratório de Tratamento de Amostras (LTA, GMG-IGc/USP).

Para que o pó das amostras representasse a composição da rocha, o tamanho da granulação foi levado em consideração. Sendo assim, foram selecionadas amostras maiores do nefelina sienito grosso e menores do mais fino.

A redução da granulometria das amostras foi feita seguindo as etapas:

- as amostras foram quebradas em pedaços menores (ca. 3 cm) com marreta;
- cada amostra foi lavada separadamente utilizando-se ultrassom;
- após a secagem o material alterado foi separado do não alterado;
- para fragmentar a rocha em grânulos, foi utilizada a prensa hidráulica. Nesta etapa, parte do material alterado também foi fragmentada, com o intuito de ser usada para ambientação do moinho;

- quarteamento das amostras;
- a moagem foi feita no moinho de anéis de ágata;

Para a confecção das pastilhas prensadas, foram micronizados de 7,5 a 8,0g de amostra. A secagem foi feita na estufa. Com 7,5g de amostra, homogeneizada manualmente com 20% de ligante em pó (parafina), foram prensadas as pastilhas e enviadas ao Laboratório de FRX (GMG-IGc/USP).

A preparação das pastilhas fundidas foi feita no Laboratório de Química do GMG-IGc/USP, através da fusão de 1,0 g de amostra moída, para 9,0 g de tetraborato de lítio (75%) e metaborato de lítio (25%), durante aproximadamente 20 minutos. Após o resfriamento (ca. 10 minutos) as pastilhas foram enviadas ao Laboratório de FRX.

O padrão de controle utilizado para a rotina foi o JB-1a (basalto da GSJ, Japão). Os valores de F, Pb, S, Th e U recomendados para o padrão JB-1a estão muito próximos ou abaixo do limite de detecção do equipamento utilizado neste projeto, ou seja, não há controle da qualidade dos resultados para estes elementos. Os elementos Cl, F e S não foram analisados na rotina de 2008. Na Figura 2-3 é possível observar que os resultados dos óxidos obtidos para o padrão JB-1a estão dentro do erro aceitável para todas as rotinas empregadas. Enquanto que os elementos traços possuem erros maiores. Os elementos que apresentam erros maiores do que os aceitáveis são: Ba e Cl para a rotina da disciplina; Ba, Cl e V para a rotina de 2007 e; Ce e La para a rotina de 2008.

Para um controle da reprodutibilidade dos dados, em 2007 foi feita uma duplicata e em 2008 uma amostra já analisada em 2007 foi analisada novamente (Figuras 2-3 e 2-4).

Através da comparação dos dados da Figura 2-4 tem-se que há uma ótima correlação dos óxidos obtidos pela duplicata de 2007, com erros mínimos de análise. Já dentre os elementos traços, somente o F possui valor mais discrepante, porém como já descrito anteriormente, este elemento não tem controle de qualidade do resultado pois o valor recomendado para o padrão utilizado (JB-1a) é inferior ao limite de detecção do aparelho. O que nos indica, então, uma ótima reprodutibilidade dos dados. O mesmo resultado observa-se na Figura 2-5, porém em 2008 não foram analisados os elementos F, Cl e S. O único erro acima do aceitável, destas análises, é o do Ce.

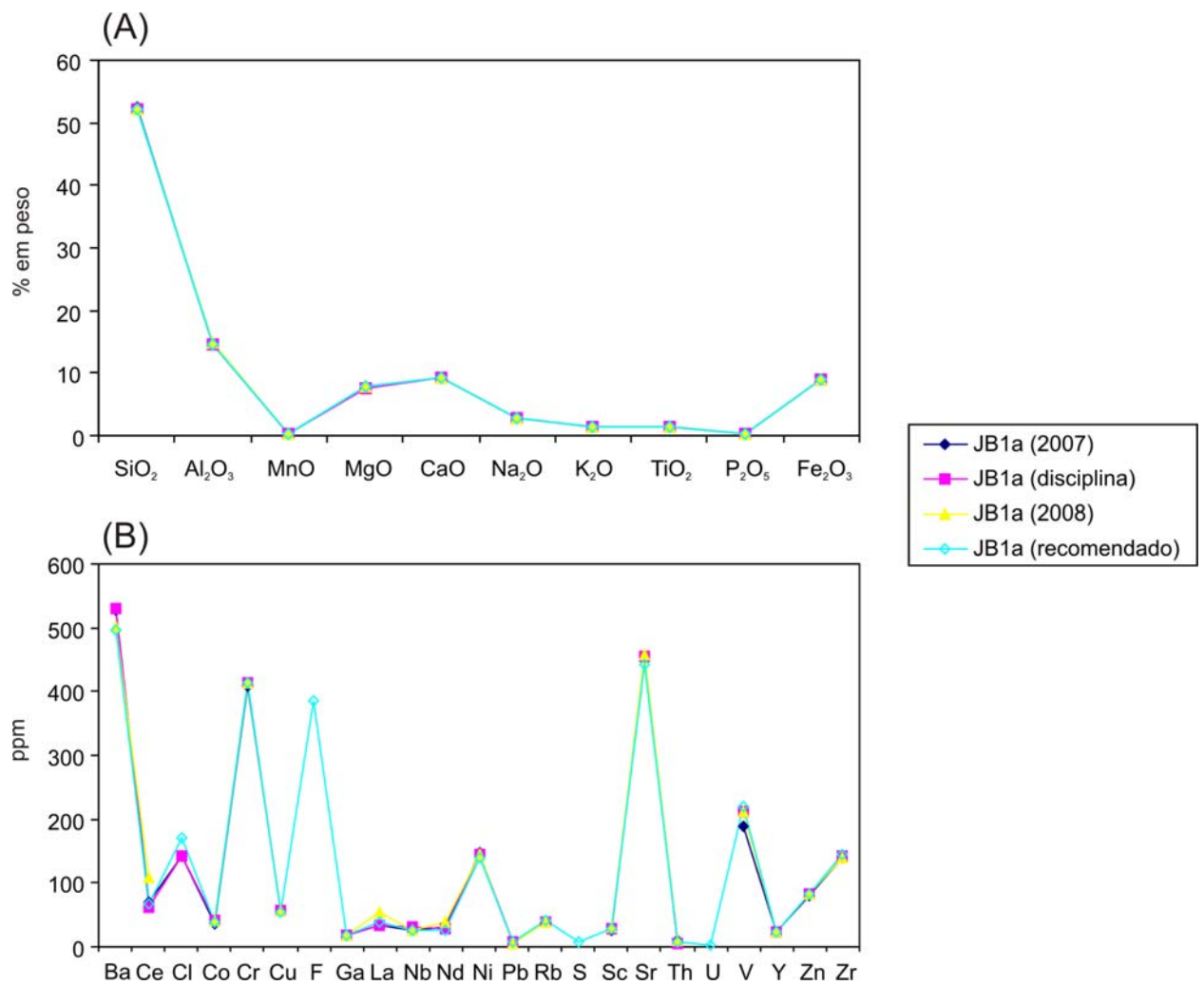


Figura 2-3: Resultados do padrão JB-1a analisado em todas as rotinas de FRX, comparando-os com os resultados recomendados, (A) para os elementos maiores e menores (% em peso de óxido); (B) para os elementos traços (ppm).

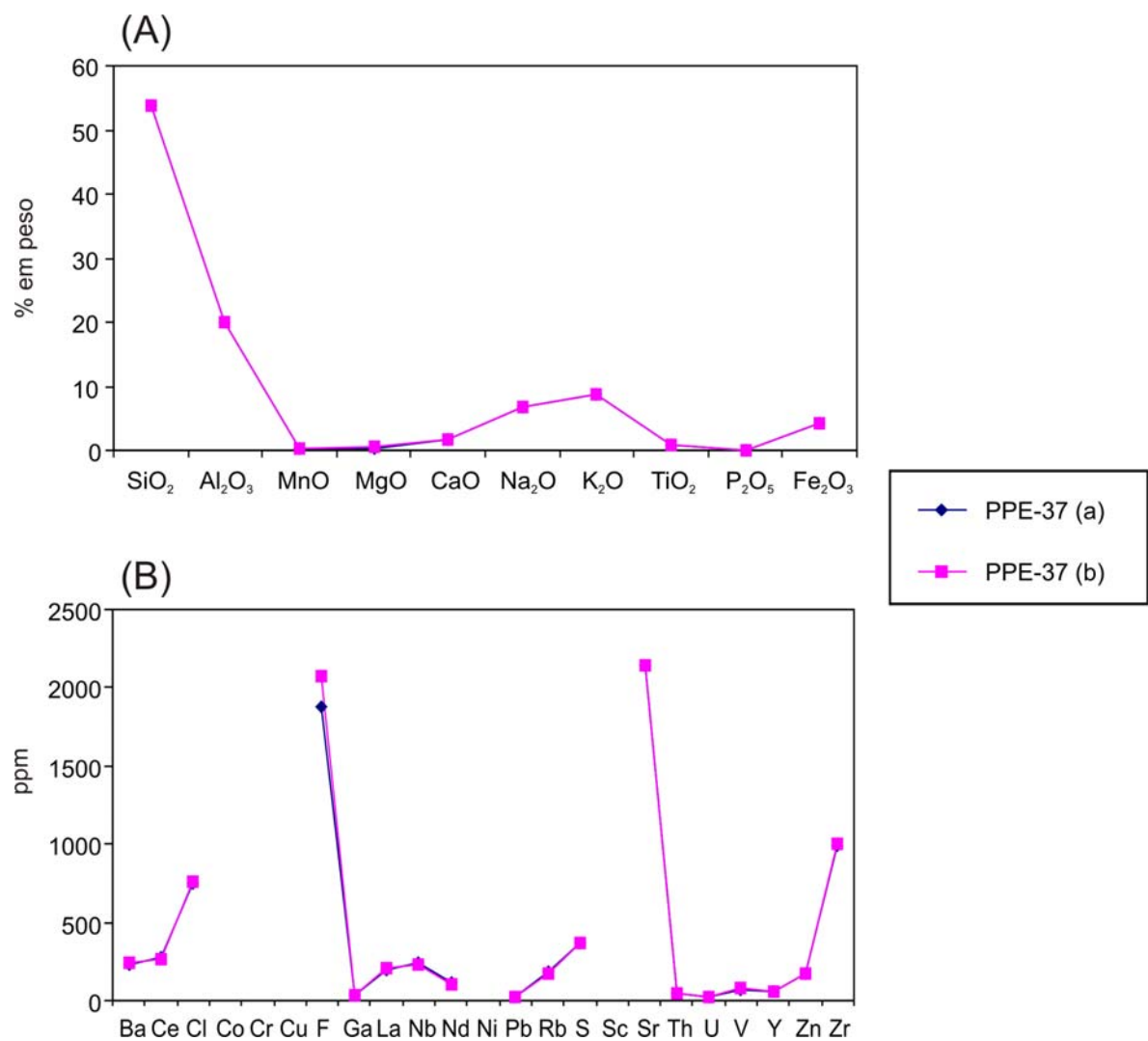


Figura 2-4: Gráfico comparativo da duplicata realizada em 2007. A amostra PPE-37 é de dique fonolítico, (A) dos elementos maiores e menores (% em peso de óxido); (B) dos elementos traços (ppm).

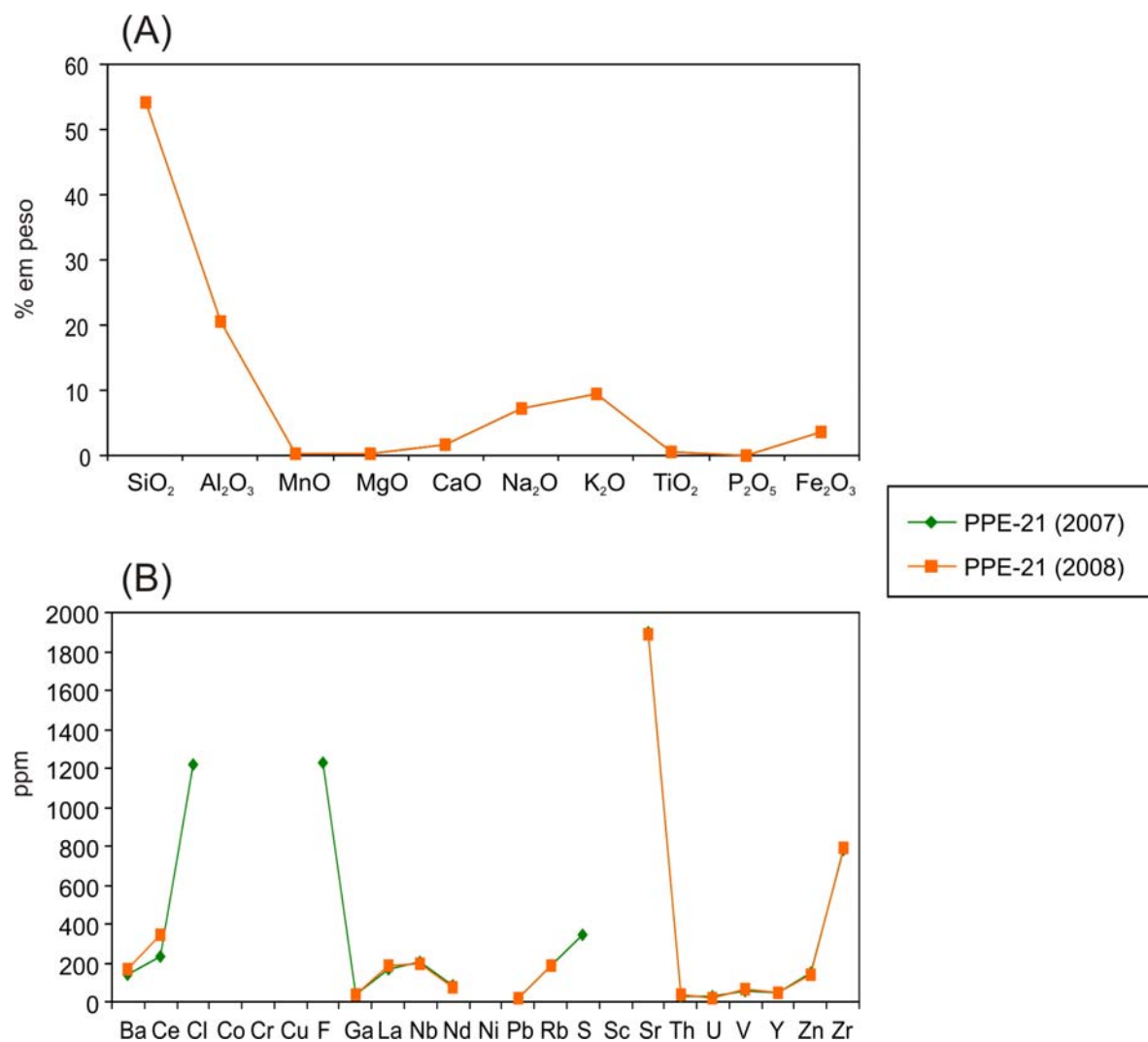


Figura 2-5: Gráfico comparativo entre a análise realizada em 2007 e a em 2008 da amostra PPE-21, dique fonolítico, (A) dos elementos maiores e menores (% em peso de óxido); (B) dos elementos traços (ppm).

2.2.3.2 Espectrometria de Massas com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS)

Para as análises de química de rocha por ICP-MS, foram selecionadas 14 amostras dentre as anteriormente analisadas por FRX (com exceção da amostra PPE-28A, nefelina sienito fino), compreendendo 03 amostras do nefelina sienito grosso, 05 do nefelina sienito fino, 02 dos enclaves máficos, 02 dos félsicos e 02 de diques fonolíticos. A preparação do pó destas amostras foi realizada previamente para as análises por FRX, enquanto o ataque ácido e as análises por ICP-MS foram realizados no Laboratório de Química do IGc-USP segundo o método de Navarro (2004). Os resultados foram obtidos a partir do ICP-MS da *Perkin Elmer/Sciex™*, modelo ELAN 6100DCR (quadrupolo) com nebulizador do tipo Meinhard.

Foram realizadas duas rotinas distintas para estas análises, portanto a qualidade dos dados obtidos será discutida separadamente para cada uma delas. Os padrões utilizados foram o JG-3 (granito) e o JR-1 (riolito) ambos material de referência do GSJ (Japão).

Na Rotina 1, utilizada para as amostras PPE-31, 7A, 27B, 5A, 13, 5B e 14 há uma pequena discrepância de resultados para o Rb do padrão JG-3. Na Rotina 2 (amostras PPE-1B, 21, 3, 12, 37, 28A e 36A) não se observa variações significativas entre valores recomendados e os obtidos para os padrões.

Em relação aos ETR, os resultados obtidos têm ótima correlação aos recomendados, como observado na Figura 2-6.

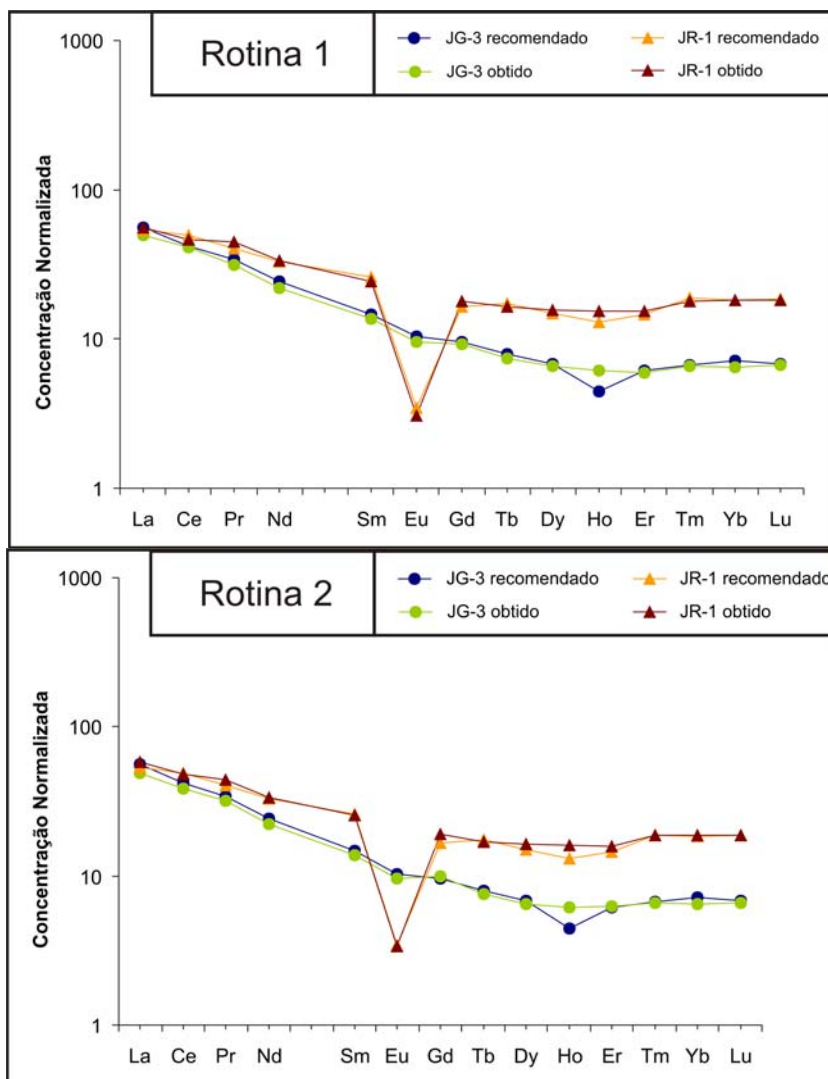


Figura 2-6: Diagramas multielementares das rotinas 1 e 2 por ICP-MS, para os padrões JG-3 e JR-1, comparando-os com os recomendados, normalizados pelo condrito (Taylor & McLennan, 1985).

Tabela 2-3: Resultados obtidos através do ICP-MS para os padrões analíticos, das rotinas 1 e 2, comparativamente aos recomendados. Valores em ppm.

ICP-MS - QUALIDADE ANALÍTICA								
elemento	JG-3			JR-1			branco	
	rotina 1	rotina 2	recom.	rotina 1	rotina 2	recom.	rotina 1	rotina 2
Rb	56,9	61,3	67,3	233	257	257	0,03	0,02
Sr	355	367	379	28,4	29,4	29,1	0,23	0,12
Y	16,2	17,0	17,3	40,9	43,7	45,1	<0,01	<0,01
Zr	156	166	144	94,8	97,3	99,9	<0,03	<0,03
Nb	5,87	5,80	5,88	15,9	15,4	15,2	0,11	0,01
Cs	1,83	1,75	1,78	18,8	19,5	20,8	<0,01	<0,01
Ba	452	468	466	42,5	48,4	50,3	<0,5	<0,5
La	18,1	18,1	20,6	20,4	21,4	19,7	0,04	0,03
Ce	39,2	36,9	40,3	44,3	46,2	47,2	0,03	0,01
Pr	4,33	4,40	4,7	6,11	6,04	5,58	<0,01	<0,01
Nd	15,7	15,8	17,2	23,8	23,8	23,3	<0,08	<0,08
Sm	3,16	3,20	3,39	5,64	5,91	6,03	<0,01	<0,01
Eu	0,83	0,83	0,9	0,27	0,29	0,3	<0,01	<0,01
Gd	2,84	3,03	2,92	5,49	5,81	5,06	<0,01	<0,01
Tb	0,43	0,44	0,46	0,96	0,98	1,01	<0,01	<0,01
Dy	2,49	2,49	2,59	5,91	6,23	5,69	<0,01	<0,01
Ho	0,52	0,52	0,38	1,30	1,38	1,11	<0,01	<0,01
Er	1,48	1,57	1,52	3,85	3,95	3,61	<0,01	<0,01
Tm	0,23	0,23	0,24	0,64	0,67	0,67	<0,01	<0,01
Yb	1,62	1,60	1,77	4,50	4,67	4,55	<0,01	<0,01
Lu	0,25	0,25	0,26	0,69	0,71	0,71	<0,01	<0,01
Hf	4,34	4,38	4,29	4,83	5,00	4,51	<0,01	<0,01
Pb	10,3	10,5	11,7	18,4	18,6	19,3	<0,01	<0,01
Th	7,86	7,59	8,28	29,0	28,7	26,7	<0,01	<0,01
U	2,13	2,16	2,21	8,97	9,13	8,88	<0,01	<0,01

2.3 Atividades de gabinete

Atividades de gabinete compreenderam principalmente o tratamento das imagens e dos dados químicos obtidos no Laboratório de Microsonda Eletrônica.

As imagens obtidas, tanto as BSE-Compo como as ópticas, foram analisadas e tratadas com softwares comerciais (CoreIDRAW® Graphics Suite 12.0 e Adobe™ Photoshop™ CS2) para ressaltar as características microestruturais, texturais e composicionais típicas.

O tratamento dos dados analíticos quantitativos de quimismo mineral obtidos por microsonda (conversões para cátions, obtenção das fórmulas estruturais e representação gráfica das variações composicionais) foi efetuado com o programa Mincalc99 (Gualda e Vlach, inédito) e com planilhas comerciais (Microsoft Excel©). As fórmulas estruturais foram calculadas para o feldspato e nefelina com base em 32 O, para titanita em 20 O, para o piroxênio foi calculada a partição Fe^{2+}/Fe^{3+} segundo o método de Droop (1987), considerando a somatória de 4 cátions e 6 O. Para magnetita e ilmenita, a partição foi calculada segundo o método de Carmichael (1967), considerando a somatória de 32 O e 6 O, respectivamente. No caso da apatita a fórmula estrutural foi calculada para 26 (O, OH, Cl, F) e a da biotita para 24 (O, OH, Cl). A diagramação dos dados para análises dos vetores de substituição cristaloquímica foram efetuados com o programa Minpet© 2.02 (Richard, 1995) e posteriormente tratados com softwares comerciais.

A aquisição de dados quantitativos e a correção simultânea do *drift* instrumental, medida com o auxílio de um padrão interno, foram efetuadas com o programa GLITTER® (van Achterbergh *et al.*, 2007). A partir dos dados tratados foram realizados gráficos de variação química com o Microsoft Excel©.

O tratamento dos dados geoquímicos obtidos teve suporte de planilhas comerciais (Microsoft Excel©), onde foram executados os diagramas binários de variação química. Para os diagramas classificatórios de rocha, foi utilizado o programa GCDkit (Janousek *et al.*, 2006).

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 Geologia regional

O Maciço Alcalino Poços de Caldas (MAPC) é uma das diversas intrusões alcalinas adjacentes à Bacia do Paraná. Situa-se na porção a leste desta bacia, intrudindo rochas sedimentares que na época do magmatismo recobriam o embasamento pré-cambriano. A causa destas intrusões é atribuída às forças distensivas do rifteamento das placas Sul-Americana e Africana.

O embasamento pré-cambriano na região do MAPC pode ser agrupado em três unidades tectono-estratigráficas bem definidas: a descontínua Nappe de empurrão Socorro-Guaxupé, a Faixa Alto Rio Grande e o embasamento arqueano retrabalhado. Este último com porções adjacentes ao Cráton São Francisco e outras pertencentes ao Cráton (Ulbrich & Ulbrich, 1992; ver Figura 3-1).

A Nappe Socorro-Guaxupé, porção central da Província Mantiqueira, representa um grande cavalgamento da crosta, durante o Neoproterozoico, em direção à leste sobre o Cráton São Francisco (*e.g.* Haddad *et al.*, 1997; Janasi, 1999). Diz-se que é descontínua por ser dividida em dois segmentos: ao sul, o Domínio Socorro e ao norte, o Domínio Guaxupé. O Domínio Guaxupé é composto pelos Complexos Caconde (gnaisses quartzosos supracrustais) e Pinhal (subdivido em fácies graníticas migmatíticas e deformadas). O Domínio Socorro localiza-se logo a norte da Faixa Ribeira e é constituído, em grande parte, por rochas graníticas de afinidade cálcio-alcalina potássicas.

A Faixa Alto Rio Grande é formada quase inteiramente por unidades supracrustais fortemente deformadas e recristalizadas. Esta Faixa é composta pelos Complexos Andrelândia (xistos e gnaisses de médio grau) e Itapira (gnaisses e quartzitos de alto grau). Afloramentos menores do Complexo São João Del Rei (filitos e xistos de baixo grau) ocorrem ao norte do Domínio Guaxupé. Em algumas regiões, o Complexo Silvianópolis (gnaisses migmatíticos retrabalhados no Ciclo Transamazônico) ocorre como embasamento do Complexo Andrelândia.

As unidades pré-cambrianas retrabalhadas do Cráton São Francisco afloram a norte e leste do Domínio Guaxupé. O Grupo Barbacena (terrenos greenstone-graníticos, datando de mais que 2 Ga) é considerado como parte do Cráton, enquanto o Complexo Campos Gerais (gnaisses graníticos e greenstones mais antigos, altamente deformados, que gradam para rochas do Cráton São Francisco) separa o Domínio Guaxupé da Nappe Passos (ao norte do Domínio Guaxupé) (Ulbrich & Ulbrich, 1992).

O Maciço Alcalino Poços de Caldas tem como embasamento o Domínio Guaxupé e destaca-se dele por seu alto ângulo de desnível topográfico nas bordas setentrional, ocidental e meridional do maciço, que evidencia sua forma subcircular.

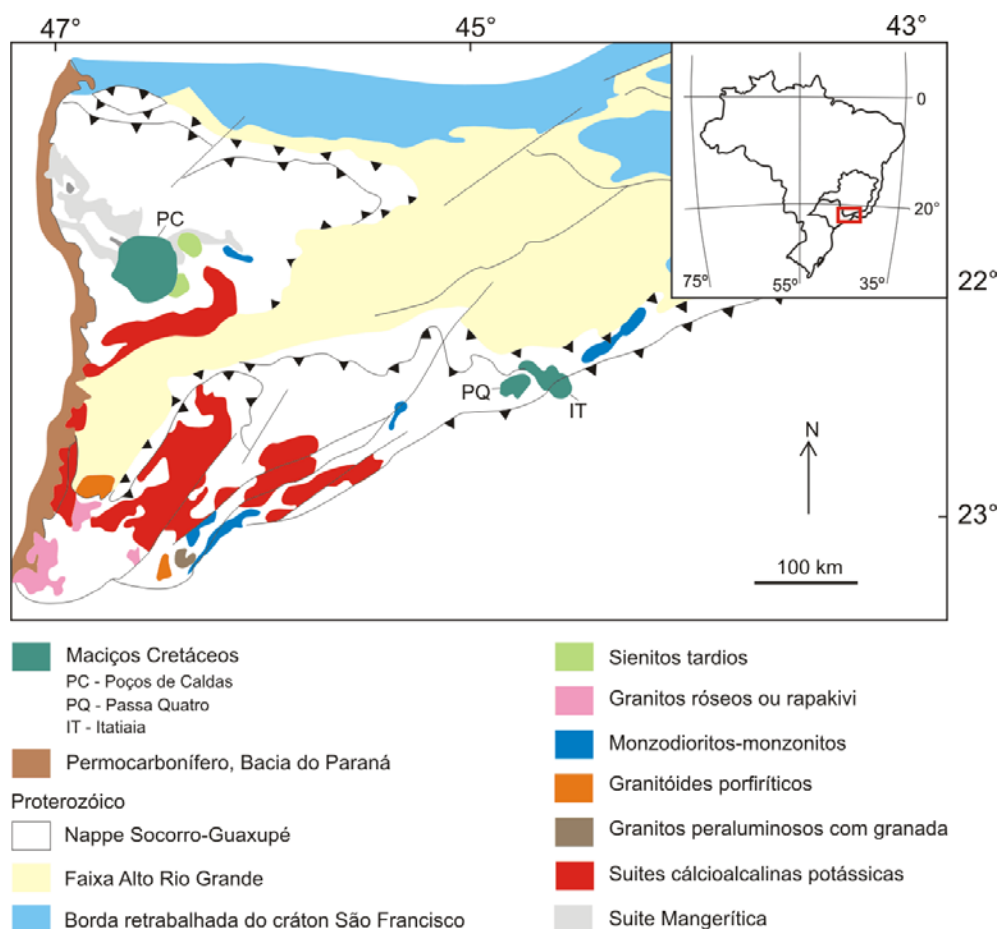


Figura 3-1: Mapa Geológico Regional com a localização dos principais maciços alcalinos da borda leste da Bacia do Paraná (adaptado de Ulbrich et al. 2005).

3.2 O Maciço Alcalino Poços de Caldas

O Maciço Alcalino Poços de Caldas (MAPC) é o maior complexo de rochas alcalinas existente na América do Sul. Visto em mapa, seu formato é subcircular, com diâmetro de aproximadamente 30km e área que chega a 800km² (Figura 3-2).

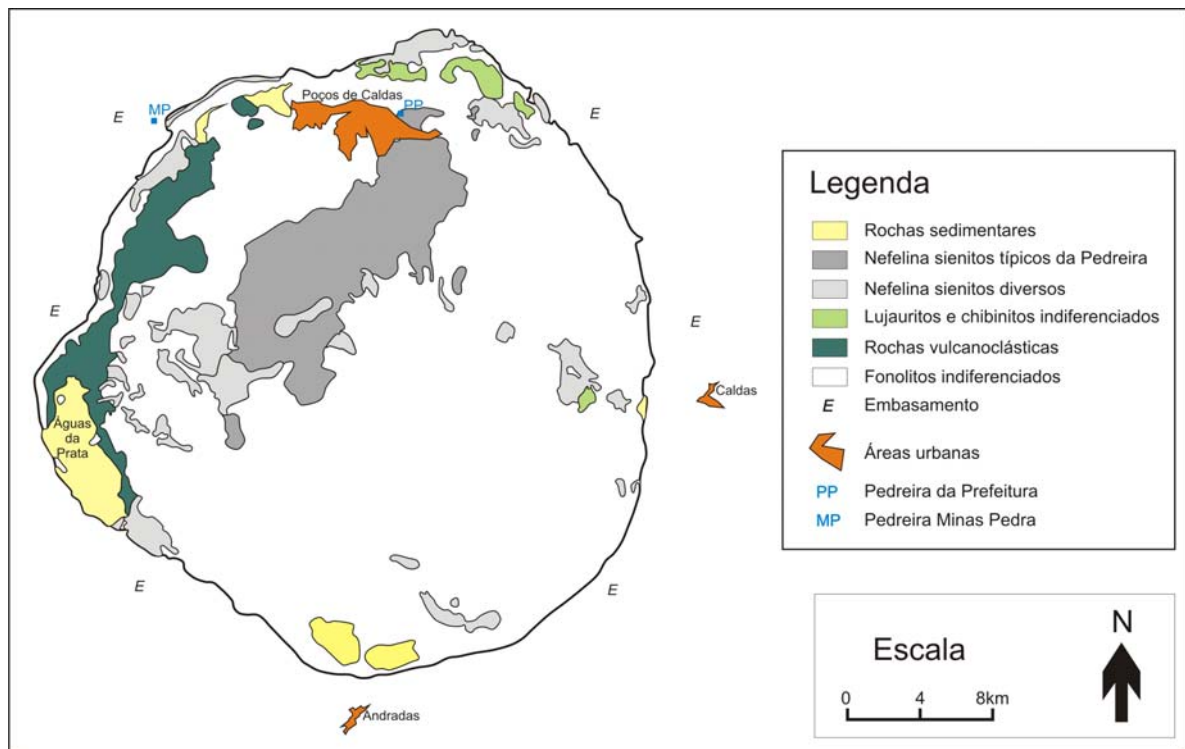


Figura 3-2: Localização da área de estudo no mapa geológico simplificado do Maciço Alcalino Poços de Caldas (adaptado e modificado de Ulbrich, 1984).

Por sua ocorrência, seu tamanho e variedade de rochas, o MAPC desperta a curiosidade de cientistas pelo menos desde o século XIX, quando foram escritos os trabalhos de Derby (1887) e de Machado (1888 *apud* Ellert, 1959). Estes trabalhos clássicos apresentam diversos dados descritivos das variedades petrográficas encontradas na região. Entretanto, o primeiro mapa geológico foi apresentado por Ellert, Coutinho e Björnberg em meados do próximo século, no ano de 1959. Muitos outros trabalhos de cunho científico sobre o MAPC foram publicados desde então. Alguns destes trabalhos merecem destaque, como os realizados por Ulbrich (1983), Ulbrich & Ulbrich (1992), Schorscher & Shea (1992), Ulbrich *et al.* (2005), entre muitos outros.

O Maciço Alcalino Poços de Caldas localiza-se na região limítrofe entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais. O Maciço compreende rochas alcalinas vulcânicas e plutônicas, que em sua grande maioria são fonolitos, tinguaítos (fonolitos sub-vulcânicos) e nefelina sienitos miasquíticos a intermediários (em ordem de maior abundância no Maciço), além de rochas vulcanoclásticas, nefelina sienitos agpaíticos (lujauritos e chibinitos) e remanescentes sedimentares da Formação Botucatu. O interior do Maciço possui topografia relativamente plana, enquanto em sua borda as altitudes chegam a mais de 1600 m. Esse avançado desnível topográfico é atribuído a remanescentes diques anelares.

O modelo proposto por Ellert (1959) para a história evolutiva geológica do MAPC consiste em uma estrutura de caldeira vulcânica com subsidência. Esta história resume-se em:

- elevação do embasamento, distensão, fraturamento e erosão;
- vulcanismo, com nefelinitos, derrames fonolíticos e vulcanoclásticas;
- subsidência do interior da caldeira, possibilitando a intrusão de tinguaítos na forma de diques anelares e estruturas circulares menores;
- seguidos por nefelina sienitos miasquíticos;
- e, por fim, colocação dos nefelina sienitos agpaíticos.

Este modelo é apoiado, principalmente, em dados geomorfológicos, porém foi parcialmente confirmado por dados geocronológicos obtidos por Bushee (1974) e pelas interpretações estruturais de Almeida Filho & Paradella (1977).

Trabalhos anteriores designavam um longo período de atividade magmática para o MAPC, com duração de ca. 30 Ma (*cf.* Amaral *et al.*, 1967; Bushee, 1974), contudo, Shea (1992) indica que este período se estendeu por aproximadamente 10 Ma.

Determinações radiométricas realizadas por Bushee (1974) indicam que a atividade ígnea pode ter começado há ca. 89 Ma com os ankaratritos, ou de acordo com Kawashita *et al.* (1984) há ca. 90 Ma com nefelina sienitos. Kawashita *et al.* (*op. cit.*) ainda apresentam idades de ca. 86 Ma para os nefelina sienitos agpaíticos, enquanto o nefelina sienito da Pedreira (em sua porção central) é datado em ca. 74 Ma (Shea, 1992). Dados como os obtidos por Sonoki & Garda (1988) e Ulbrich *et al.* (2002) indicam que o magmatismo félsico do MAPC pode ter se estendido há até 54 Ma.

As rochas mais comuns presentes no MAPC serão brevemente descritas a seguir.

Fonolitos e tinguaítos

Fonolitos e tinguaítos estão presentes em grande abundância no MAPC, eles somam aproximadamente 80% em área de exposição. Apesar da ampla exposição, são raros seus afloramentos onde a rocha não se encontre alterada. Ocorrem com maior frequência nas porções S, SE e E do Maciço (Figura 3-2). O tinguaíto, que forma a estrutura de dique anelar a qual delimita geomorfologicamente o Maciço, também compõe a zona centro-sudeste deste. Xenólitos de tinguaíto podem estar presentes nos diversos nefelina sienitos, têm contato abrupto com a rocha encaixante e possuem tamanhos muito variados.

Vulcanoclásticas e ultramáficas associadas

As rochas vulcanoclásticas são encontradas, em grande parte, na região do Vale do Quartel (a norte da cidade de Águas da Prata, na zona leste do MAPC, Figura 3-2).

Constituem aglomerados, brechas e tufos com fragmentos arredondados de, por exemplo, ankaratritos. São também encontrados nesta região pequenos horizontes de lava (decimétricos a métricos), provavelmente representando antigos derrames que foram desconectados pelo colapso geral (Ulbrich *et al.*, 2002).

Ulbrich *et al.* (2002) descrevem também, na porção noroeste do maciço (zona da pedreira Minas Pedra, ver Figura 3-2), rochas silico-carbonatíticas de afinidade alnoítica na forma de diques, veios e brechas, associadas com veios tardios de origem hidrotermal. Estes veios hidrotermais possuem como mineralogia: carbonato, flogopita, apatita, fluorita e egirina. Fragmentos de tinguaito podem ser encontrados em um complexo dique ultramáfico sob a forma de enclaves centimétricos angulosos, com borda fina de alteração. Esta relação nos mostra que os tinguaitos são mais antigos do que essas rochas ou, no máximo, foram resfriados pelo dique ultrabásico.

Nefelina sienitos agpaíticos

Os nefelina sienitos agpaíticos (lujauritos e chibinitos) têm sua ocorrência restrita. Estão presentes, em sua maioria, no extremo norte do MAPC, na estrutura chamada Anel Norte (Figura 3-2) e têm como rocha encaixante o tinguaito. Os lujauritos e chibinitos formam uma estrutura de lopólito, com uma sequência concordante núcleo-borda: de lujaurito de granulação grossa a mais fina, para nefelina sienito traquitoide e, por fim, chibinito envolve toda a estrutura. Estas rochas possuem mergulhos moderados a fortes na região de contato entre elas (Ulbrich & Ulbrich, 2000).

Os nefelina sienitos agpaíticos são constituídos por feldspato potássico, nefelina e egirina e caracterizados por possuírem enriquecimento em metais raros e minerais acessórios exóticos, como eudialita (característica das rochas agpaíticas desta região). As texturas e o teor relativo das fases minerais são o que difere estas rochas entre si (Ulbrich e Ulbrich, 1992).

Nefelina sienitos miasquíticos a intermediários

Os nefelina sienitos miasquíticos a intermediários compreendem um total de 140 km² em área de ocorrência (17% do MAPC). Estão presentes em tipos muito variados, nos quais a mineralogia predominante é feldspato potássico (ortoclásio a microclínio), nefelina e piroxênio (egirina-augita a egirina) (Ulbrich e Ulbrich, 1992).

Dentre estes nefelina sienitos, os denominados “nefelina sienitos da Pedreira” (Ulbrich, 1984; ver também Figura 3-2) são os mais expressivos, aflorando em uma faixa contínua na porção central do maciço por aproximadamente 80 km².

As melhores exposições destes nefelina sienitos estão na Pedreira da Prefeitura, situada próxima ao contato norte destes com os fonolitos encaixantes. As rochas aí

presentes possuem mineralogia monótona, constituída essencialmente por feldspato alcalino, nefelina, clinopiroxênio e acessórios diversos (e.g., titanita, hainita e magnetita). Apresentam afinidade miasquítica ou “intermediária” (entre miasquítica e agpaítica; Sørensen, 1974) e a sua diversidade deve-se principalmente às variações texturais, aos teores de minerais máficos e a presença eventual de um ou outro acessório mais típico. Descrições adicionais às deste trabalho sobre a geologia, petrografia e mineralogia destas rochas são encontradas principalmente em Ulbrich *et al.* (1979), Ulbrich (1983) e Ulbrich (1984). O mapa geológico de Ulbrich (1984) foi utilizado como referência para a localização das rochas estudadas.

4 PETROGRAFIA

Os “nefelina sienitos da Pedreira” (Ulbrich 1984) afloram na porção setentrional do Maciço Alcalino Poços de Caldas e possuem esse nome pois é na Pedreira da Prefeitura, situada a nordeste do centro de Poços de Caldas, que está a melhor exposição destas rochas. Estes nefelina sienitos podem ser separados em duas fácies distintas. Uma fácies de cor cinza médio, aspecto manchado e granulação média-grossa a grossa, que aflora a NE da pedreira, outro de tonalidade cinza mais escuro, de granulação fina-média a fina, que aflora a SW da pedreira. Estas rochas, por sua vez, possuem enclaves microgranulares félsicos e máfico-ultramáficos. As diferentes fácies de nefelina sienitos e ambos tipo de enclaves serão descritos neste capítulo.

4.1 Nefelina Sienitos

A nordeste da pedreira aflora o nefelina sienito de granulação média-grossa a grossa com tonalidades cinzentas claras, enquanto que a sudoeste predomina o nefelina sienito de granulação fina-média a média, com tonalidades de cinza mais escuras.

O contato entre as duas variedades de nefelina sienito é brusco em detalhe, mas em escala mesoscópica é irregular, de forma sinuosa. São comuns transições abruptas de uma fácies para a outra na zona de contato destas rochas. Fragmentos de contato abrupto e bordas arredondadas do nefelina sienito de granulação mais fina podem estar englobados pelo de granulação mais grossa. (Figura 4-1A e B).

Um aspecto característico das duas fácies é o desenvolvimento de uma mineralogia hidrotermal, que aparece tipicamente como preenchimento de fraturas, em geral distensivas, e em pequenas cavidades (Figura 4-1C). Atualmente, os minerais mais comumente observados são zeólitas, particularmente a natrolita, mas são descritas também analcima, calcita, fluorita, pirita, ilmenita e kutnahorita, entre diversos outros (*cf.* Ulbrich & Ulbrich 1992).

4.1.1 *Nefelina sienito médio-grosso a grosso*

Macroscopicamente, o nefelina sienito de granulação média-grossa a grossa apresenta, em geral, textura inequigranular e tipicamente foiaítica, com cristais maiores (ca 1 cm), tabulares, de feldspato alcalino formando uma malha, intersticialmente a qual se distribuem nefelina e os minerais máficos. Na maioria das amostras analisadas, podem ser identificadas macroscopicamente além de feldspato alcalino e nefelina, duas gerações

texturais de piroxênio (uma verde escuro, formada por cristais em geral prismáticos, isolados, e outra formando agregados fibrosos ou fibrorradiados intersticiais), titanita e hainita. A titanita aparece com hábito típico, baixa transparência com tons castanhos, enquanto a hainita, tipicamente intersticial, é denunciada pela transparência, brilho vítreo e tonalidades em amarelo-ocre vivo. A presença de magnetita pode ser inferida com uso do imã.

Em amostra de mão, possui aspecto tipicamente “manchado”, com porções acinzentadas mais claras e mais escuras. Estas manchas podem estar relacionadas à maior concentração de minerais máficos, na forma de glomérulos ou micro-enclaves com dimensões milimétricas (Figura 4-1D) ou ainda, relacionadas à coloração do feldspato alcalino, ora acinzentado, ora esbranquiçado.

Ao microscópio petrográfico, a trama inequigranular foiaítica desta variedade fica muito bem caracterizada, observando-se a nefelina e os minerais máficos intersticiais aos cristais maiores tabulares de feldspato alcalino orientados ao acaso. Os minerais máficos somam cerca de 13 % em volume modal e correspondem essencialmente a clinopiroxênio, acompanhado por quantidades menores de hainita, titanita e magnetita. Zeólitas e cancrinita são típicos minerais secundários, de alteração (ver Tabela 4-1).

O feldspato alcalino, com dimensões que variam de 0,5 a 1,5 cm, é o mineral félsico dominante. Apresenta hábito tabular a placoide, idiomórfico a subidiomórfico e forma o arcabouço da textura foiaítica. Possui geminação simples de Carlsbad e com frequência aparece com aspecto manchado ou turvo, dado possivelmente por alteração para argilo-minerais (Figura 4-2A e B).

Nefelina apresenta-se mais límpida do que o feldspato alcalino e forma agregados de grãos menores, em torno de 0,4 mm. É idiomórfica a subidiomórfica, aparece tipicamente em seções sub-hexagonais, quadráticas ou retangulares e é intersticial ao feldspato alcalino. Pode estar substituída parcial ou totalmente por cancrinita.



A: Relações de contato entre as duas fácies de nefelina sienitos, observar porções da fácies fina inseridas na fácies mais grossa. Caneta como escala visual. *In situ*.



B: Contato entre as duas fácies de nefelina sienitos. Observar que, em detalhe, o contato é brusco, porém irregular, e comumente possui bolsões micropegmatíticos associados. Moeda como escala visual. Em bloco rolado.



C: Fraturas preenchidas por mineralogia hidrotermal, no nefelina sienito médio-grosso a grosso.



D: Amostra PPE-1B. Enclave microgranular máfico-ultramáfico, de faces angulosas e aspecto "porfirítico", bordado por micro-nefelina sienito. Inserido na zona de contato entre as diferentes fácies de nefelina sienito. A escala gráfica corresponde a 1,0 cm. Amostrado *in situ*.

Figura 4-1: Fotografias que compreendem as principais feições macroscópicas do nefelina sienito médio-grosso a grosso.

Tabela 4-1: Análises modais (% em volume) de amostras típicas dos enclaves microgranulares e dos nefelina sienitos hospedeiros da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas (tr = traços; FA = Feldspato Alcalino; Nef = Nefelina; NeS = nefelina sienito).

Contexto Mineral		Enclaves microgranulares			Rocha hospedeira	
		Máfico-ultramáfico		Félsico	NeS médio a grosso	NeS médio a fino
		“porfirítico”	equigranular			
Clinopiroxênio prismático	verde-oliva	45-51	62,4	11,2	5,7	7,1
	róseo	8-11	---	---	tr	tr
	incolor	1	---	---	tr	tr
Clinopiroxênio fibroso		---	---	---	3,8	9
Feldspato alcalino		28-30	33	54,5	54,6	53,9
Nefelina			---	28	29	24,3
Magnetita		6-12	0,9	1,5	1,4	1,5
Titanita		6,5-8	tr	0,9	1,3	1,3
Apatita		tr-1	3,6	tr	---	2
Hainita		tr	---	1,5	0,9	0,9
Flogopita		tr	tr	---	---	---
Carbonato		tr	---	---	---	---
Zeólitas		tr	---	2	3,7	tr
Índice M		~70	67	15,1	13,1	21,8
Razão FA/Nef		---	---	1,9	1,9	2,2

Clinopiroxênio é o mineral máfico típico destas rochas. Duas gerações texturais, já identificadas macroscopicamente, podem ser individualizadas.

A primeira geração é formada por cristais prismáticos subidiomórficos, com dimensões entre 0,3 e 2,8 mm, mais comumente em torno de 1,0 mm. Esta geração apresenta um forte zoneamento, onde o núcleo dos cristais possui tonalidades mais claras, comumente verde-pálidas e mais raramente róseo-pálidas a incolores, com pleocroísmo apenas incipiente, que passam de forma ora mais abrupta, ora mais suave para bordas fortemente pleocroicas (com X: verde-oliva, Y: verde-oliva levemente amarelado e Z: verde-oliva amarelo). No núcleo desta geração, quando róseo, são encontradas abundantes inclusões aciculares diminutas, em geral distribuídas de forma regular ao longo de planos cristalinos e formadas possivelmente por exsolução de Ti (rutilo). Estas bordas verde-oliva apresentam-se tipicamente xenomórficas, intersticiais à nefelina ou com inclusões desta e quando em cristais maiores apresentam inclusões diminutas idiomórficas a subidiomórficas de magnetita, identificada sob luz refletida. Estas inclusões caracterizam sua textura poiquilitica (Figura 4-2C). Este clinopiroxênio aparece, às vezes, como cristais isolados, mas tipicamente constitui aglomerados de alguns cristais aos quais se associam titanita e magnetita (Figura 4-2D).

A segunda geração, de cristalização tardia, apresenta características ópticas da egirina (ver Tabela 5-2). É formada por cristais tipicamente aciculares, de tendência idiomórfica com granulação entre 0,04 e 0,8 mm, mais comumente em torno de 0,3 mm. Apresenta forte pleocroísmo, similar ao observado nas bordas dos cristais da primeira geração, mas com tons verde-oliva mais intensos. Estes cristais podem ocorrer ou como agregados fibrorradiados que em geral ocupam interstícios, juntamente com zeólitas, formados pelas grandes ripas de feldspato alcalino, ou na matriz da rocha, intersticiais a nefelina, indicando cristalização relativamente tardia (Figura 4-2A e B). Adicionalmente, esta geração de clinopiroxênio ocorrer na forma de sobre-crescimentos nos cristais da primeira geração e na magnetita.

Tabela 4-2: Ângulo de extinção dos clinopiroxênios (χ^c na variedade fibrosa, z^c nas demais variedades) de enclaves microgranulares e rochas hospedeiras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas (Cpx = clinopiroxênio, NeS = nefelina sienito).

Contexto	Cpx	verde-oliva prismático		róseo	incolor	verde-oliva fibroso	
		centro	borda				
Enclaves microgranulares	Máfico-ultramáfico	31		27	42		
		30		23			
		34		31			
		26					
		27					
		35					
		30					
		35					
		30					
		36					
	41						
	36						
	35						
	Félsico	35		13			5
		39		20			
		31		26			
34							
36							
32							
Rocha hospedeira	NeS médio-grosso a grosso	31	8		41	4	
		31	5			4	
		37	6				
		35					
		34					
		35					
	34						
	NeS médio-fino a fino	24	1				3
		24	5				
		34	8				

Dentre os acessórios tem-se a titanita, que possui granulação entre 0,2 e 0,8 mm, é subidiomórfica a idiomórfica e apresenta forte pleocroísmo (X: quase incolor a rosa pálido; Y: levemente róseo amarelado; Z: rósea amarronzada). Ocorre como cristais isolados ou associados ao clinopiroxênio da primeira geração e aos minerais opacos.

A magnetita, com granulação entre 0,08 e 0,6 mm, é o mineral opaco predominante na rocha. Subidiomórfica a xenomórfica, aparece em geral associada ao clinopiroxênio e a titanita. Como referido, aparece também bordejada pelo clinopiroxênio fibrorradiado e como inclusões diminutas na borda verde-oliva do clinopiroxênio prismático.

Hainita é um acessório muito característico nesta rocha. Foi reconhecida por ser incolor, possuir relevo alto e cores de interferência azuladas, anômalas, nos cortes de baixa

birrefringência. É subidiomórfica a idiomórfica e forma cristais prismáticos que têm tamanhos de até 1,2 mm, intersticiais aos minerais félsicos.

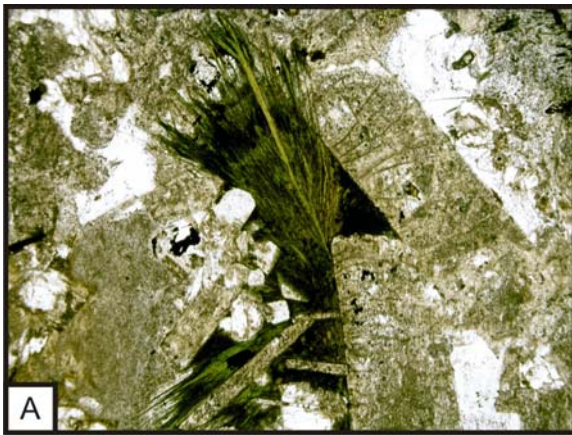
Os minerais secundários incluem especialmente zeólitas e cancrinita. Duas zeólitas podem ser distinguidas: uma com cor de interferência laranja de primeira ordem, substituindo parcialmente as bordas de cristais de feldspato alcalino, outra com birrefringência baixíssima, quase isotrópica, preenchendo os interstícios entre os minerais félsicos, neste caso, podem estar associados a egrina fibrorradiada. A cancrinita ocorre estritamente como substituição parcial ou total da nefelina.

4.1.2 Nefelina sienito médio-fino a fino

O nefelina sienito de granulação mais fina é inequigranular, localmente porfírico, com cristais maiores de feldspato alcalino tabular. A textura foiaítica está ausente. Embora não seja tão típico como no caso da variedade anterior, esta fácies também apresenta aspecto “manchado”, particularmente junto às zonas mais ricas em enclaves microgranulares máfico-ultramáficos, variando entre tonalidades mais claras e mais escuras de cinza.

Na Figura 4-3 as duas fácies dos nefelina sienitos estão plotadas no diagrama classificatório A-P-F mostrando um maior conteúdo de feldspato alcalino e conseqüente menor de nefelina na fácies mais grossa.

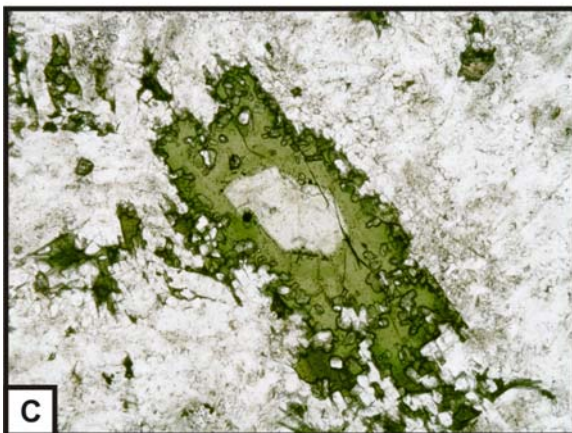
Esta variedade é muito semelhante do ponto de vista mineralógico ao nefelina sienito de granulação mais grossa (ver Tabela 4-1). A diferença essencial está na granulação menor, no arranjo textural dos minerais félsicos e no Índice de Cor, que chega a 21 %. Mostrando que a fácies não somente é mais escura pela granulação mais fina (ver Figura 4-4).



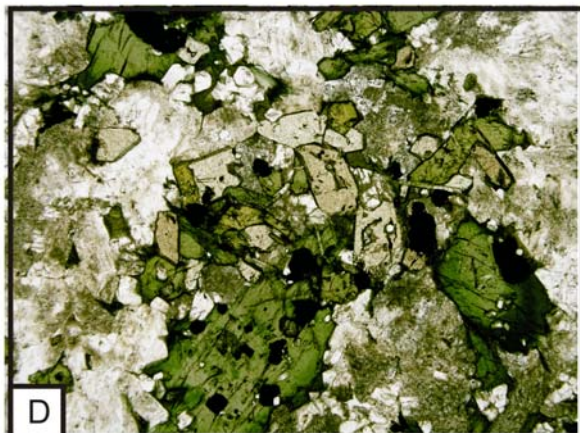
A: Amostra PPE-4Aa. Luz plano-polarizada. Placas de feldspato alcalino formando interstícios, estes preenchidos por clinopiroxênio verde-oliva fibroso. Feição indicativa de cristalização tardia do piroxênio. Lado maior da foto = 3,2mm.



B: Amostra PPE-1Bd. Luz plano-polarizada. Placas de feldspato alcalino formando interstícios, estes preenchidos por clinopiroxênio verde-oliva fibroso com tendência a prismático. Lado maior da foto = 3,2mm.



C: Amostra PPE-1Ba. Luz plano-polarizada. Cristal idiomórfico de clinopiroxênio incolor, bordado por clinopiroxênio verde, subidiomórfico e poiquilítico. Lado maior da foto = 2mm.



D: Luz plano-polarizada. Aglomerado de minerais máficos, com clinopiroxênio (verde, prismático), titanita (rósea amarelada a rósea pálida) e magnetita (opaca). Lado maior da foto = 3,2mm.

Figura 4-2: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais do nefelina sienito médio-grosso a grosso.

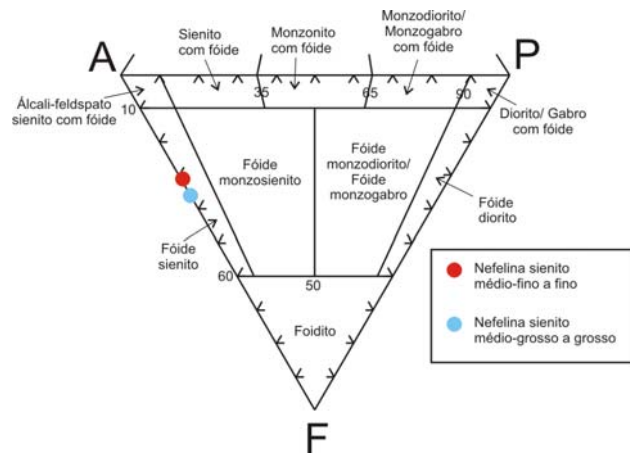


Figura 4-3: Diagrama classificatório A-P-F (A- feldspato alcalino, P- plagioclásio e F- feldspatoide). As proporções modais de feldspato alcalino e nefelina das fácies de nefelina sienito estão plotadas.

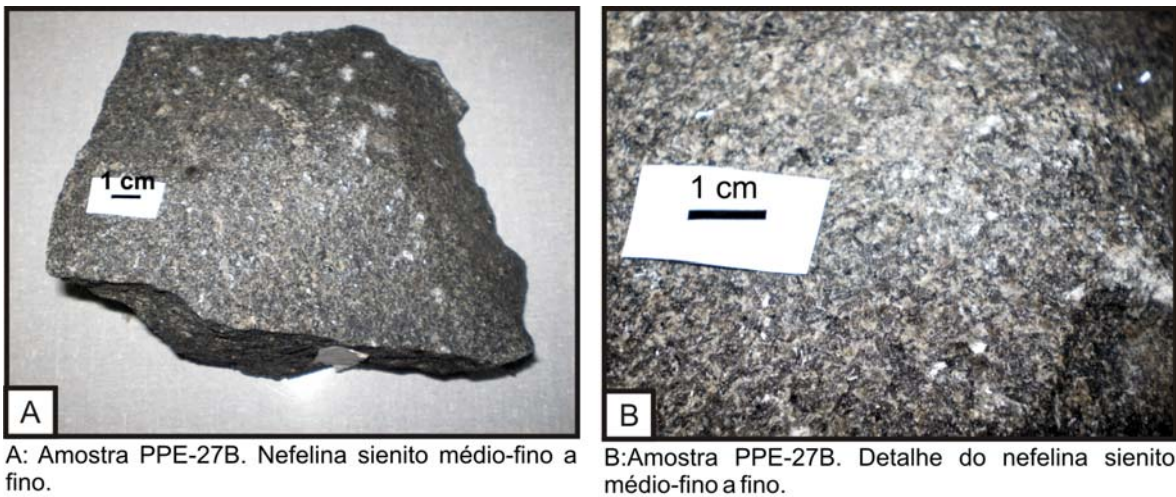


Figura 4-4: Fotografias que compreendem as principais feições macroscópicas do nefelina sienito médio-fino a fino.

Ao microscópio petrográfico, o feldspato alcalino (0,4 a 2,5 mm, mais comumente em torno de 1,2 mm) apresenta hábito tabular a prismático. Comparativamente ao nefelina sienito mais grosso é algo mais límpido e mais subidiomórfico, faltando cristais tipicamente idiomórficos. A geminação simples de Carlsbad é frequente. Estes cristais são tipicamente poiquilíticos, com inclusões, em geral idiomórficas e límpidas, de nefelina (com dimensões da ordem de 0,08 mm) (Figura 4-5A e B).

A nefelina, subidiomórfica a idiomórfica, apresenta dimensões entre 0,02 e 0,2 mm (mais comumente em torno de 0,1 mm) e hábito prismático. Pode ocorrer como cristais isolados ou, mais comumente, em agregados. De dimensões diminutas, forma as inclusões no feldspato (Figura 4-5A e B). Pode estar parcialmente substituída para cancrinita.

Assim como no nefelina sienito de granulação mais grossa, o clinopiroxênio também aparece sob duas gerações distintas, com características ópticas e texturais similares às daquele. A primeira, xenó a subidiomórfica, prismática, constitui cristais com dimensões entre 0,12 e 2,4 mm (mais comumente em torno de 0,8 mm). Como no caso da outra fácies, apresenta forte zoneamento, com núcleo pouco pleocroico e borda mais ou menos irregular, de espessuras variadas e com pleocroísmo forte em tons de verde. Esta borda verde também apresenta localmente aspecto poiquilítico, com inclusões diminutas de magnetita (Figura 4-5C). A segunda geração é idiomórfica, constituída tipicamente por egirina que forma cristais prismáticos ou agregados fibrorradiados com dimensões em torno de 0,2 mm. Possuem forte zoneamento (com X: verde-oliva, Y: verde-oliva levemente amarelado e Z: verde-oliva amarelo) (Figura 4-5E). Esta geração pode ser intersticial aos outros constituintes ou apresentar-se como sobre-crescimento em clinopiroxênio prismático ou em magnetita.

Titanita (ca. 0,2 mm) é um mineral acessório comum. Possui textura subidiomórfica a idiomórfica e com forte pleocroísmo, semelhante ao descrito para a do nefelina sienito de granulação mais grossa. Um aspecto digno de nota é que nesta variedade os cristais de

titanita são poiquilíticos, contendo elevado número de inclusões subidiomórficas a idiomórficas, diminutas, especialmente de fases minerais incolores de difícil identificação ao microscópio (nefelina ou apatita?). A magnetita (0,04 - 0,6 mm, mais comumente em torno de 0,2 mm) é tipicamente xenomórfica e pode apresentar bordas corroídas. Ocorre tanto associada ao clinopiroxênio, inclusa na zona verde-oliva da geração prismática, como isolada e pode estar também bordejada por egirina fibrorradiada.

A hainita (0,4 mm) é xeno a subidiomórfica e aparece, na maior parte das vezes, intersticial ao feldspato alcalino e à nefelina. Alguns cristais mostram uma geminação lamelar polissintética, aparentemente similar à Lei da Albita. Apatita (ca. 0,1 mm) aparece prismática e idiomórfica, associada ao clinopiroxênio da primeira geração e, às vezes, nele inclusa.

Zeólitas e alguma cancrinita complementam, como minerais secundários, a mineralogia desta rocha.

Neste litotipo, foram observados microenclaves de composição máfica, textural e mineralogicamente semelhantes aos enclaves máfico-ultramáficos, com cristais maiores de clinopiroxênio róseo subidiomórfico, imersos numa matriz de clinopiroxênio xenomórfico verde. A matriz destes microenclaves, além de possuírem clinopiroxênio verde, são constituídas por magnetita, feldspato alcalino e nefelina (Figura 4-5D).

4.2 Enclaves e outras estruturas

4.2.1 Enclaves microgranulares félsicos

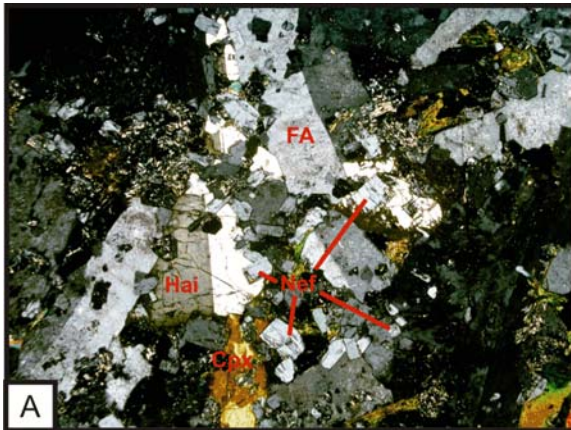
Os enclaves microgranulares félsicos estão presentes em toda a exposição da Pedreira, tanto no nefelina sienito mais fino quanto no mais grosso, porém são sempre mais comuns na fácies de granulação grossa. De forma geral os enclaves microgranulares félsicos são maiores e mais abundantes do que os máficos.

Macroscopicamente, estes enclaves têm cor cinza esverdeado e são facilmente distinguíveis da rocha hospedeira, pois além de suas cores serem contrastantes, o contato com esta é macroscopicamente abrupto. Possuem formas arredondadas a ovaladas e apresentam dimensões de centimétricas a decimétricas (mais comuns com ca. 4,0 cm) (Figura 4-6A). Sua textura varia entre equigranular a levemente inequigranular e a granulometria varia desde fina-média, nas bordas, até muito fina (Figura 4-6B).

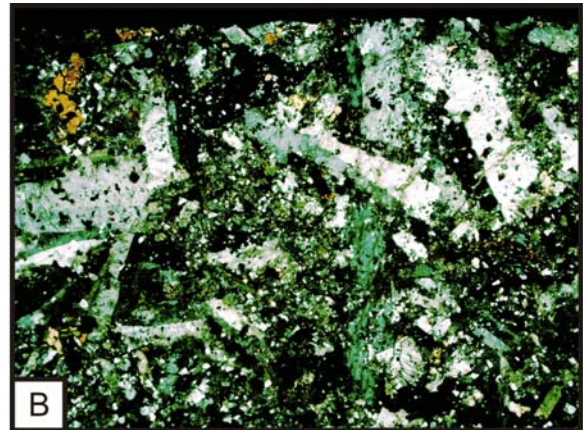
Nos espécimes com cristais mais desenvolvidos podem ser observados feldspato alcalino (de maior tamanho em relação aos outros minerais), nefelina e piroxênio. Em alguns casos, aglomerados de minerais máficos se destacam da matriz como manchas preto esverdeado com tamanho em torno de 0,5 cm.

Uma característica importante observada em alguns enclaves é uma forte zonalidade, observando-se uma gradação de granulometria desde fina a muito fina no

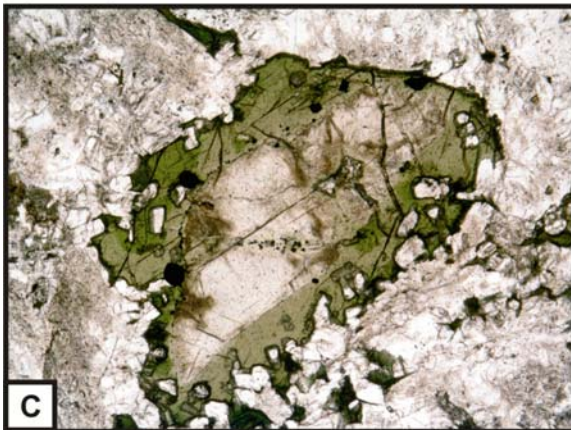
núcleo até fina-média nas bordas, junto ao contato com o nefelina sienito hospedeiro (ver também Ulbrich 1984).



A: Amostra PPE-6b. Polarizadores cruzados. FA: feldspato alcalino; Hai: hainita; Nef: nefelina; Cpx: clinopiroxênio. Lado maior da foto = 2 mm.



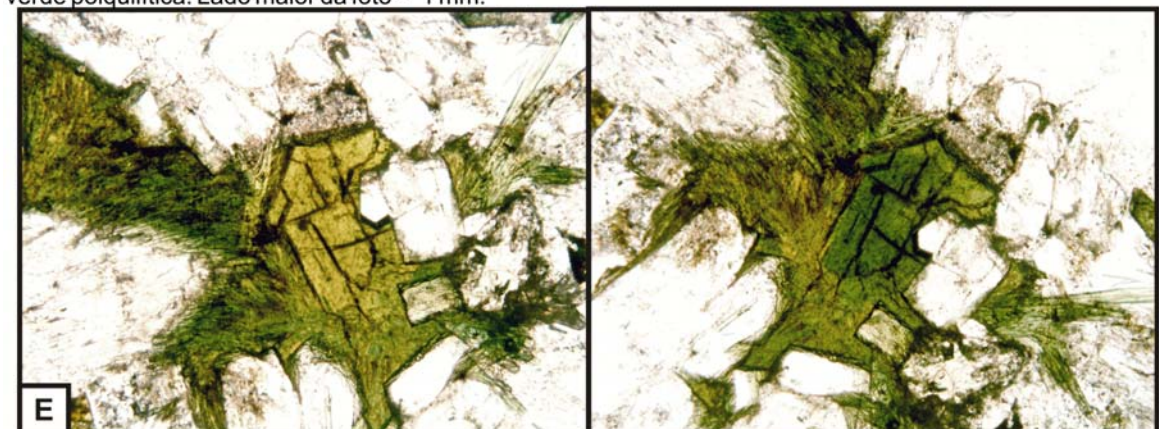
B: Amostra PPE-1Ba. Polarizadores cruzados. Ripas de feldspato alcalino poiquilitico, com inclusões de nefelina. Lado maior da foto = 10,2 mm.



C: Amostra PPE-6b. Luz plano-polarizada. Cristal subidiomárfico de clinopiroxênio róseo com borda-verde. As manchas mais amarronzadas no núcleo róseo correspondem à exsolução de rutilo. Borda verde poiquilitica. Lado maior da foto = 1 mm.



D: Amostra PPE-6b. Luz plano-polarizada. Microenclave máfico no nefelina sienito fino. Textural e mineralogicamente semelhante aos enclaves maiores encontrados. Lado maior da foto = 6,4 mm.

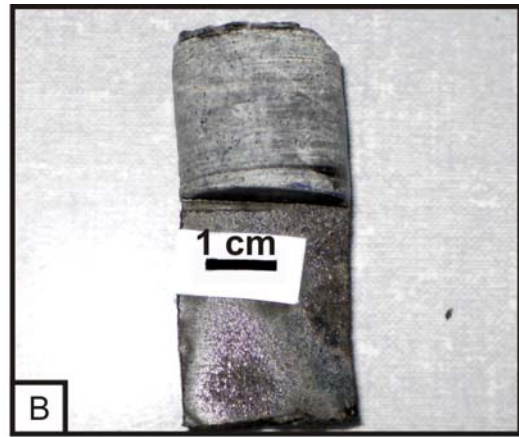


E: Amostra PPE-6b. Luz plano-polarizada. Egirina prismática associada à egirina fibrosa. Pleocroísmo forte: X: verde-oliva, Y: verde-oliva levemente amarelado e Z: verde-oliva amarelo. Lado maior de ambas as fotos = 0,65 mm.

Figura 4-5: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais do nefelina sienito médio-fino a fino.



A: Enclaves microgranulares félsicos de composição fonolítica e forma arredondada. Inseridos no nefelina sienito médio-grosso a grosso. *In situ*.



B: Amostra PPE-31. Enclave microgranular félsico, coletado *in situ* com perfuratriz.

Figura 4-6: Fotografias que compreendem as principais feições macroscópicas dos enclaves microgranulares félsicos.

Ao microscópio petrográfico, os enclaves félsicos são muito similares, do ponto de vista mineralógico e textural, ao nefelina sienito de granulação fina-média a fina descrito anteriormente. No caso dos enclaves zonados, a diferença essencial entre os núcleos de granulação mais fina e as bordas algo mais grossas, está aparentemente apenas na granulação, ou seja, não há concentrações maiores os menores de minerais específicos.

O feldspato alcalino (0,2 - 1,0 mm, em geral em torno de 0,5 mm), ripiforme a tabular, é tipicamente xenomórfico e a geminação de Carlsbad é algo menos comum do que na rocha hospedeira. Contém abundantes inclusões (ca. 0,07 mm) de nefelina, caracterizando sua textura poiquilítica. A nefelina (0,03 – 0,1 mm) é subidiomórfica a idiomórfica, associa-se ao feldspato e mais raramente ao clinopiroxênio na forma de pequenas inclusões, neste último caso apresentando bordas arredondadas e parcialmente corroídas.

Dois gerações de piroxênio são reconhecidas, a exemplo das variedades descritas anteriormente, com características ópticas e texturais muito similares. A primeira geração é prismática com dimensões entre 0,05 e 0,7 mm, mais comumente em torno de 0,2 mm. Esta geração pode ter núcleo róseo/incolor com clinopiroxênio verde-oliva bordejando-o (Figura 4-7A). A segunda geração forma agregados fibrorradiados com dimensões entre 0,02 e 0,1 mm (mais comumente em torno de 0,08 mm) e alguns cristais prismáticos menores, de coloração verde-oliva intenso.

Titanita subidiomórfica a idiomórfica (0,06 – 1,0 mm), magnetita xenomórfica (ca. 0,1 mm) e hainita xenomórfica (< 0,4 mm), apresentam características muito similares às descritas para os nefelina sienitos. Ao microscópio petrográfico foi identificada biotita, adicionalmente, como mineral acessório. Esta de ocorrência restrita e geralmente associa-se ao clinopiroxênio verde fibroso (Figura 4-7B).

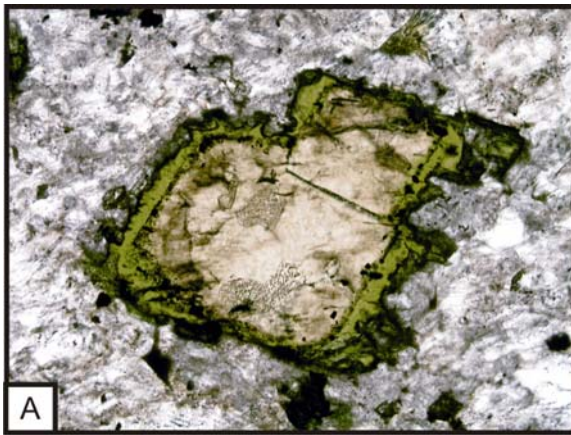
Estes enclaves possuem glomérulos máficos, os quais são formados essencialmente por clinopiroxênio verde xenomórfico a subidiomórfico, associado a titanita e magnetita. Possuem feldspato alcalino e nefelina como minerais félsicos. São texturalmente similares aos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos (Figura 4-7C e D).

4.2.2 *Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos*

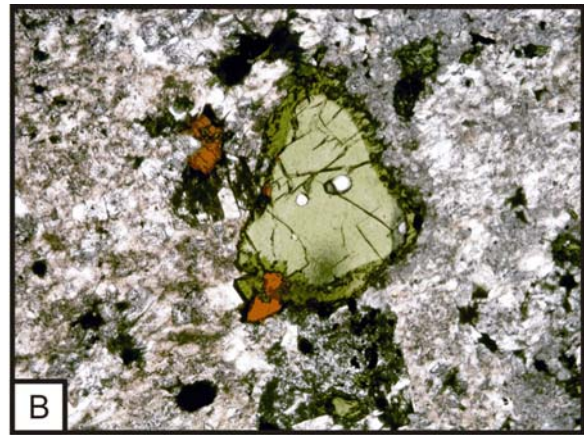
Os enclaves máfico-ultramáficos são menos comuns do que os félsicos e ocorrem, em geral, no nefelina sienito de granulação mais fina. Estão distribuídos de forma irregular: existe uma concentração significativa nas zonas próximas ao contato com o nefelina sienito mais grosso, mas também são ocasionalmente encontrados ao longo de toda frente da pedreira em que aflora o nefelina sienito mais fino. São raros no nefelina sienito médio-grosso a grosso. Estes enclaves, por possuírem composição modal máfica-ultramáfica, apresentam cor cinza muito escuro, esverdeado (Figura 4-8A, B e C).

Os enclaves máfico-ultramáficos encontrados na pedreira, em sua grande maioria, apresentam textura de aspecto “porfirítico”. Esta textura é definida em amostra de mão por macrocristais prismáticos de piroxênio, de tonalidades marrom muito escuro a preto e dimensões entre 0,2 a 1,0 cm, imersos em uma matriz cinza escuro esverdeado, fanerítica muito fina a afanítica. A concentração de macrocristais varia muito de um enclave para outro, podendo sequer não possuir macrocristais (Figura 4-8B e F).

No caso da ausência de macrocristais, estes enclaves podem ser agrupados em dois tipos. O primeiro possui tonalidades mais escuras de cinza-esverdeado, granulação muito fina, borda irregular e pouco angulosa e texturalmente semelhante aos enclaves máfico-ultramáficos, não fosse a ausência de macrocristais (Figura 4-8B). O segundo tipo tem cor mais clara, pouca coisa mais escura que o nefelina sienito mais fino, equigranular de granulação fina, com borda suavemente arredondada (Figura 4-8F).



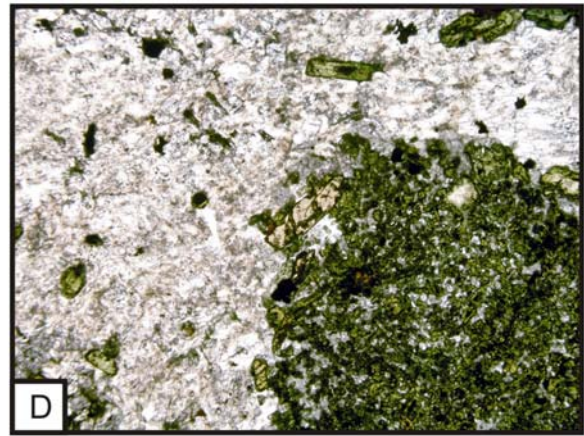
A: Amostra PPE-31. Luz plano-polarizada. Clinopiroxênio prismático de núcleo róseo e borda verde-oliva. Zonas mais escuras do núcleo correspondem à exsolução de rutilo. Lado maior da foto = 1,3 mm.



B: Amostra PPE-31. Luz plano-polarizada. Clinopiroxênio prismático com núcleo verde claro e borda mais escura. Biotita associada ao clinopiroxênio mais tardio. Lado maior da foto = 2,56mm.



C: Amostra PPE-31. Luz plano-polarizada. Glomérulo máfico presente no enclave microgranular félsico. Acúmulo de clinopiroxênio e magnetita, com alguns cristais maiores deste. Lado maior da foto = 10,2mm.



D: Amostra PPE-31. Luz plano-polarizada. Glomérulo máfico presente no enclave microgranular félsico. Lado maior da foto = 3,2mm.

Figura 4-7: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais dos enclaves microgranulares félsicos.

Estes enclaves apresentam dimensões variáveis, com diâmetros desde milimétricos até cerca de 5,0 cm, mais comumente em torno de 2,5 cm. O contato dos enclaves com a rocha hospedeira é macroscopicamente abrupto. Os enclaves hospedados no nefelina sienito de granulação mais grossa possuem formas mais arredondadas e comumente apresentam uma borda ovalada, com espessura variável entre 0,5 e 5,0 cm, constituída por um micro-nefelina sienito com textura similar à descrita para os enclaves microgranulares félsicos. Esta borda mais félsica resulta em um aspecto similar ao descrito em literatura para os denominados “enclaves duplos” (ver Figura 4-8E). Os enclaves inseridos no nefelina sienito de granulação menor, por sua vez, não apresentam esta borda bem definida ou esta é de pouca expressão, com espessura sub-milimétrica apenas (Figura 4-8A e B).

Localmente, alguns enclaves apresentam-se disruptos e com finas venulações fonolíticas (Figura 4-8C e D); os contatos com as encaixantes ora são retos, ora são mais curvilíneos e sinuosos. Um dos enclaves amostrados apresenta uma fina borda (ca. 1 mm) de granulação mais fina e cor mais escura, com concentração de minerais máficos, imediatamente junto ao contato com o nefelina sienito hospedeiro (Figura 4-8C).

As descrições ao microscópio petrográfico dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos revelaram que os espécimes amostrados possuem, **em média**, teores abaixo de 80% (em volume) de minerais máficos (ver Tabela 4-1). O termo “máfico-ultramáfico” é usado devido a variação da concentração de máficos, ora de composição máfica, ora ultramáfica.

Os enclaves máfico-ultramáficos são constituídos por clinopiroxênio, feldspato alcalino, nefelina, minerais opacos e titanita; e têm como minerais acessórios, apatita (mais comum em relação aos outros acessórios), flogopita, carbonato e raramente hainita (ver Tabela 4-1).

Ao microscópio petrográfico estes enclaves apresentam, no geral, textura inequigranular de aspecto “porfirítico”, definido pela presença de macrocristais de clinopiroxênio, que podem ter até ca. 1cm, em uma matriz fina a muito fina, com heterogeneidades. Estas heterogeneidades da matriz são caracterizadas por micro-venulações e bolsões de formas irregulares de composição modal félsica, com diâmetro de até 1mm (Figura 4-9A e B). Nestas regiões se concentram, preferencialmente, feldspato alcalino e nefelina, inclusões aciculares de apatita e pode ocorrer hainita. Há também, nestes enclaves, concentrações de minerais opacos diminutos, que chegam a constituir 15% em volume destas regiões (Figura 4-9A e B). Os macrocristais encontram-se, em geral, distribuídos regularmente nos enclaves. Em alguns destes enclaves nota-se uma tendência de orientação nas zonas mais próximas ao contato com o sienito hospedeiro, acompanhando o desenho do contato.



A

A: Enclave microgranular máfico com macrocristais de piroxênio, dando aspecto “porfírico”, e bordas algo angulosas. Bordejado por nefelina sienito muito fino. Inserido na fácies de granulação mais fina. Em bloco rolado.



B

B: Enclave microgranular máfico, sem megacristais, com borda milimétrica de nefelina sienito muito fino. Inserido na fácies de granulação mais fina. *In situ*.



C

C: Amostra PPE-7A. Enclave microgranular máfico-ultramáfico de forma arredondada e contato levemente sinuoso com a encaixante. Possui borda fina mais escura. A escala gráfica corresponde a 1 cm. Amostrado em bloco rolado.



D

D: Amostra PPE-25. Enclave microgranular máfico-ultramáfico. Observar como o corte tridimensional revela sua forma disrupta. Escala gráfica corresponde a 1 cm. Amostrado *in situ*.



E

E: Amostra PPE-1, ainda *in situ*. Enclave microgranular máfico-ultramáfico englobado por enclave microgranular félsico.



F

F: Amostra PPE-5B. Enclave máfico de granulação algo maior do que os enclaves máfico-ultramáficos e equigranular. Notar que este tipo não possui megacristais de clinopiroxênio. Escala gráfica corresponde a 1cm.

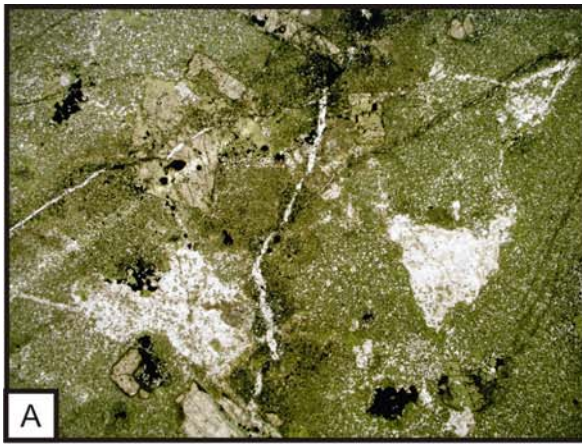
Figura 4-8: Fotografias que compreendem as principais feições macroscópicas dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos.

O clinopiroxênio é o principal mineral presente nos enclaves máfico-ultramáficos. Duas gerações texturais de clinopiroxênio podem ser opticamente distintas: uma com tons róseos, levemente pleocroica e outra incolor, ambas presentes como macrocristais e por fim, uma em tons de verde-oliva, que predomina na matriz dos enclaves (Figura 4-9C e D e ver também Tabela 4-2) e também ocorre como borda nos macrocristais. A variedade fibrorradiada não ocorre nos enclaves máfico-ultramáficos.

Os macrocristais de clinopiroxênio com tonalidades rosadas são os mais comuns. São subidiomórficos a idiomórficos e prismáticos. Apresentam geminações simples ou lamelares e dimensões entre 0,6mm e 1,0cm (em geral em torno de 1,2mm). O pleocroísmo é fraco, mas distinto (com X: róseo-pálido, levemente amarelado, Y: róseo pálido, Z: róseo pálido acastanhado). Possuem fino zoneamento nas porções intermediária e externa do cristal, que acompanham faces de crescimento (Figura 4-9D). Estes macrocristais róseos frequentemente contêm inclusões aciculares de rutilo, possivelmente geradas por exsolução, que se concentram ao longo de planos cristalinos, sempre mais comuns nas regiões intermediária ou externa deste. Esta geração pode localmente apresentar extinção setorial, cor de interferência anômala, em tonalidades de azul *jeans* (Figura 4-9D) e forte dispersão dos eixos ópticos, observada em figuras de interferência, característica das “titano-augitas”. Inclusões de magnetita nestes macrocristais são relativamente comuns (Figura 4-9E).

A geração incolor, sem extinção anômala, é menos comum. Aparece como cristais isolados ou como núcleo nos macrocristais de “titano-augita”. (Figura 4-9C).

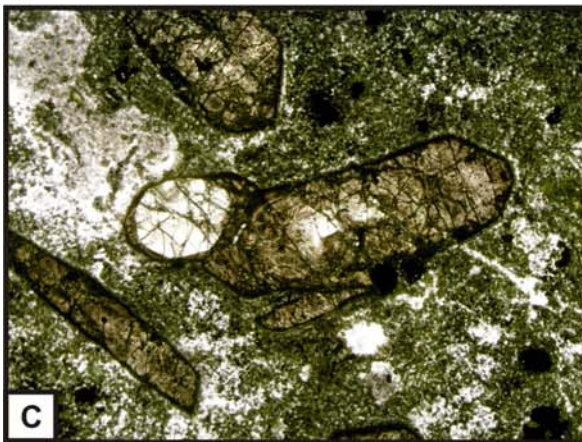
Uma característica típica de ambos macrocristais, rosados e incolores, é a presença de texturas de corrosão marginal e substituição por uma geração posterior de piroxênio verde-oliva pleocroico (X: verde-oliva pálido, Y: verde-oliva levemente amarelado e Z: verde-oliva amarelado), similar ao piroxênio predominante na matriz dos enclaves. Esta substituição é mais bem denotada quando estes cristais estão na borda do enclave, junto ao contato com o nefelina sienito hospedeiro (Figura 4-9F). Esta borda de clinopiroxênio verde, com contorno xenomórfico, apresenta espessura variável, entre 0,04 e 0,4 mm, geralmente caracterizada pela presença de elevado número de inclusões diminutas de opacos (principalmente magnetita), titanita e apatita. São muito semelhantes às bordas verdes descritas para os piroxênios de primeira geração dos nefelina sienitos.



A: Amostra PPE-7Ab. Luz plano-polarizada. Enclave máfico-ultramáfico, com megacristais de clinopiroxênio róseo. Apresenta heterogeneidades como acúmulo de minerais félsicos e acúmulo de opacos. Lado maior da foto = 10,2 mm



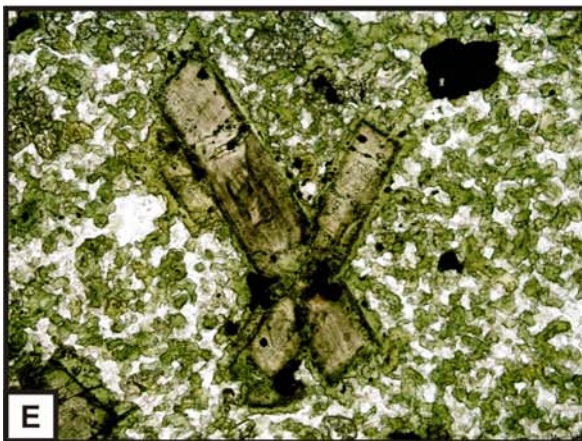
B: Amostra PPE-7Aa. Luz plano-polarizada. Contato entre enclave máfico-ultramáfico e nefelina sienito fino. Enclave mostra-se heterogêneo. Lado maior da foto = 10,2 mm



C: Amostra PC-19 (Coleção do orientador). Luz plano-polarizada. Enclave máfico-ultramáfico. Macrocristais de clinopiroxênio róseo, incolor e matriz verde-oliva. O núcleode alguns cristais rosados é incolor. Lado maior da foto = 6,4 mm.



D: Amostra PPE-7Aa. Polarizadores cruzados. Enclave máfico-ultramáfico. Megacristais apresentando geminação simples, extinção anômala e zoneamento acompanhando as faces de crescimento. Lado maior da foto = 3,2 mm.



E: Amostra PPE-33. Luz plano-polarizada. Megacristais de clinopiroxênio róseo com inclusões de magnetita. Lado maior da foto = 1,3 mm.



F: Amostra PPE-7Ab. Luz plano-polarizada. Megacristais de clinopiroxênio róseo com borda verde em contato com a rocha encaixante. Lado maior da foto = 3,2 mm.

Figura 4-9: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos.

O clinopiroxênio verde-oliva que substitui parcialmente a borda dos macrocristais é típico da matriz destes enclaves. Quando constituinte da matriz, é xeno a subidiomórfico, raramente idiomórfico, com dimensões entre 0,001 e 0,5 mm e de hábito prismático. Possui pleocroísmo moderado (X: verde-oliva pálido, Y: verde-oliva amarelado, Z: verde-oliva amarelo a amarelo esverdeado) e apresenta zoneamento fraco, gradando de tons mais claros para mais fortes de verde-oliva, do núcleo para a borda, respectivamente. Quando em contato com a rocha encaixante, apresenta tons verde-oliva mais escuros, com zoneamento núcleo-borda mais pronunciado e maior tendência ao idiomorfismo (Figura 4-10A). Associa-se com magnetita e titanita, as quais também aparecem como inclusões nestes.

Nefelina e feldspato alcalino ocorrem dispersos na matriz, como cristais subidiomórficos a xenomórficos, relativamente menores ao clinopiroxênio da matriz. Apresentam dimensões pouco maiores quando concentrados nas micro-venulações e bolsões e, em alguns casos, observa-se que o feldspato alcalino contém inclusões de nefelina.

Titanita ocorre xeno a idiomórfica, de granulometria entre 0,02 e 0,2 mm, e hábito prismático navicular. Possui pleocroísmo forte, semelhante ao descrito para a dos nefelina sienitos. Quando em sua forma idiomórfica, tende a ser poiquilítica, com inclusões abundantes de apatita (Figura 4-10B). A titanita também pode ocorrer xenomórfica, bordejando magnetita. A magnetita (entre 0,02 e 0,6 mm) é xeno a subidiomórfica. Associa-se ao clinopiroxênio verde da matriz e pode estar inclusa no núcleo róseo ou na borda verde dos megacristais.

Flogopita é mais rara, aparece geralmente subxenomórfica, associada à magnetita, principalmente àquelas inclusas em megacristais róseos, e tem sua distribuição irregular. Apresenta pleocroísmo moderado em tons de laranja a amarelo alaranjado (Figura 4-10C).

A apatita, além de estar presente nos minerais félsicos e na titanita na forma de diminutas inclusões, ocorre também como cristais prismáticos subidiomórficos dispersos, associados ao clinopiroxênio da matriz e geralmente de tamanho maior que este. Quando em sua forma prismática é rica em inclusões fluídas, geralmente orientadas paralelamente ao eixo cristalográfico c (Figura 4-10D).

Uma característica interessante de alguns destes enclaves é a presença de pseudomorfos de macrocristais de piroxênio constituídos por uma associação mineralógica peculiar: clinopiroxênio verde-pálido, flogopita, carbonato, magnetita e zeólitas, distribuídos em um arranjo zonal concêntrico, contendo clinopiroxênio rosado idiomórfico no núcleo (Figura 4-10C).



A: Amostra PPE-7Ab. Luz plano-polarizada. Borda do enclave máfico-ultramáfico com a rocha hospedeira. A porção do enclave na borda inferior esquerda da foto corresponde a uma parte rompida do enclave. Lado maior da foto = 10,2mm.



B: Amostra PPE-33. Luz plano-polarizada. Enclave máfico-ultramáfico "porfirítico". Titanita idiomórfica com forte zoneamento núcleo-borda. Notar as diminutas inclusões de apatita. Lado maior da foto = 0,32 mm.



C: Amostra PPE-7Aa. Luz plano-polarizada. Enclave máfico-ultramáfico "porfirítico". Pseudomorfo de clinopiroxênio com acúmulo de magnetita, clinopiroxênio verde-oliva e flogopita ao seu redor. Lado maior da foto = 10,2mm.



D: Amostra PPE-7Aa. Luz plano-polarizada. Matriz do enclave máfico-ultramáfico com megacristal de apatita subidiomórfica. Lado maior da foto = 3,2 mm.

Figura 4-10: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos.

A borda destes enclaves, além de possuir granulação mais fina, apresenta maior abundância relativa de clinopiroxênio verde e minerais opacos, deixando-a macroscopicamente mais escura (observadas em alguns destes enclaves, e.g. Figura 4-8C).

À parte dos enclaves tipicamente "porfiríticos", existem os enclaves máficos-ultramáficos que não possuem macrocristais, porém são raros. Estes enclaves comumente têm textura e composição semelhante à matriz dos "porfiríticos".

Apenas um dos enclaves máficos amostrados denotou características totalmente distintas dos demais. Ele é mais homogêneo, sem porções ultramáficas, equigranular de granulação fina, entre 0,2 e 0,7 mm (em geral ao redor de 0,4 mm) (Figura 4-11A).

A mineralogia é caracterizada por clinopiroxênio e feldspato alcalino como minerais essenciais, distribuídos regularmente, e apatita, magnetita, titanita e flogopita como principais fases acessórias. Os minerais essenciais definem uma textura em "mosaico", com

contato intergrãos ora lineares, ora curvilíneas, ora em cúspides suaves ou mesmo suturados, sugerindo recristalização da mineralogia primária (Figura 4-11B). Outra característica interessante é o fato de não possuir nefelina.

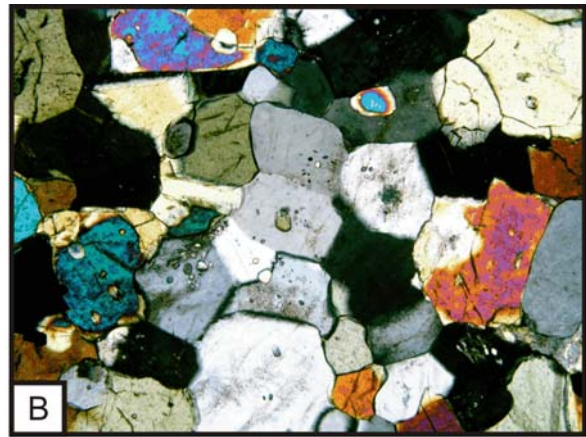
Apenas uma geração de clinopiroxênio, com tonalidade verde-oliva, está presente. Ele apresenta pleocroísmo similar ao do clinopiroxênio verde descrito para os demais enclaves, porém em tons de verde mais claro, leve zoneamento, no qual a borda do cristal possui tonalidades de verde mais escuro do que o núcleo, mas alguns cristais que ocorrem junto ao contato com o sienito hospedeiro possuem zoneamento mais forte (Figura 4-11A). Em geral aparece límpido ou com algumas inclusões de titanita, flogopita e magnetita, mais comuns nas bordas dos cristais.

O feldspato alcalino é xenomórfico, apresentando-se sempre com aspecto “sujo” dado por alteração. Os minerais acessórios são subidiomórficos a idiomórficos, com dimensões entre 0,02 e 0,2 mm. Apresentam características ópticas e texturais bem similares às descritas no caso anterior. Os prismas maiores de apatita mostram também bom número de inclusões fluídas orientadas segundo o eixo c cristalográfico (Figura 4-11C).

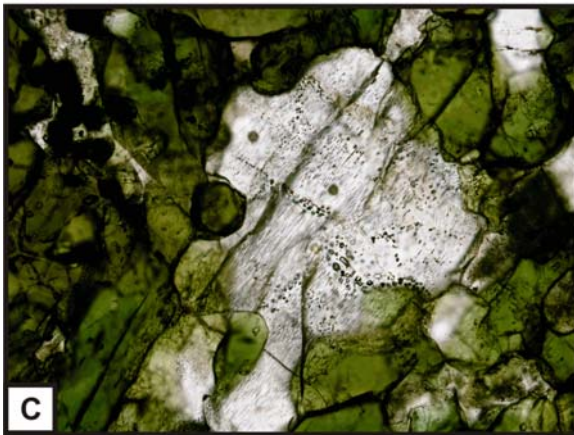
Nas proximidades do contato entre o enclave e a hospedeira, observa-se uma zona de granulação mais fina, com maior concentração de pequenos grãos xenomórficos (em torno de 0,01 mm) do clinopiroxênio verde (Figura 4-11D), que lembra em parte a matriz dos enclaves máfico-ultramáficos anteriormente descritos.



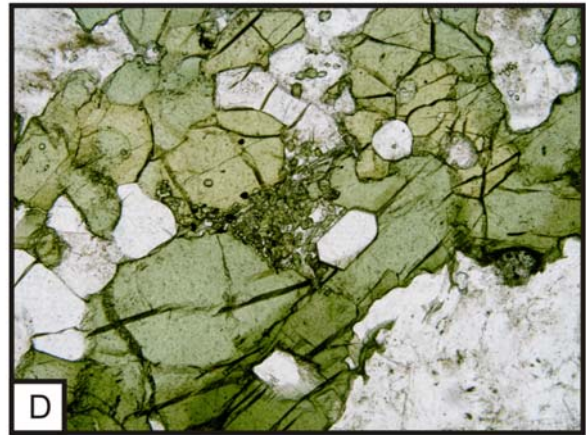
A: Amostra PPE-5Bb. Luz plano-polarizada. Enclave máfico equigranular, fernerítico fino. Notar como o clinopiroxênio deste tipo de enclave possui tons mais suaves de verde-oliva e mais intensos quando em contato com a rocha hospedeira. Lado maior da foto = 3,2mm.



B: Amostra PPE-5Bb. Polarizadores cruzados. Enclave máfico equigranular. Notar o contato linear entre os cristais de feldspato alcalino (baixa birrefringência), clinopiroxênio (com clivagem e maior birrefringência) e apatita (baixa birrefringência, relevo distinto). Lado maior da foto = 1,3mm.



C: Amostra PPE-5Bb. Luz plano-polarizada. Enclave máfico equigranular. Cristal xenomórfico de apatita com inúmeras inclusões fluidas. Lado maior da foto = 1,3mm.



D: Amostra PPE-5Bb. Luz plano-polarizada. Enclave máfico equigranular. Clinopiroxênio verde e apatita (incolor, prismática de relevo mais alto). Intersticial a estes agregado muito fino de clinopiroxênio verde xenomórfico. Lado maior da foto = 1,3mm.

Figura 4-11: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais dos enclaves microgranulares máficos equigranulares.

4.2.3 Diques e Outras Estruturas

Não raramente, diques de aspecto “aplítico” ocorrem no nefelina sienito de granulação mais grossa. Macroscopicamente são cinza mais claro de textura fernerítica muito fina, equigranular (Figura 4-12A). Seu contato com a hospedeira é abrupto, porém irregular (Figura 4-12B). É interessante notar que fragmentos rompidos, angulosos ou subarredondados, destes diques são comumente encontrados próximo à zona de contato com a rocha. Os contatos irregulares com a rocha encaixante e os fragmentos englobados pela mesma sugerem que a colocação destes diques deu-se quando a rocha ainda tinha capacidade de movimentação, caracterizando-os como diques sin-plutônicos.



A: Amostra PPE-21. Dique fonolítico. De cor cinza mais claro do que os nefelina sienitos e textura fanerítica muito fina. Escala gráfica corresponde a 1cm.



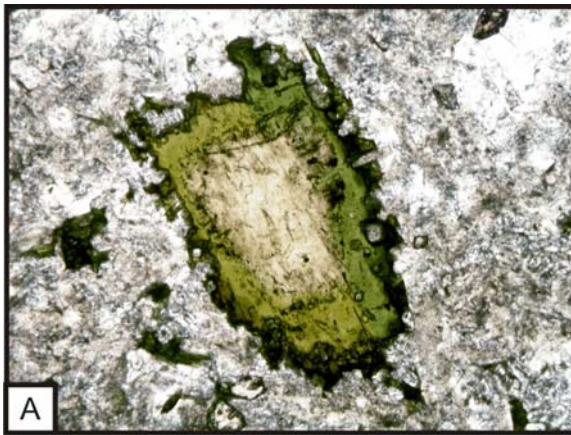
B: Dique fonolítico *in situ*. Observar contato irregular com a rocha encaixante (em vermelho).

Figura 4-12: Fotografias que compreendem as principais feições macroscópicas dos diques fonolíticos.

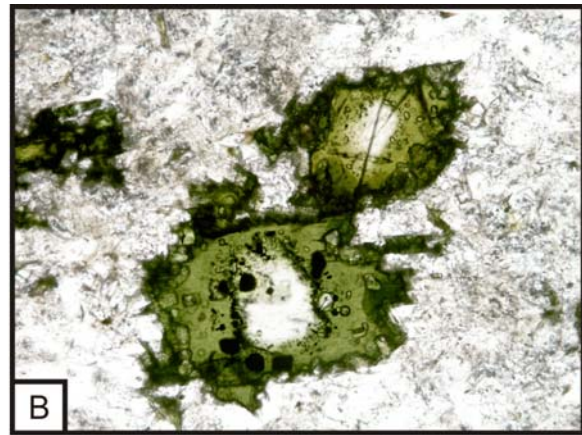
Ao microscópio petrográfico os diques são mineralógica e texturalmente semelhantes aos enclaves félsicos. Possuem assim como nos nefelina sienitos são distinguidas duas gerações de clinopiroxênios: uma rósea/incolor ou verde-oliva prismáticas e uma verde-oliva fibrosa. Os cristais róseos/incolores são bordejados pela variedade verde-oliva prismática, esta, por sua vez, poiquilítica, com inclusões de nefelina e magnetita (Figura 4-13A e B). A geração fibrosa está associada aos minerais opacos e zeólitas.

Feldspato alcalino e nefelina compõem uma trama pseudo-foiaítica de granulação muito-fina. O feldspato alcalino é poiquilítico, com inclusões de nefelina. O contato entre os grãos de feldspato pode ser suturado, as vezes interlobado.

A mineralogia acessória é comum a do nefelina sienito de granulação mais grossa: magnetita, titanita e zeólita. A magnetita e a titanita tendem a se agregar ao clinopiroxênio prismático enquanto o clinopiroxênio fibroso e a zeólita ocorrem nos interstícios da trama foiaítica.



A: Amostra PPE-21. Luz plano-polarizada. Clinopiroxênio róseo bordejado pela variedade verde-oliva. Lado maior da foto = 2mm.



B: Amostra PPE-21. Luz plano-polarizada. Clinopiroxênio incolor bordejado pela variedade verde-oliva. Notar as inúmeras inclusões da interface incolor/verde destes cristais. Lado maior da foto = 1,05mm.

Figura 4-13: Fotomicrografias que compreendem as principais características texturais dos diques fonolíticos.

Venulações e bolsões micro-pegmatíticos, constituídos principalmente por feldspato alcalino tabular e egirina prismática a fibrorradiada, ocorrem com certa frequência no nefelina sienito de granulação média-grossa a grossa. Apresentam extensões centimétricas a decimétricas e espessuras milimétricas a centimétricas e são caracterizados pela formas irregulares, sinuosas, indicando que a rocha encaixante ainda tinha capacidade de movimentação plástica (Figura 4-14A e B). Localmente estas venulações apresentam cavidades miarolíticas preenchidas por minerais hidrotermais, especialmente zeólitas.



Figura 4-14: Venulações preenchidas por feldspato alcalino, zeólitas e egirina. De cor mais clara que o nefelina sienito. *In situ*.

5 QUÍMICA MINERAL

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os dados obtidos para minerais por microsonda eletrônica e LA-ICPMS. Através da microsonda eletrônica foram obtidas imagens BSE-Compo e os elementos maiores e menores foram quantificados por WDS para as principais fases minerais (clinopiroxênio, titanita, opacos, biotita/flogopita, apatita, nefelina e feldspato alcalino) presentes nas diferentes fácies de nefelina sienito, nos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos e nos félsicos. Através de LA-ICPMS foram quantificados elementos traços em clinopiroxênio, titanita e apatita para estes litotipos.

5.1 Elementos maiores e menores

5.1.1 Clinopiroxênio

Os resultados analíticos do clinopiroxênio estão apresentados na Tabela 1/Anexo II.

O clinopiroxênio é um dos minerais máficos mais importantes e comuns em rochas ígneas. Sua estrutura é formada por cadeias simples de tetraedros de SiO_4 , interligados pelos vértices, onde pequena parte do Si pode ser substituída por Al. Sua fórmula química geral é: $\text{M}_2\text{M}_1\text{T}_2\text{O}_6$. O sítio M2 compreende os cátions em coordenação octaédrica distorcida (como Mg, Fe^{2+} , Mn, Li, Ca e Na), o M1 compreende cátions de coordenação octaédrica regular (como Al, Fe^{3+} , Ti, Cr, V, Zr, Sc, Zn, Mg, Fe^{2+} e Mn) e T compreende cátions de coordenação tetraédrica (Si, Al e Fe^{3+}). A ocupação dos sítios por estes cátions, entretanto, se dá, em parte, através da temperatura (Morimoto, 1988).

Nas rochas estudadas os piroxênios compreendem variedades de Ca-Mg-Fe, cálcico-sódicas e sódicas, o que permite que sejam plotados no diagrama Q-J e posteriormente classificados no diagrama Quad ou no Jd-WEF-Eg (ver Figura 5-1).

5.1.1.1 Nefelina sienitos

Os nefelina sienitos possuem duas gerações texturais distintas de piroxênios, uma prismática, outra fibrosa, ambas verdes (ver item 4.1). Estas gerações se diferem quimicamente também. Os piroxênios prismáticos possuem forte zoneamento concêntrico, gradando de núcleos magnésio-cálcicos para bordas sódicas, enquanto os fibrosos são estritamente sódicos, com baixos teores de cálcio (Figura 5-2).

Estes dados evidenciam a evolução da cristalização dos piroxênios destas rochas, de diopsídio (mais incolor), egrina-augita, até egrina quase pura (verde-forte). Dados semelhantes a estes foram obtidos por Ulbrich (1983) em sua Tese de Doutorado,

porém como se observa na Figura 5-3 a autora não obteve composições tão extremas em Mg e Na.

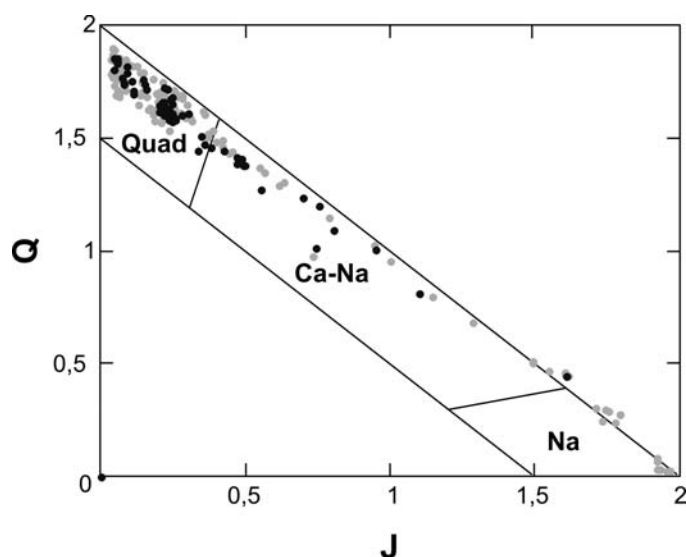


Figura 5-1: Diagrama Q-J ($Q = Ca+Mg+Fe^{2+}$ e $J = 2Na$) indicando todas as análises obtidas de clinopiroxênios dos nefelina sienitos, enclaves e diques fonolíticos, classificando-os em variedades Quad, cálcico-sódicas e sódicas. Símbolos em cinza representam análises obtidas anteriormente por Ricardi (2006) e símbolos pretos representam as deste trabalho.

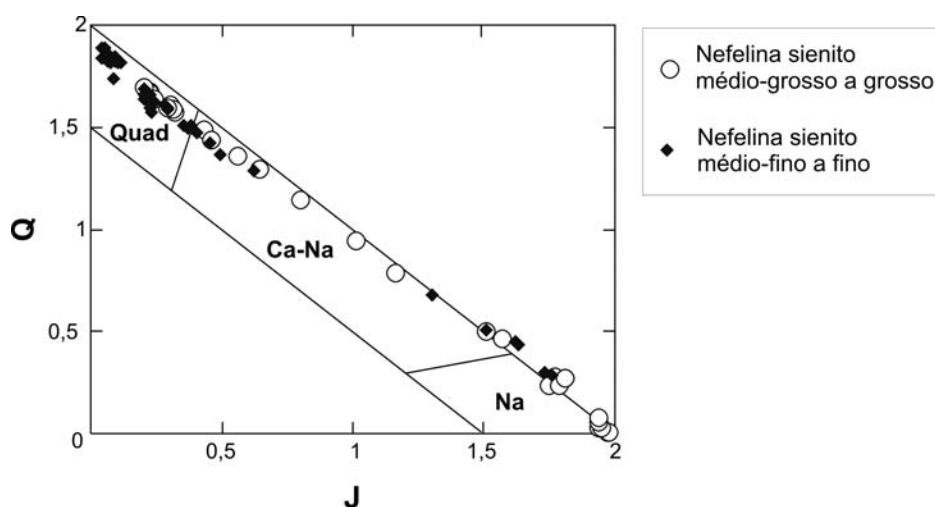


Figura 5-2: Diagrama Q-J ($Q = Ca+Mg+Fe^{2+}$ e $J = 2Na$) indicando as análises por WDS obtidas de clinopiroxênios das diferentes fácies de nefelina sienitos, classificando-os em variedades Quad, cálcico-sódicas e sódicas.

O extremo magnesiano, no diagrama da Figura 5-3, corresponde ao núcleo rosado/incolor do piroxênio prismático, e classificado como diopsídio. Este núcleo de coloração mais fraca apresenta índice $mg\#$ [$Mg/(Mg+Fe^{2+})$] em torno de 0,7 e pode chegar a 1,0 no caso do mais incolor. O termo mais egírinico, da borda do piroxênio prismático e do fibroso, tem este índice em torno de 0,2 e coloração verde-forte. Os piroxênios com núcleos

incolores são mais recorrentes na fácies de granulação mais fina do que na mais grossa destes sienitos.

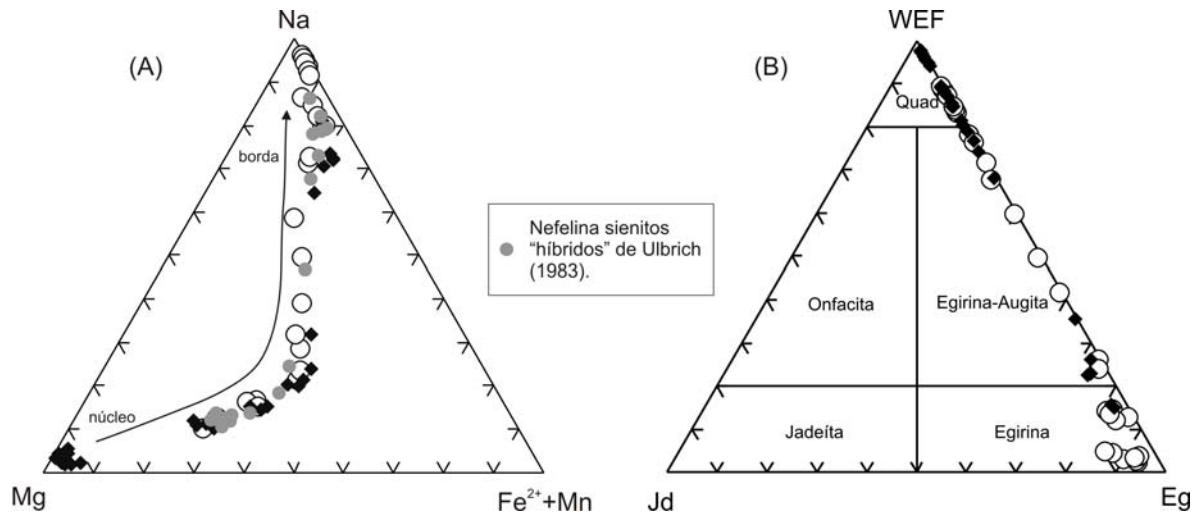


Figura 5-3: (A) Diagrama ternário Mg-Na-(Fe²⁺+Mn) para os piroxênios dos nefelina sienitos, comparados com os dados obtidos por Ulbrich (1983) para os nefelina sienitos “híbridos” (nomenclatura dada pela autora para o conjunto de rochas a qual pertencem os nefelina sienitos aqui estudados). (B) Composição catiônica dos piroxênios dos nefelina sienitos através do diagrama ternário WEF-Jd-Eg.

Nos piroxênios prismáticos, do núcleo para a borda, o teor de CaO decresce consideravelmente (24,4-2,7%, em peso), assim como o MgO (15,7-0,6%) e o Al₂O₃ (3,4-0,7%), com o conseqüente aumento de Na₂O (0,3-11,7%), Fe₃O₂^c (calculado, 3,6-24,1%) e ZrO₂ (0-0,9%) (ver Figura 5-6). O Cr₂O₃ tem variação mais complexa e geralmente está presente em maior teor nas proximidades do núcleo mais incolor (0,5 %) com a zona verde destes piroxênios e não está presente nesta. O TiO₂ e o ZrO₂ têm sua maior concentração nas bordas destes cristais, zona de maior pleocroísmo.

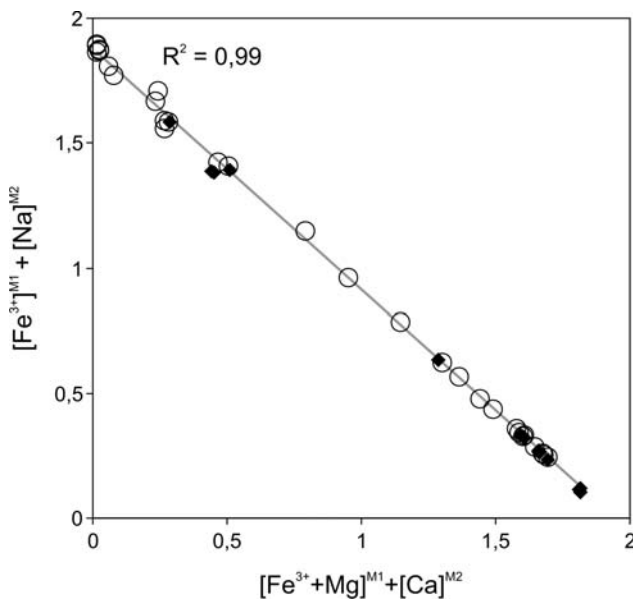


Figura 5-4: Diagrama mostrando a correlação entre Fe³⁺ + Na por Ca + Fe²⁺ + Mn + Mg para os clinopiroxênios das rochas sieníticas. Observar a excelente correlação, com elevado coeficiente de determinação.

De uma maneira geral o piroxênio da fácies mais grossa possui teores mais elevados de Na e mais baixos de Mg do que o da fácies mais fina.

A principal substituição catiônica que se observa nestes piroxênios é a de Ca (sítio catiônico M1), Fe^{2+} , Mn e Mg (M2) por Fe^{3+} (M1) e Na (M2), com correlação quase perfeita (ver Figura 5-4).

A cor verde-forte destes piroxênios provavelmente está associada ao alto teor de Fe^{3+} .

Os cristais de clinopiroxênio dos glomérulos máficos, presentes na variedade de granulação mais fina de nefelina sienito, possuem as mesmas características ópticas e texturais em relação aos cristais dos enclaves máfico-ultramáficos. O núcleo dos cristais maiores, incolor, possui maior concentração de Mg e Ca, enquanto a borda possui maior de Na e Fe^{3+} . São classificados como diopsídio, chegando a egirina-augita na borda (Figura 5-5).

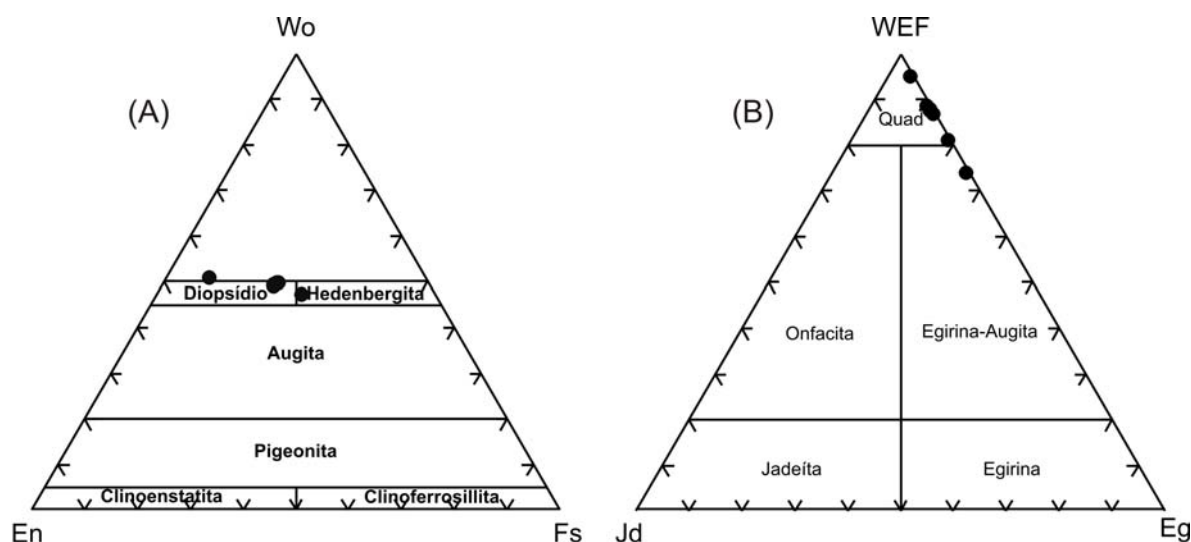


Figura 5-5: (A) Diagrama composicional ternário para classificação dos piroxênios dos glomérulos máficos, expresso por moléculas de Wo-En-Fs (wollastonita, enstatita e ferrossilita ou WEF). (B) Diagrama ternário expresso em moléculas de WEF-Jd-Eg (jadeíta e egirina).

5.1.1.2 Enclaves microgranulares félsicos

Podem ser diferenciadas duas gerações de clinopiroxênio nos enclaves microgranulares félsicos. A primeira geração é prismática e possui zoneamento de diopsídio (incolor/róseo) no núcleo para egirina-augita (verde) na borda. Seu zoneamento é semelhante aquele dos cristais de núcleo róseo/incolor e borda verde do nefelina sienito fino, porém mais sutil. A segunda geração é composta por cristais primáticos menores ou fibrosos, de coloração verde-oliva intenso, classificados como egirina-augita.

A seguir, na Figura 5-7, tem-se o diagrama Q-J para classificação dos piroxênios. Notar como o clinopiroxênio dos aglomerados máficos possuem menor teor de Na.

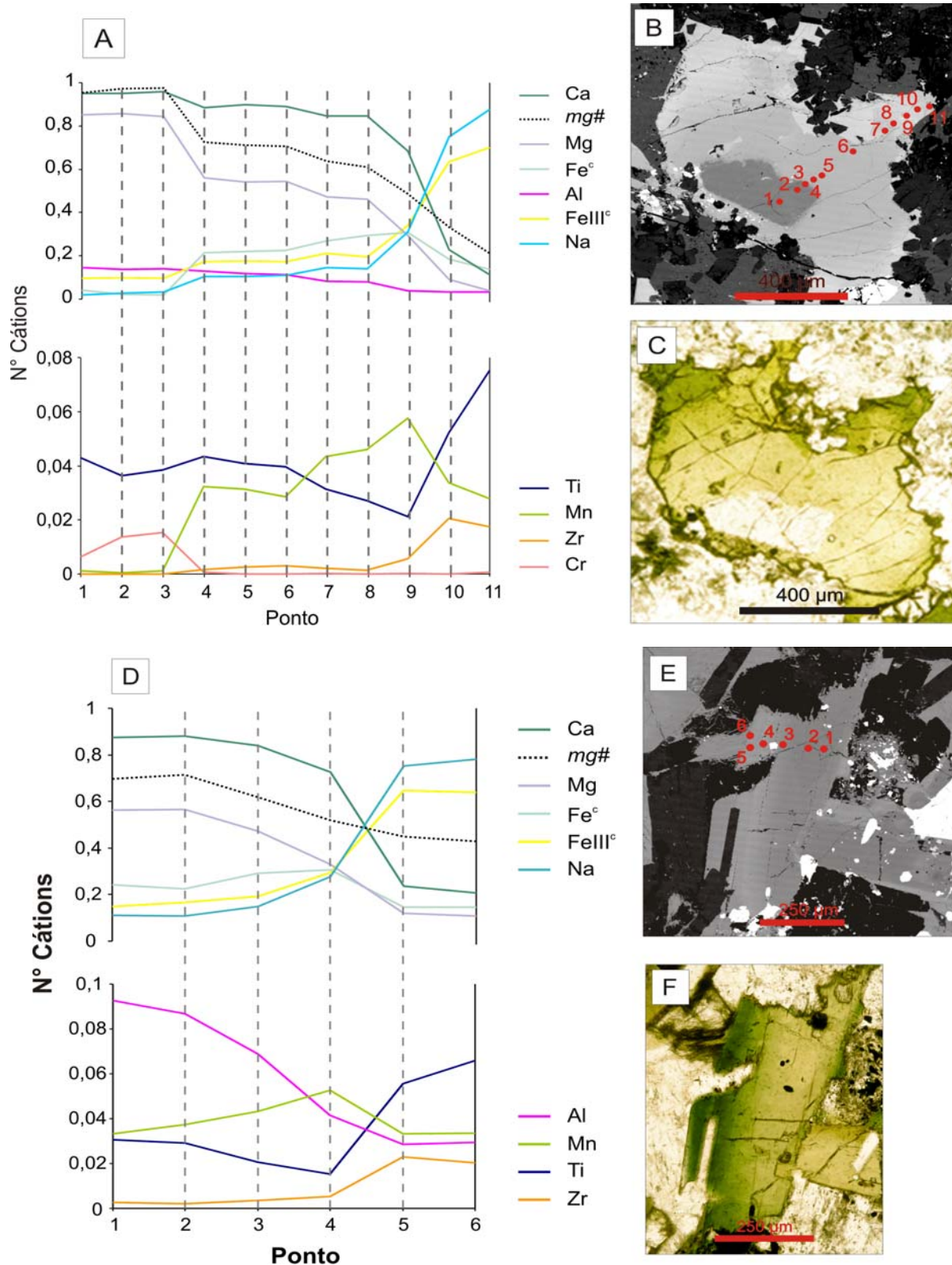


Figura 5-6: Análises por WDS de clinopiroxênio das amostras PPE-6b (nefelina sienito médio-fino a fino) e PPE-8A (nefelina sienito médio-grosso a grosso). Diagramas mostrando a variação de número de cátions por cela unitária (cpfu) por ponto do perfil núcleo-borda dos cristais, (A) da amostra PPE-6b, (D) da PPE-8A. Imagens BSE-Compo com localização dos pontos analisados nos cristais, (B) da PPE-6b, (E) da PPE-8A. Fotomicrografia com luz plano-polarizada, (C) da PPE-6b, (F) da PPE-8A.

Nos cristais prismáticos de núcleo róseo/incolor do enclave félsico, do núcleo para a borda, o teor de CaO decresce sutilmente (24,1-21%, em peso), assim como o MgO (14-9%)

e o Al_2O_3 (5,2-2,2%), com o consequente aumento de Na_2O (0,3-1,9%), Fe_3O_2^c (3,4-7%) e FeO (1,3-8,3%). Os teores de Cr_2O_3 e TiO_2 são pouco expressivos e estes óxidos estão em maior concentração no núcleo destes cristais (Figura 5-9). O clinopiroxênio dos agregados máficos são mais magnesianos (Figura 5-8).

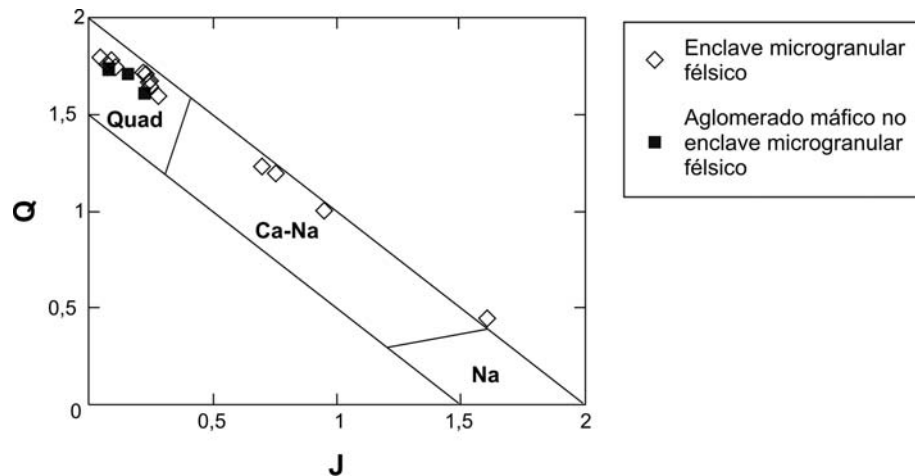


Figura 5-7: Diagrama Q-J ($Q = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$ e $J = 2\text{Na}$) indicando as análises por WDS obtidas de clinopiroxênio dos enclaves microgranulares félsicos, da matriz dos aglomerados máficos destes enclaves e do dique fonolítico, classificando-os em variedades Quad, cálcico-sódicas e sódicas

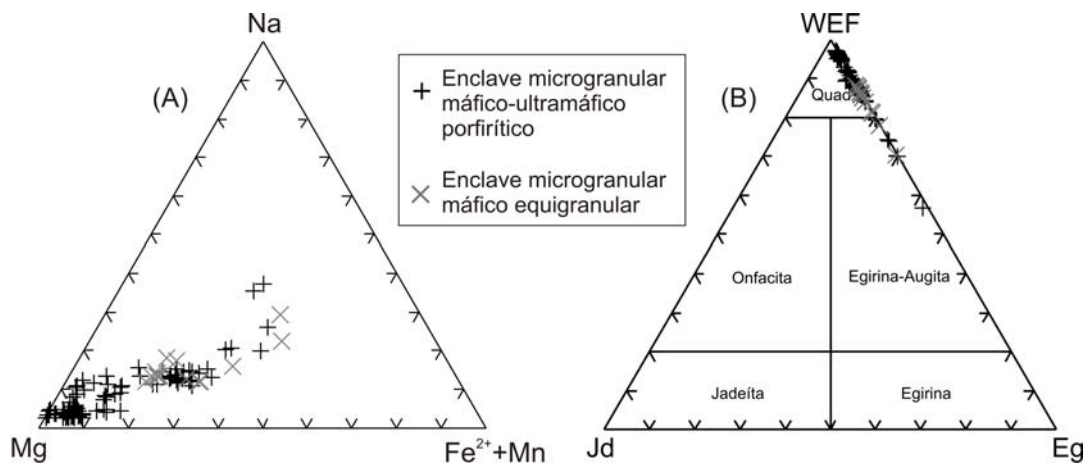


Figura 5-8: Diagramas ternários para o clinopiroxênio dos enclaves microgranulares félsicos, de seus aglomerados máficos e do dique fonolítico. (A) Diagrama Mg-Na-($\text{Fe}^{2+} + \text{Mn}$) e (B) Diagrama expresso em moléculas de WEF-Jd-Eg (wollastonita, enstatita e ferrossilita, jadeíta e egrina).

5.1.1.3 Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos

Os enclaves máfico-ultramáficos possuem duas gerações distintas de piroxênios (ver item 4.2), a primeira corresponde aos macrocristais róseos e/ou incolores, idiomórficos a subidiomórficos, com borda verde xenomórfica, a segunda aos cristais verdes, xenomórficos, da matriz. Estes piroxênios possuem zoneamento composicional mais restrito em relação aos dos nefelina sienitos, e são classificados como diopsídio, tendo Ca e Mg como principais cátions presentes nos sítios M2 e M1, respectivamente (ver Figura 5-10).

Nota-se também que as bordas destes piroxênios possuem teores muito inferiores de Na em relação aos da rocha encaixante.

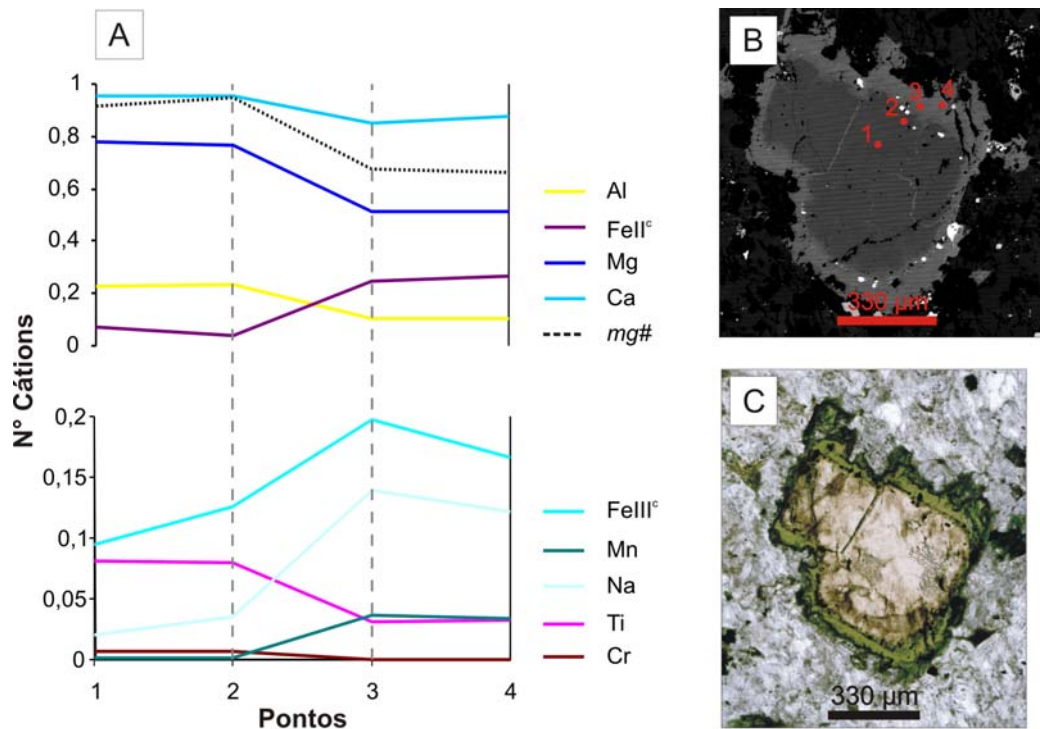


Figura 5-9: Análises por WDS de clinopiroxênio da amostra PPE-31 (enclave microgranular félsico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpfú por ponto do perfil núcleo-borda do cristal. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.

A seguir, na Figura 5-10, tem-se as análises para o clinopiroxênio dos enclaves máficos plotadas no diagrama Q-J. O clinopiroxênio destes enclaves é estritamente magnésio-cálcico, porém este torna-se Na-Ca quando em contato com o nefelina sienito (Figura 5-11).

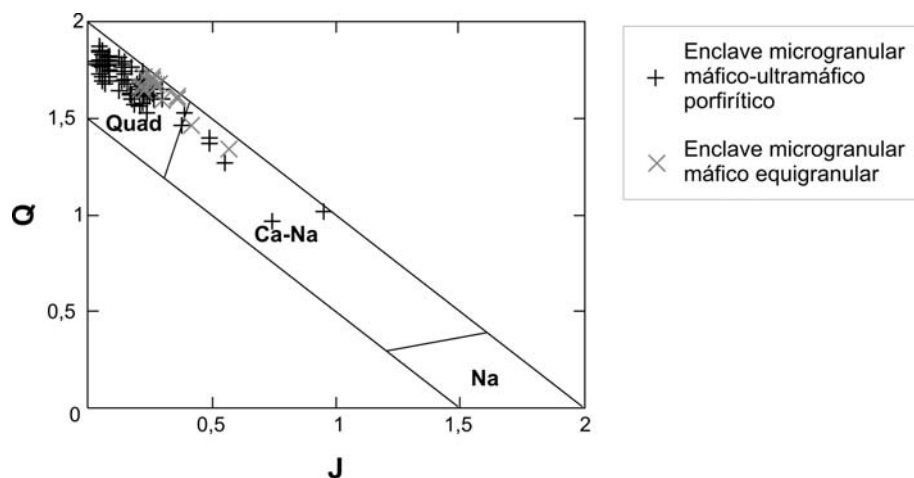


Figura 5-10: Diagrama Q-J ($Q = Ca+Mg+Fe^{2+}$ e $J = 2Na$) indicando as análises por WDS obtidas de clinopiroxênio dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos porfíriticos e dos máficos equigranulares, classificando-os em variedades Quad, cálcico-sódicas e sódicas.

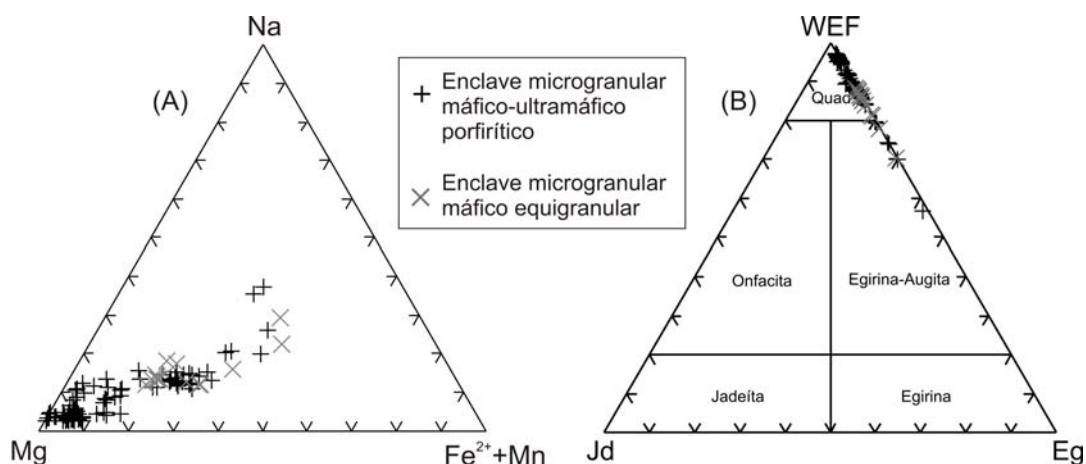


Figura 5-11: Diagramas ternários para o clinopiroxênio dos enclaves microgranulares félsicos, de seus aglomerados máficos e do dique fonolítico. (A) Diagrama Mg-Na-(Fe²⁺+Mn) e (B) Diagrama expresso em moléculas de WEF-Jd-Eg (wollastonita, enstatita e ferrossilita, jadeíta e egirina).

Os macrocristais de clinopiroxênio, principalmente os róseos, são caracterizados por possuírem alto teor de TiO₂, o qual pode chegar a 4,2% (em peso) e em média possuem 2,6%. Classificando-os como “diopsídio com Ti”, nomenclatura esta proposta por Morimoto (1988). Do núcleo para a borda, estes clinopiroxênios têm zoneamento marcado pelo decréscimo de MgO (16,3 – 9,3%), de CaO (23,8 – 21,0%) e de Cr₂O₃ (0,27 – 0%), este último com teores maiores nas zonas incolores, e conseqüente aumento de Na₂O (0,3 – 1,8%), Fe₂O₃^c (3,2 – 6,8%) e MnO (0,04 – 1,02%). O ZnO está presente em pequenas quantidades, com distribuição irregular, em média de 0,04%. O Al₂O₃ está presente em maior teor nas zonas róseas (em média 6,0%) e em menor teor tanto nas zonas incolores quanto nas verdes (em média 3,3%). O índice mg# é em média 0,92 (ver Figura 5-12A).

Na Figura 5-12 (A, B e C) observa-se que o Ti, juntamente com o Al, está em maior quantidade somente na zona rósea do cristal, enquanto na zona incolor e na verde está em menor quantidade.

Assim como os macrocristais, os piroxênios da matriz são classificados como diopsídio, gradando para augita e seu zoneamento é muito sutil. Estes piroxênios possuem composição semelhante à zona verde da borda dos macrocristais e possuem teores menores de TiO₂ (1,3% em peso, em média) comparados aos macrocristais. Os cristais da matriz dos enclaves máfico-ultramáficos possuem composição semelhante aos encontrados nos agregados máficos presentes do nefelina sienito mais fino.

Observa-se na Figura 5-12B que nas zonas mais escuras da imagem, têm-se menor quantidade de Fe²⁺, Fe³⁺ e Mn, ao passo que as zonas mais claras estes cátions estão em maior quantidade e Mg, Ti e Ca em menor.

Os cristais de clinopiroxênio do enclave máfico equigranular são verdes, xenomórficos, com características de recristalização (como textura em “mosaico”), mais homogêneos, porém possuem forte zoneamento quando em contato com a rocha

encaixante, adquirindo assim composição mais sódica (Figura 5-12F). Estes são classificados como diopsídio-hedenbergita e augita, gradando para egrina-augita, na borda do cristal em contato com a rocha encaixante.

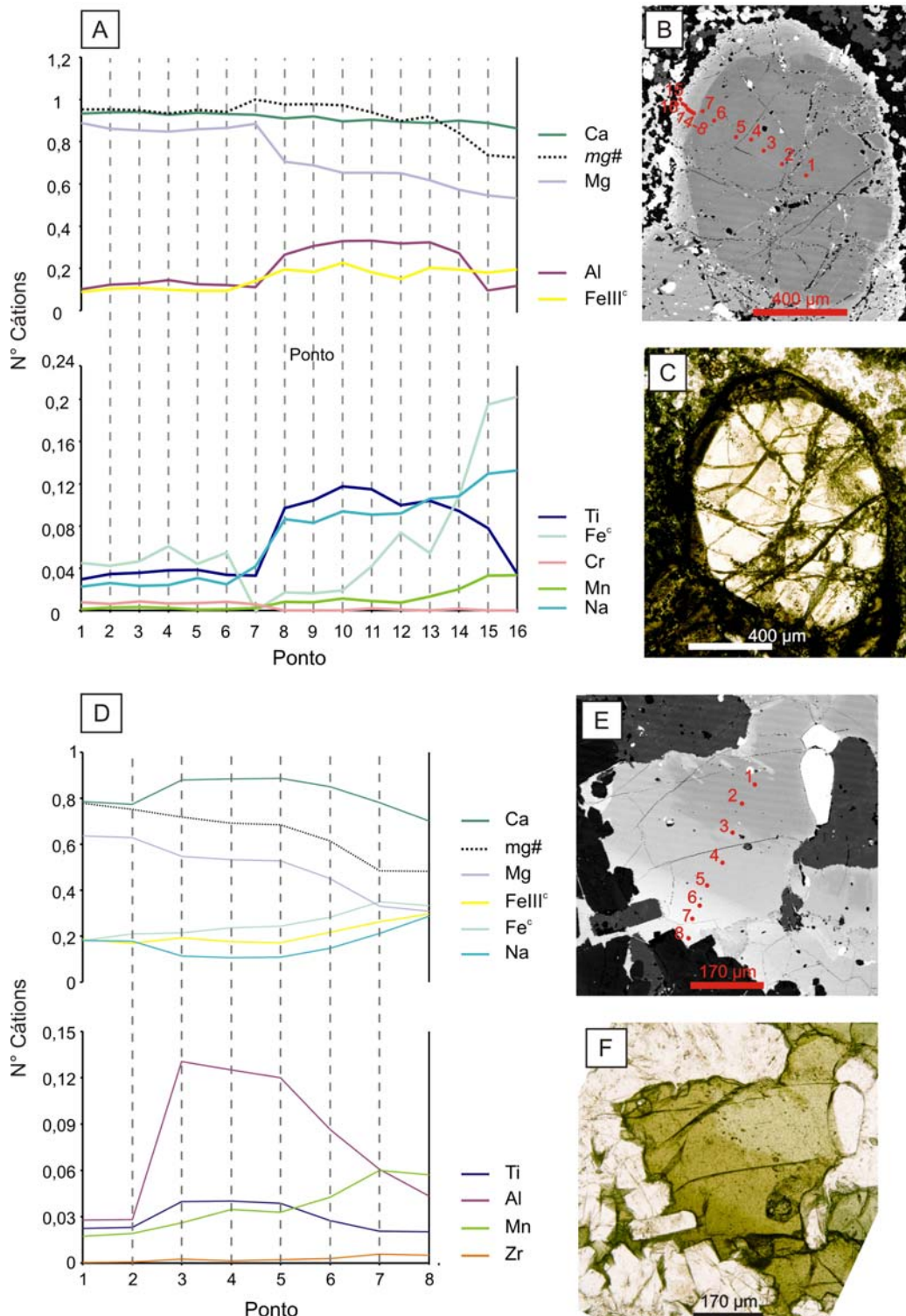


Figura 5-12: Análises por WDS de clinopiroxênio das amostras PC-19 (enclave microgranular máfico-ultramáfico porfíritico) e PPE-5Bb (enclave microgranular máfico equigranular). Diagramas mostrando a variação de número de cpfu por ponto do perfil núcleo-borda dos cristais, (A) da amostra PC-19, (D) da PPE-5Bb. Imagens BSE-Compo com localização dos pontos analisados nos cristais, (B) da PC-19, (E) da PPE-5Bb. Fotomicrografia com luz plano-polarizada, (C) da PC-19, (F) da PPE-5Bb.

O diopsídio do interior deste enclave é mais homogêneo, com teores quase constantes. Possui, em média, 1,8% (em peso) de Na₂O, 21,2% de CaO, 12,1% de MgO, 0,5% de MnO, 5,3% de Fe₂O₃^c e 5,6% de FeO (estes dois últimos calculados). Adicionalmente possui 1% de TiO₂, 0,9% de Al₂O₃ e 0,1% de ZrO₂. Quando em contato com a rocha encaixante, o piroxênio tende a ficar com cor verde mais forte e nas imagens BSE-Compo, os tons de cinza ficam mais claros. Nestas bordas, são mais altos os teores médios de Fe₂O₃^c (10,1%), FeO (10,2%), MnO (1,7%), Na₂O (3,8%) e ZrO₂ (0,3%) e mais baixos os de TiO₂ (0,7%), MgO (5,3%) e CaO (16,8%) (Figura). O índice mg# é, em média, de 0,8 para o diopsídio comum do interior do enclave e 0,5 para o da borda com a rocha encaixante (Figura 5-12D, E e F).

5.1.2 Titanita

Titanita é um mineral de relativa importância, pois está presente nos sienitos e nos enclaves microgranulares félsicos e é abundante nos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos, como parte da matriz.

Tem como fórmula geral: CaTi[SiO₄](O,OH,F), onde o Ca pode ser substituído por Na, terras raras, Mn, Sr* e Ba*; o Ti pode ser substituído por Al, Fe³⁺, Fe²⁺, Mg, Nb, Ta*, V* e Cr*; e o O pode ter um quinto de seu conteúdo substituído por (OH, F*). Estas substituições se dão pelo fato da estrutura da titanita conter tetraedros independentes de silício-oxigênio, com grupos de [CaO₇] e [TiO₆] (Deer et al. 1966). Neste trabalho, os elementos marcados com asterisco não foram analisados. Entre os elementos terras raras (ETR) foram analisados La, Ce, Nd, Sm, Gd e Y; adicionalmente foi analisado Zr, elemento que aparece em quantidades relativamente elevadas em algumas amostras. Todo o ferro foi considerado como Fe³⁺.

Os resultados analíticos obtidos para a titanita são apresentados na Tabela 2/Anexo II. As principais variações químicas encontradas podem ser explicadas pelas substituições mencionadas anteriormente.

5.1.2.1 Nefelina sienitos

A titanita dos nefelina sienitos destas rochas é idiomórfica, de hábito prismático típico “navicular”, com pleocroísmo forte do róseo pálido amarelado ao róseo amarronzado (Figura 5-13C). Possui notável zoneamento químico concêntrico que em imagens BSE-Compo apresenta-se com núcleo de tonalidades mais claras e bordas mais escuras, com finas intercalações destes tons (ver Figura 5-13B). As zonas mais claras possuem maior teor de Nb₂O₅ (1,2%, em média), enquanto estes teores são mais baixos nas zonas mais escuras (0,8% de Nb₂O₅) (Figura 5-13).

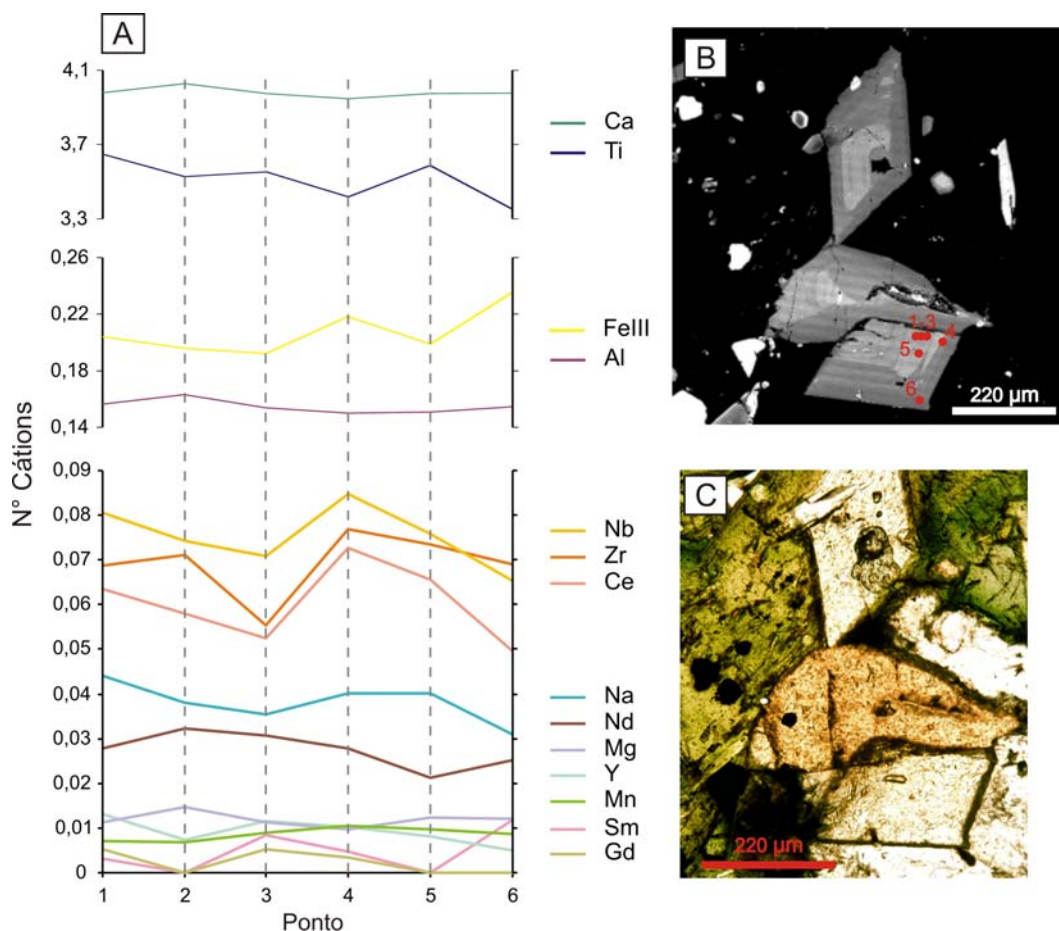


Figura 5-13: Análises por WDS de titanita da amostra PPE-8A (nefelina sienito médio-grosso a grosso). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpfu. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.

Os óxidos de ETR estão distribuídos de forma irregular e somando tem-se 2,1%, em média, de teor nestas titanitas. Dentre os óxidos de ETR destaca-se o Ce_2O_3 , chegando a teores de 1,5% em peso na amostra PPE-8A (nefelina sienito mais grosso). La_2O_3 e Sm_2O_3 têm maior concentração nas bordas do cristal, porém não ultrapassam 0,4% e 0,25%, respectivamente. ZrO_2 , Y_2O_3 e Nd_2O_3 têm sua distribuição de certa forma homogênea, e estão presentes com média de 1,03%, 0,14% e 0,57%, respectivamente.

Na_2O e MnO possuem teores muito baixos (ambos 0,1% em peso, em média) e o teor de MgO beira o limite de detecção (0,04% em média).

A titanita do nefelina sienito mais fino tende a ser mais homogênea. Os teores de óxidos não têm variação expressiva. Nele, o teor de ZrO_2 , Nb_2O_5 e Fe_2O_3 tende a ser pouco mais baixo e o de Al_2O_3 mais alto do os da titanita do nefelina sienito mais grosso.

5.1.2.2 Enclaves microgranulares félsicos

A titanita dos enclaves microgranulares félsicos é subidiomórfica a idiomórfica, de hábito navicular, com pleocroísmo bem marcado por tonalidades róseas/amareladas. Não

possui zonalidade evidente, aparecendo com tons de cinza muito próximos na imagem BSE-Compo. Composicionalmente é mais parecida com as titanitas do nefelina sienito mais fino.

Assim como nos nefelina sienitos, Ce_2O_3 destaca-se pelo maior teor dentre os ETR (em média 1,3%, em peso). Do núcleo para a borda há diminuição do teor de flúor, ZrO_2 e Nb_2O_5 e aumento de Nd_2O_3 . A maioria dos elementos tem sua distribuição caótica.

5.1.2.3 Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos

A titanita deste tipo de enclave ocorre incorporada à matriz, de forma subidiomórfica a xenomórfica, comumente com aspecto poiquilítico. Não raramente estão associadas aos opacos e bordas verdes dos macrocristais de diopsídio. São zonadas, com o núcleo de tonalidade mais escura e borda mais clara em imagem BSE-Compo, porém com uma fina intercalação entre tons claros e escuros (ver Figura 5-14). Este zoneamento maior é marcado pelo decréscimo, da borda para o núcleo, dos teores de ZrO_2 (1,0 – 0,13% em peso) Nb_2O_5 (0,79 – 0,37%) La_2O_3 (0,24 – 0,02%) Ce_2O_3 (0,7 – 0,03%). O teor de óxidos de ETR nestes enclaves é em média de 0,57% e não ultrapassa 1,3%, estes valores são muito menores em relação aos da rocha encaixante.

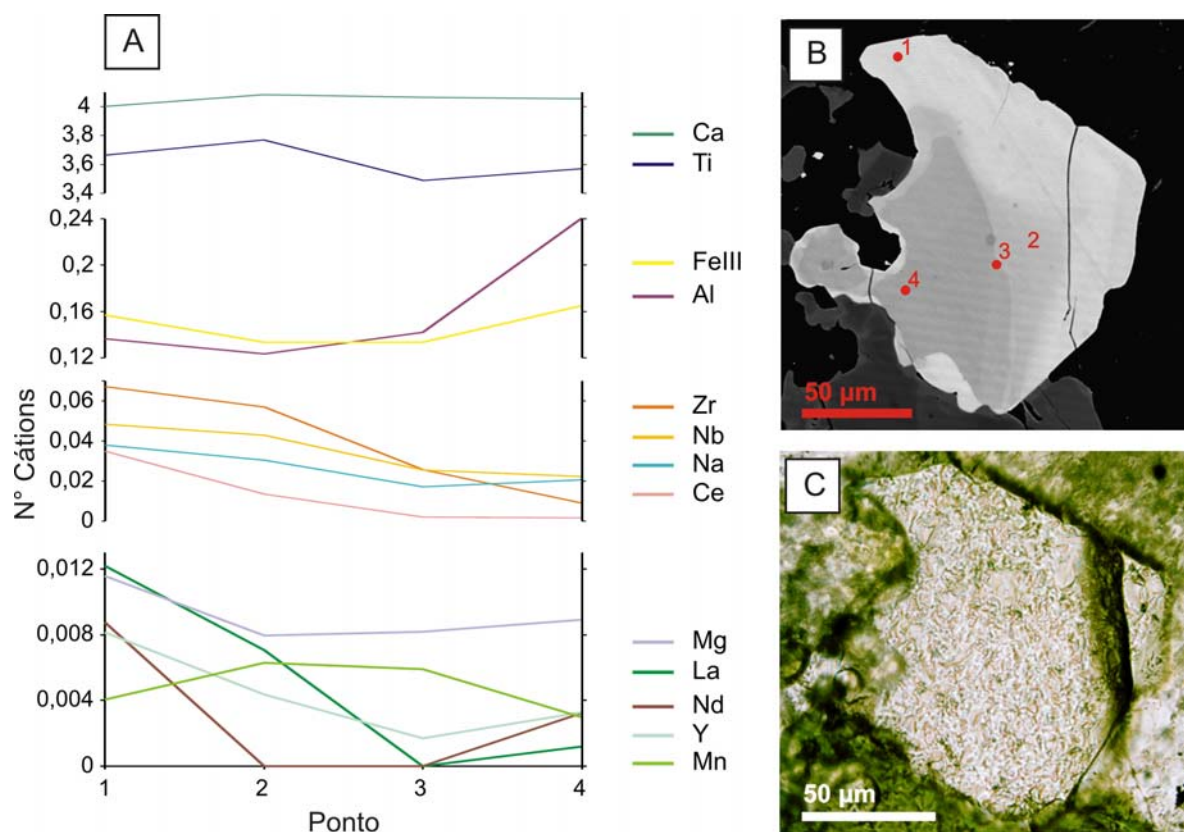


Figura 5-14: Análises por WDS de titanita da amostra PPE-7Aa (enclave microgranular máfico-ultramáfico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpfu. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.

Excepcionalmente na amostra PPE-1Bg o teor de ETR chega a 2,3%, isso se dá pelo conteúdo relativamente alto de Nd_2O_3 (0,5%), Ce_2O_3 (1,03%) e La_2O_3 (0,4%). Juntamente com o aumento do teor dos ETR, tem-se a diminuição de Ca.

Óxidos como Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO e Na_2O , apresentam zoneamento setorial e teores entre 0,7 – 1,5%, 1,3 – 2,2%, 0,07 – 0,1% e 0,07 – 0,4%, respectivamente. O conteúdo de MgO é ínfimo e não passa de 0,04%.

No geral, a titanita associada ao opaco, bordejando-o, possui teor maior de ETR, que pode chegar a 1,9% (em peso), do que a titanita poiquilítica presente na matriz dos enclaves.

5.1.3 *Minerais opacos*

Os minerais opacos presentes nas amostras analisadas são classificados como membros da solução-sólida magnetita-ulvoespínélio, do grupo do espínélio. A característica desta solução-sólida é o enriquecimento em TiO_2 e o empobrecimento em Fe_2O_3 , da magnetita para o ulvoespínélio. Os membros desta solução-sólida podem ter seus Fe^{3+} total ou parcialmente substituídos por Cr e V e por pequenas quantidades de Al, ao passo que o Fe^{2+} pode ser parcialmente substituído por Ni, Co e Zn e por pequenas quantidades de Ca, Mn e Mg (Deer et al. 1966). Os resultados analíticos obtidos são apresentados na Tabela 3/ Anexo II, notar que a somatória dos óxidos é baixa (entre 95 e 99%), indicando que estes minerais continham elementos não analisados na rotina de análise.

5.1.3.1 Nefelina sienitos

No contexto dos nefelina sienitos, os minerais/fases opacos podem estar presentes tanto subidiomórficos associados aos aglomerados de minerais máficos, como xenomórficos, com bordas corroídas e arredondadas, incluídos nos clinopiroxênios verdes prismáticos. Sob luz refletida, os cristais, no geral, são límpidos e comumente apresentam-se fraturados. Nas imagens BSE-Compo é possível observar que sua composição não possui variações significativas em tonalidades mais homogêneas (ver Figura 5-15).

Estes opacos são classificados como magnetitas com Ti e possuem algumas características químicas distintas. Dentre elas, os grãos subidiomórficos, associados aos aglomerados máficos, possuem teores médios mais elevados de Al_2O_3 (0,22% em peso) e MnO (4,3%) do que os inclusos no piroxênio verde prismático ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,16\%$ e $\text{MnO} = 2,7\%$).

O conteúdo de Ti varia pouco nestes cristais, e não passa de 2,1 cpfu. Com o aumento de Ti há uma conseqüente diminuição de Fe^{3+} , correspondente à solução-sólida magnetita-ulvoespínélio anteriormente citada (ver Figura 5-16). A quantidade de Mn tem relação inversamente proporcional à de Fe^{2+} .

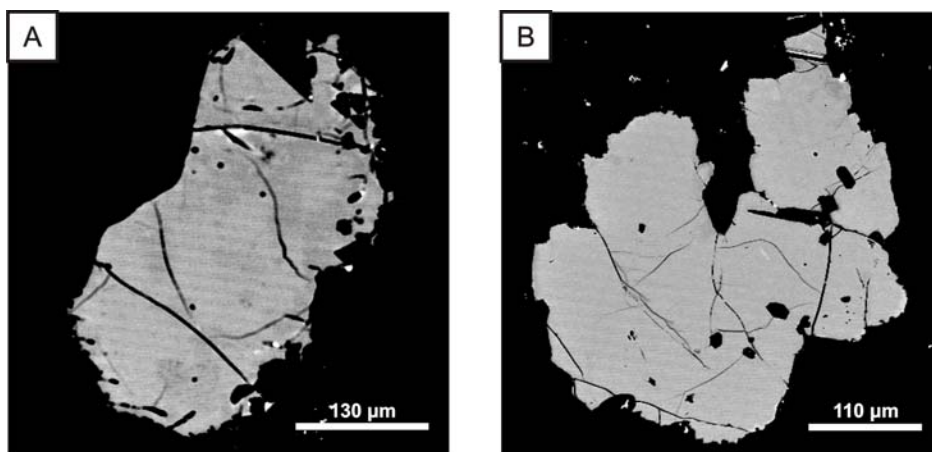


Figura 5-15: Imagens BSE-Compo destacando a magnetita dos nefelina sienitos (A) grosso-médio a grosso (PPE-8A) e (B) médio-fino a fino (PPE-6b).

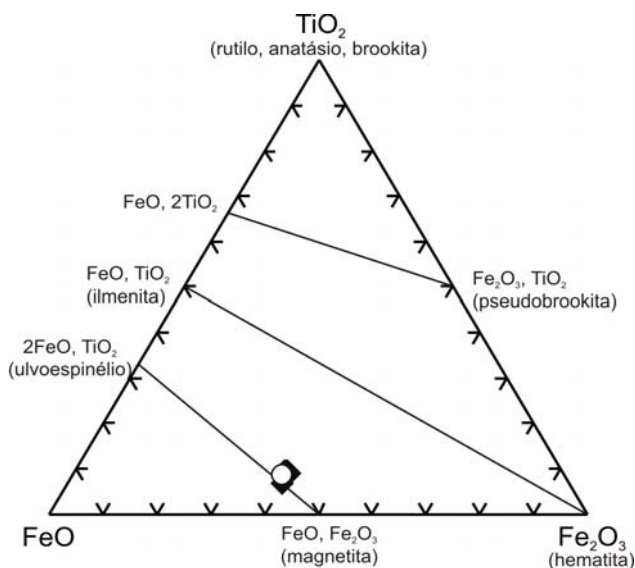


Figura 5-16: Diagrama ternário composicional dos minerais opacos dos nefelina sienitos, expresso em moléculas de TiO_2 , FeO e Fe_2O_3 .

As composições destes cristais variam entre 68,3 e 73,5 (% em peso) de FeO , 13,4 e 16,4% de Fe_2O_3 e 6,7 e 8% de TiO_2 . Adicionalmente a “titano-magnetita” possui, em média, 0,2% de ZnO , 0,05% de CaO e 0,06% de MgO .

5.1.3.2 Enclaves microgranulares félsicos

Os minerais opacos dos enclaves félsicos geralmente estão associados ao clinopiroxênio, tanto prismático quanto fibroso, e a titanita. Estes cristais são xenomórficos e apresentam-se com forte corrosão (Figura 5-17B). A composição destes cristais varia dentro da solução-sólida magnetita-ulvoespínélio. Em média, possuem menor teor de Ti em relação aos opacos do enclave microgranular máfico-ultramáfico (Figura 5-17A e 5-19).

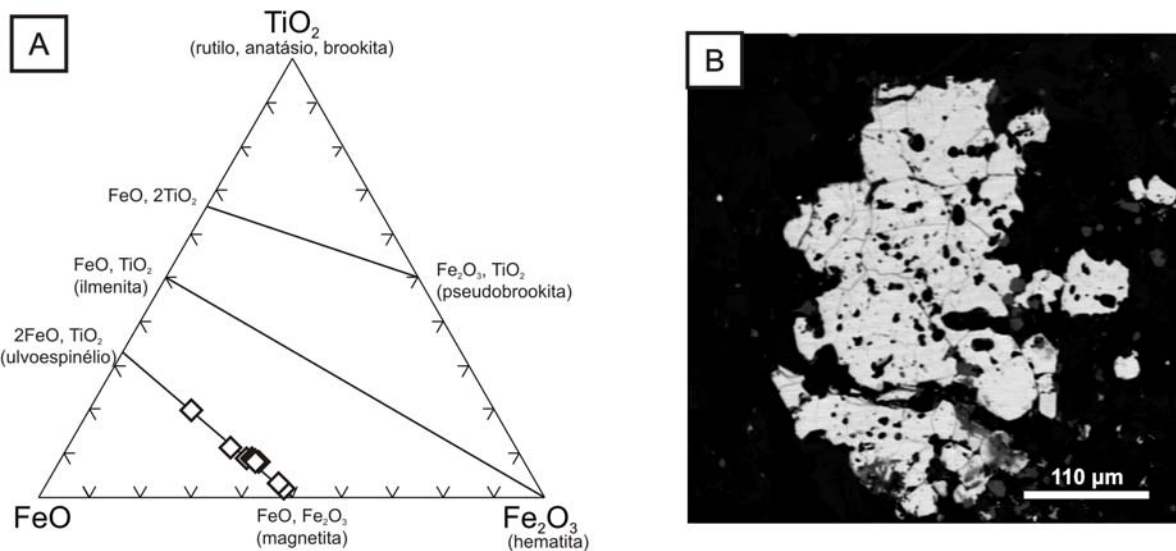


Figura 5-17: (A) Diagrama ternário composicional dos minerais opacos dos enclaves microgranulares félsicos, expresso em moléculas de TiO_2 , FeO e Fe_2O_3 . (B) Imagem BSE-Compo da magnetita do enclave microgranular félsico (amostra PPE-31).

5.1.3.3 Enclave microgranulares máfico-ultramáficos

Os enclaves máfico-ultramáficos possuem relativa abundância de minerais opacos. Estes minerais frequentemente estão associados ao diopsídio da matriz, à borda verde dos macrocristais de diopsídio titanífero ou inclusos nestes, podem estar rodeados por titanita, associados à flogopita e estão em maior concentração na borda do enclave com a rocha encaixante. No geral são xenomórficos, com as bordas muito corroídas, fraturados e podem apresentar-se “esqueléticos”, especialmente quando inclusos nos macrocristais. Os cristais inclusos no diopsídio titanífero são muito corroídos, e possuem a superfície rugosa, os presentes na matriz possuem aspecto “esquelético”, no geral, e os cristais presentes nas bordas no enclave são mais íntegros e possuem sua superfície límpida, como observado na Figura 5-18.

Neste tipo de enclave tem-se desde magnetita com pouco Ti até “titano-magnetita”, com ampla variação dos termos Ti e Fe^{3+} , diferentemente dos nefelina sienitos como se observa na Figura 5-19.

Os cristais associados à matriz do enclave são quimicamente semelhantes aos da borda dos macrocristais de diopsídio e da borda dos enclaves e possuem, em média, 0,3% de Al_2O_3 , 0,2% de Cr_2O_3 , 3,1% de MnO, 0,2% de MgO e ainda 0,3% de ZnO. Como óxidos constituintes, têm-se em média 11,5% de Fe_2O_3 , 71,4% de FeO e 8,5% de TiO_2 , composição tal que, plotada no diagrama ternário molecular TiO_2 -FeO- Fe_2O_3 , cai no campo da magnetita com Ti.

Os opacos inclusos no diopsídio titanífero apresentam-se mais corroídos do que os da matriz, sua superfície é rugosa e possuem características químicas muito contrastantes com os descritos anteriormente. Estes podem chegar a ter 17,6% de TiO_2 . Outro caráter

distintivo é o teor mais baixo de MnO (2,2% em média) e mais elevado de MgO (0,7% em média).

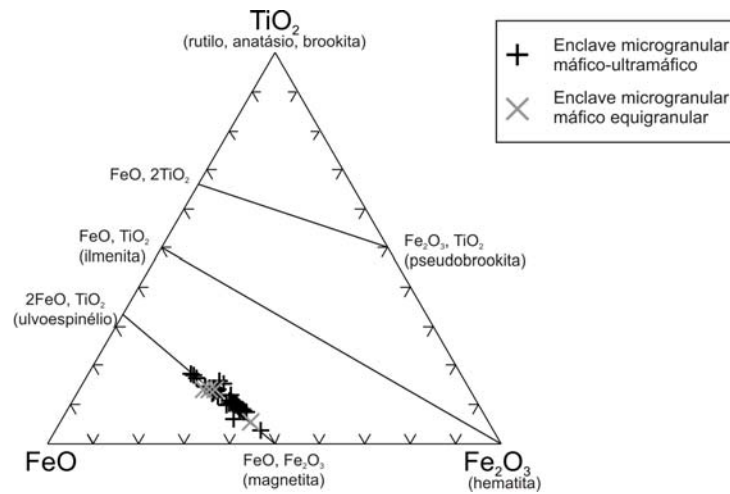


Figura 5-18: Diagrama ternário composicional dos minerais opacos dos enclaves microgranulares máfico-ultramáfico e máfico equigranular, expresso em moléculas de TiO_2 , FeO e Fe_2O_3 .

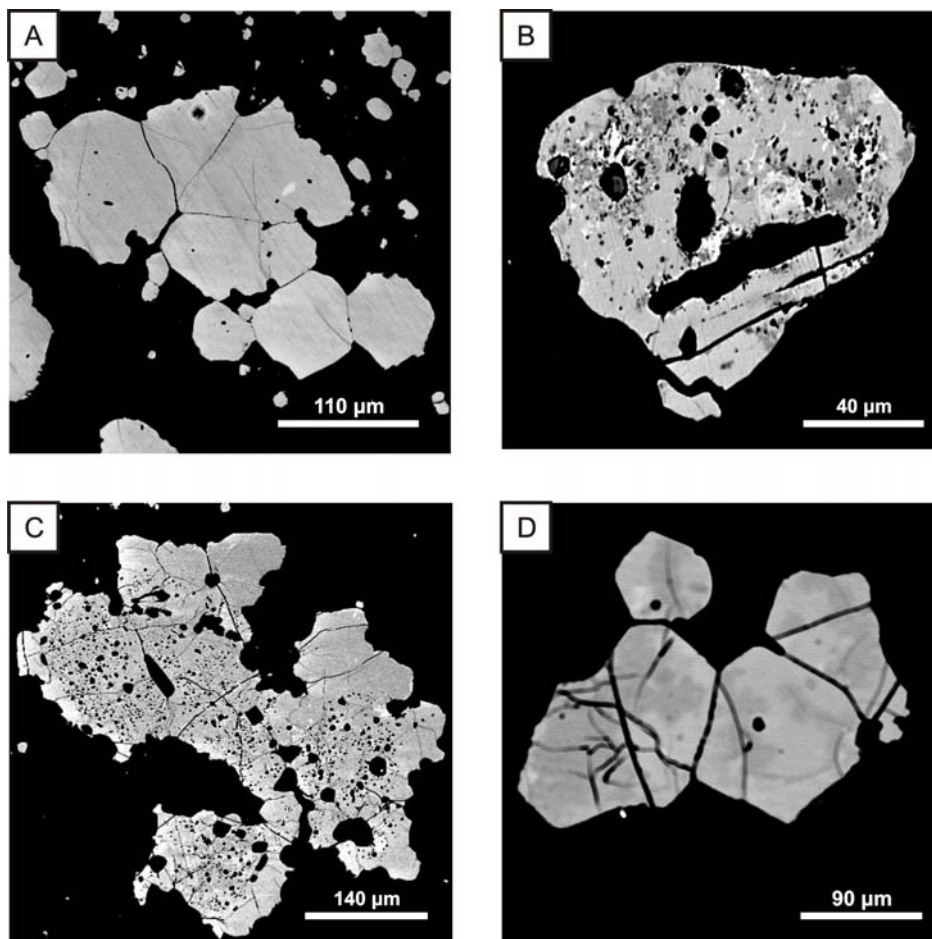


Figura 5-19: Imagens BSE-Compo com destaque para as magnetitas dos enclaves máfico-ultramáficos porfíricos (amostras PC-19, PPE-7Aa e PPE-1Bg) e dos máficos equigranulares (amostra PPE-5Bb), (A) do contato do enclave com a encaixante (PPE-7Aa), (B) da matriz do enclave (PC-19), (C) opaco incluído no diopsídio com Ti (PPE-1Bg) e (D) da matriz do enclave (PPE-5Bb).

5.1.4 Biotita-flogopita

A maior parte das biotitas têm composição que caem dentro do campo definido pelos quatro membros extremos: flogopita, anita, eastonita e siderofilita. As substituições que caracterizam a solução sólida biotita-flogopita é a de Fe^{2+} e íons trivalentes (Fe^{3+} , Al) por Mg e o Si substitui o Al nas posições tetraédricas. Outras substituições comuns são: K por Na, Ca, Ba, Rb e Cs; Fe^{2+} por Mn; Al por Li. O Flúor pode substituir a hidroxila, substituição esta mais frequente em cristais com teor elevado de Ti. O Ti pode tanto substituir o Si nas posições tetraédricas, como (Fe,Mg) nas octaédricas, sendo esta última mais provável pelos tamanhos dos íons.

A ocorrência de biotita-flogopita nos litotipos é restrita. Biotita ocorre como acessório nos enclaves félsicos e variedades mais magnesianas ocorrem como acessório nos enclaves máfico-ultramáficos (Figura 5-20). Os dados representativos destes cristais são apresentados na Tabela 4/ ANEXO II.

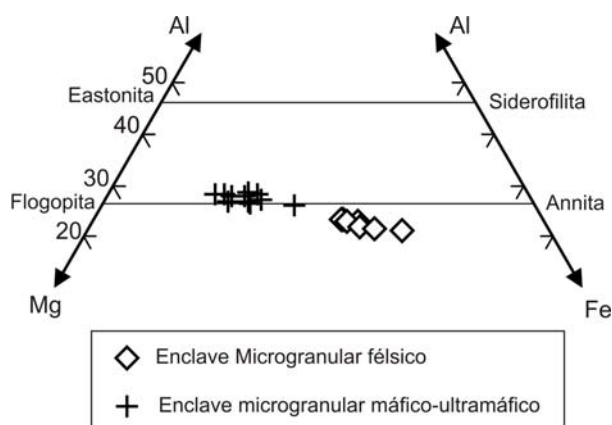


Figura 5-20: Diagrama Al-Fe-Mg para as biotitas presentes nos enclaves félsicos e máfico-ultramáficos.

5.1.4.1 Enclaves microgranulares félsicos

A biotita presente nos enclaves microgranulares félsicos é sub- a idiomórfica, de cor laranja e geralmente está associada ao clinopiroxênio, tanto prismático quanto fibroso.

Estes cristais possuem em média 39,2% (em peso) de SiO_2 , 9,5% de Al_2O_3 , 19,2% de FeO^T , 13,4% de MgO e 9,6% de K_2O . No geral, as biotitas são homogêneas, não apresentando zoneamento bem marcado nas imagens BSE-Compo (Figura 5-21).

5.1.4.2 Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos

Nos enclaves máfico-ultramáficos a flogopita ocorre como mineral acessório, geralmente xenomórfica, associada à magnetita, tanto à presente na matriz (mais raramente) quanto à inclusa nos macrocristais róseos.

Apresentam 1,8% (em peso) em média de TiO_2 e possuem grande parte do Al nos sítios tetraédricos. O teor de MgO chega a 22,7% e o de FeO^T chega a 13,8%. Assim como a biotita, a flogopita não apresenta zoneamento considerável. Na Figura 5-22 pode-se observar a principal variação catiônica destes cristais.

5.1.5 Apatita

Os minerais do grupo da apatita são comuns como acessórios em quase todas as rochas ígneas. São os minerais mais abundantes que contém fósforo. Cada átomo de F está rodeado por três de Ca num mesmo nível, enquanto isso as colunas Ca-O são ligadas a grupos PO_4 , formando uma malha hexagonal. Na fórmula $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$, o F, Cl e hidroxila podem substituir-se mutuamente de modo a formarem termos extremos. O Ca pode ser parcialmente substituído por Mn e o Sr ou terras raras, com predominância do Ce, também podem substituir o Ca, chegando a ter teores relativos altos.

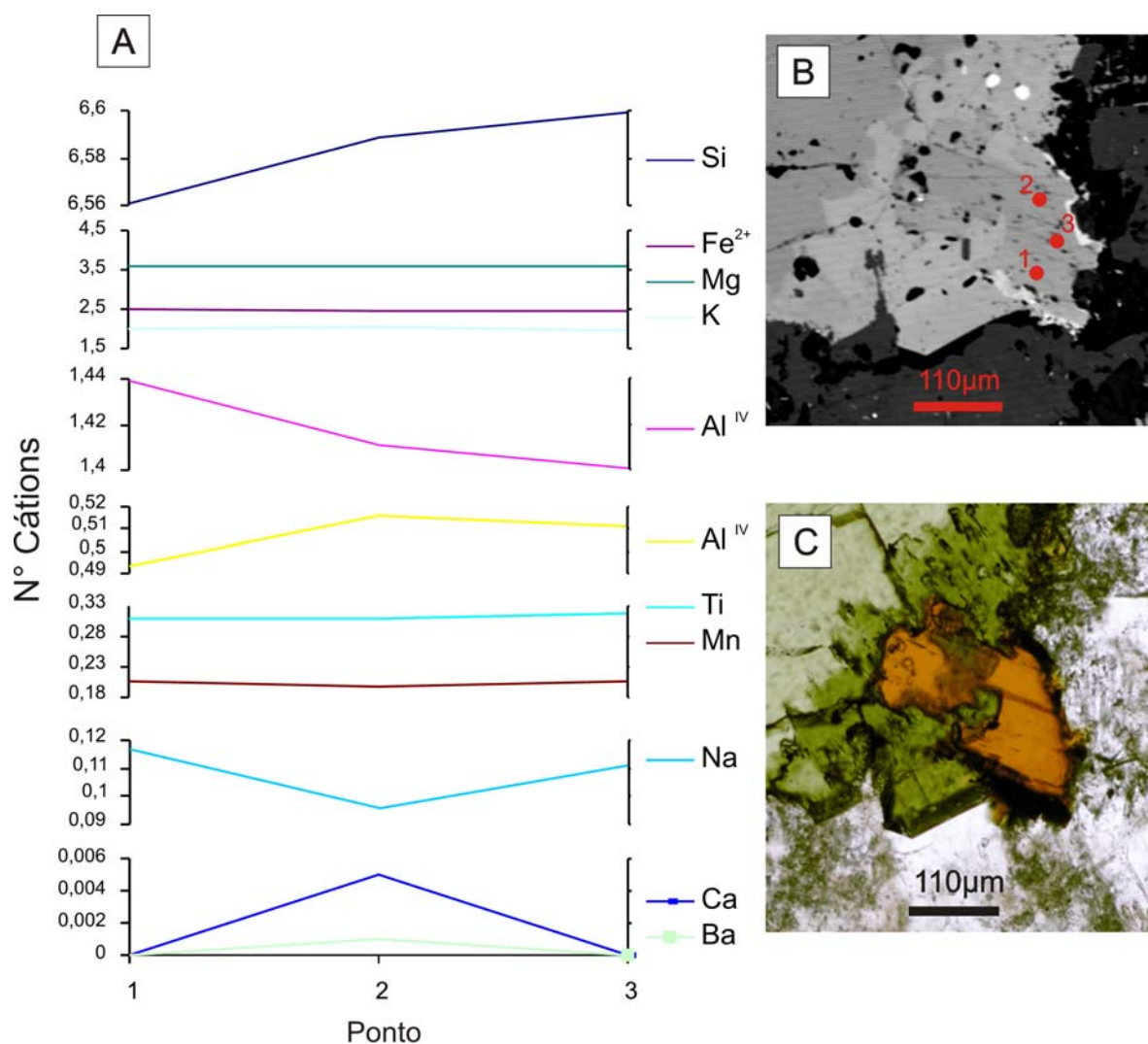


Figura 5-21: Análises por WDS de clinopiroxênio da amostra PPE-31 (enclave microgranular félsico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.

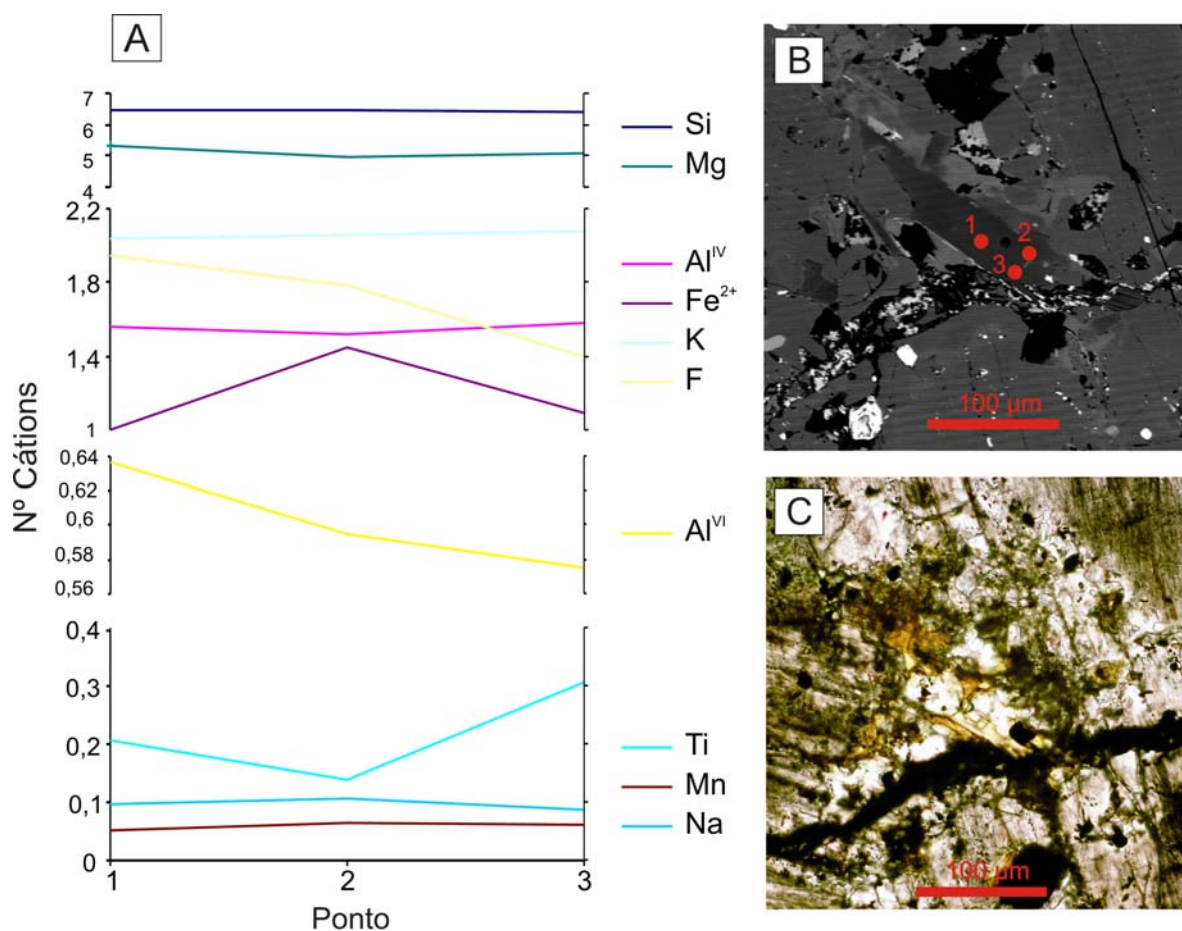


Figura 5-22: Análises por WDS de biotita da amostra PPE-33 (enclave microgranular máfico-ultramáfico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.

Nas rochas descritas a apatita ocorre como acessório. Está presentes nos enclaves félsicos, nos máfico-ultramáficos e na variedade de granulação fina do nefelina sienito. O nefelina sienito grosso, por sua vez, não possui este mineral. Dados de cristais de apatita representativas das amostras são apresentados na Tabela 5/ Anexo II.

5.1.5.1 Nefelina sienito fino

Neste litotipo a apatita ocorre idiomórfica e prismática associada ao clinopiroxênio prismático, por vezes inclusa na borda deste. Possui aparência mais límpida e relevo mais alto que os outros minerais félsicos, o que torna simples seu reconhecimento óptico.

Estas apatitas possuem quantidades ínfimas de ou não possuem, Cl em sua estrutura, sendo F o principal elemento volátil (1,44 cpf). Elementos como Mn, Sr e ETR substituem pequenas quantidades de Ca (Figura 5-23). O teor de SrO não ultrapassa 1,3% (em peso) na maioria dos cristais, porém foi reconhecido um cristal de apatita, de cor amarelo-creme sob o microscópio, que chega a ter 14,4% de SrO, valor altíssimo para esse

mineral. Esta apatita denota zoneamento setorial, bem marcado em imagens BSE-Compo (Figura 5-23).

A apatita presente nos glomérulos máficos do nefelina sienito fino possui composição semelhante à das encontradas no enclave máfico-ultramáfico. Porém possui maior teor de Ce_2O_3 (0,9% em peso, em média) do que os enclaves e maior teor de P_2O_5 (40% em peso, em média) em relação ao nefelina sienito fino.

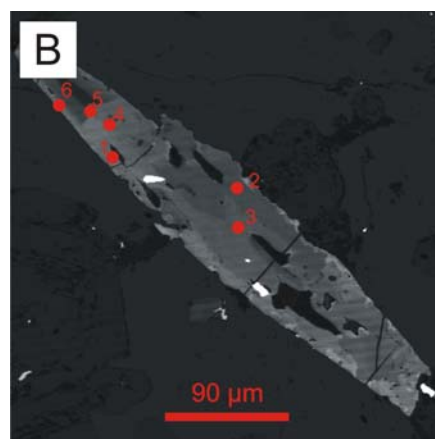
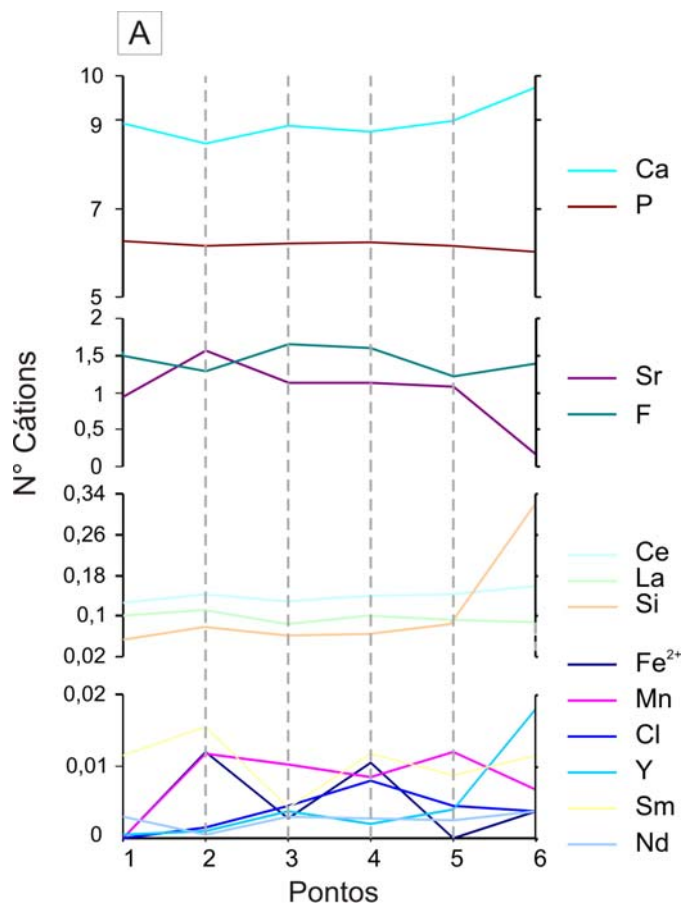


Figura 5-23: Análises por WDS de apatita da amostra PPE-6b (nefelina sienito médio-fino a fino). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados.

5.1.5.2 Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos

Nos enclaves máfico-ultramáficos, a apatita ocorre tanto como diminutas inclusões em titanita e na borda verde dos macrocristais como cristais de tamanho maior do que o clinopiroxênio da matriz, destacando-se por seu idiomorfismo e relevo alto. Nesta presente na matriz, não são raras inclusões fluidas, segundo o eixo cristalográfico c.

Assim como no nefelina sienito fino, possui quantidades ínfimas de Cl e F está presente com 1,54 cpf. O Sr substitui pequenas quantidades de Ca, juntamente com Ce, La e Sm (Figura 5-24). A imagem BSE-Compo da figura 5-24 mostra que as zonas mais claras do cristal possuem maior teor de ETR e menores de F, Ca e Si.

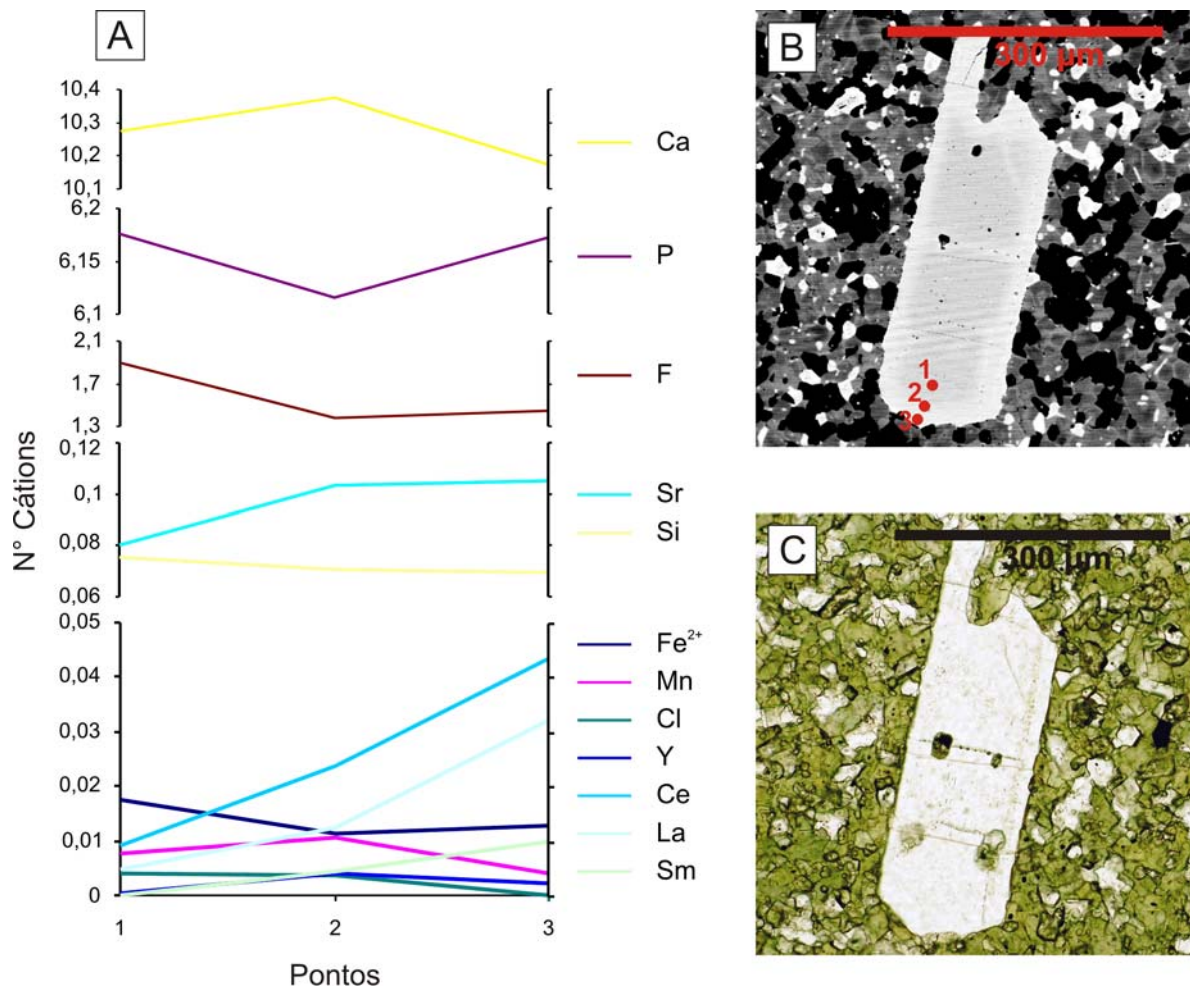


Figura 5-24: Análises por WDS de apatita da amostra PPE-7Aa (enclave microgranular máfico-ultramáfico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.

5.1.6 Feldspato alcalino

O feldspato alcalino é mineral constituinte de todos os litotipos aqui analisados e possui características químicas semelhantes nestes. As proporções moleculares de Ab, Na e Or são representadas na Figura 5-25. Observa-se que seu intervalo composicional dá-se muito próximo ou exatamente ao longo do eixo Ab-Or (albita-ortoclásio) e possui teores muito maiores de Or (65 – 96%) do que de Ab (4 – 33%), enquanto os teores de An (anortita) não ultrapassam 1%. Em todas as amostras, os teores de Ab aumentam do núcleo para a borda dos cristais. (As análises químicas estão apresentadas na Tabela 6/ Anexo II).

Uma característica marcante dos cristais de feldspato alcalino analisados, já reconhecida por Ulbrich (1983) no caso das rochas sieníticas, é a relativa abundância em elementos como Sr, Fe e, de forma menos marcada, Ba. Sr e Ba são elementos que se adaptam bem aos sítios M, enquanto o Fe aparece em geral na forma trivalente, ocupando o sítio tetraédrico. No primeiro caso a entrada de Sr e Ba ocorre através de substituições acopladas do tipo $\text{Sr}(\text{Ba})^{2+} + \text{Al}^{3+} = \text{K}^{1+} + \text{Si}^{4+}$, similares as que explicam a entrada de Ca na estrutura. O Fe^{3+} substitui diretamente o Al^{3+} . Quantidades menores, porém significativas de

Ti e Mn, elementos que entram nos sítios T e M, respectivamente, também foram determinadas (e.g. Deer et al. 1966).

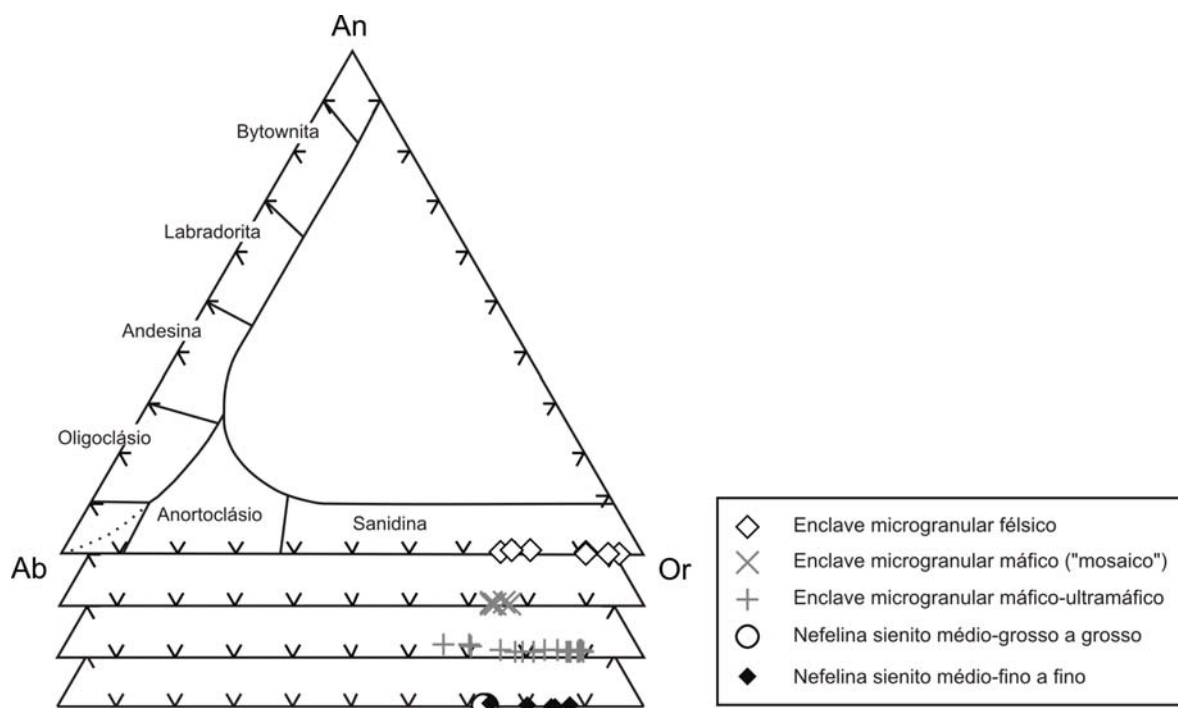


Figura 5-25: Diagrama composicional ternário, expresso por moléculas de Ab-An-Or, dos feldspatos analisados.

5.1.6.1 Nefelina sienitos

O feldspato alcalino dos sienitos ocorre idiomórfico a subidiomórfico, em hábito tabular e, geralmente, apresenta aspecto sujo. Nos sienitos grossos é responsável pela textura foiaítica, característica destes. Nos sienitos mais finos possui diversas inclusões de nefelina, esta em granulação muito menor do que o feldspato.

Nota-se, na Figura 5-25, que os intervalos composicionais entre Ab e Or dos feldspatos de sienito grosso e do fino são diferentes, onde o mais grosso apresenta teor menor de K e maior de Na, em média $Ab_{28}Or_{72}$, e o mais fino $Ab_{20}Or_{80}$.

Os teores de SrO variam de 0,4 a 0,5% (em peso) nos nefelina sienitos mais grossos e de 0,1 a 1,6% nos sienitos mais finos (com média de 0,7%). BaO está presente em menor teor nos nefelina sienitos mais grossos (0,07%, em média) do que nos finos (0,1%, em média).

Os feldspatos dos nefelina sienitos possuem teores relativamente altos de Fe_2O_3 , que variam de 0,38 a 0,6% (média de 0,5%). No leve zoneamento que se observa nas imagens BSE-Compo, pode-se concluir que a maior quantidade de Fe^{3+} , Sr e Ba está presente nas zonas mais claras.

5.1.6.2 Enclaves microgranulares félsicos

O feldspato dos enclaves félsicos ocorre de forma semelhante ao do nefelina sienito fino, com textura poiquilítica característica. É tipicamente xenomórfico, com aspecto “sujo” dado pela alteração deste. Nas imagens BSE-Compo é possível observar zoneamentos sutis, setoriais, onde as zonas mais claras possuem mais Ba e Sr.

As composições variam entre Ab_4Or_{96} e $Ab_{24}Or_{76}$. Os teores de SrO nestes cristais, variam mais do que no feldspato dos nefelina sienitos (de 0,2 a 1,6%, em peso).

5.1.6.3 Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos

O feldspato dos enclaves máfico-ultramáficos apresenta-se xenomórfico de aspecto muito “sujo”, associado a nefelina e concentrado em bolsões de minerais félsicos. O zoneamento observado nas imagens BSE-Compo é setorial e muito sutil (ver Figura 5-27).

Os intervalos composicionais destes cristais são mais amplos e variam sua composição entre $Ab_{10}Or_{90}$ e $Ab_{33}Or_{66}An_1$. A amostra PPE-7Aa foi a que mostrou teores mais elevados e a PC-19 os teores mais baixos de Na.

No caso da amostra PPE-7Aa, o teor de SrO pode ultrapassar 2% (em peso), tendo uma média de 1,7%. BaO está presente em todos os grãos analisados, porém em teores menores do que o Sr, tendo no máximo 0,4%, valores mínimos abaixo do nível de detecção e média de 0,2%.

O teor de Fe_2O_3 deste enclave é semelhante ao dos sienitos, variando entre 0,4 e 0,7% (com média de 0,5%).

O MnO, óxido relativamente raro nos feldspatos alcalinos (Deer *et al.* 1966), está presente em teor mais elevado nos enclaves máfico-ultramáficos, onde pode chegar a 0,05%. Este óxido está ausente nas amostras descritas anteriormente. TiO_2 tem sua distribuição irregular e está presente em todos os litotipos analisados, com teor, em média, de 0,07%.

O enclave máfico equigranular possui somente feldspato alcalino como mineral félsico constituinte. Este feldspato é xenomórfico e frequentemente possui textura em “mosaico”, seu aspecto é sujo e possui zoneamentos sutis, apresentados pelas imagens BSE-Compo.

Seu intervalo composicional no eixo Ab-Or varia pouco, entre $Ab_{23}Or_{77}$ e $Ab_{26}Or_{74}$. O SrO está presente em teor médio de 0,3% (em peso), com pouca variação. O teor de BaO nestes enclaves varia entre 0,2 e 0,8%, onde a maior concentração está nas zonas claras das imagens BSE-Compo.

O teor de Fe_2O_3 mostra-se maior neste tipo de enclave do que nos outros litotipos descritos anteriormente, com variações maiores também (entre 0,5 e 0,9%, e com média de 0,7%).

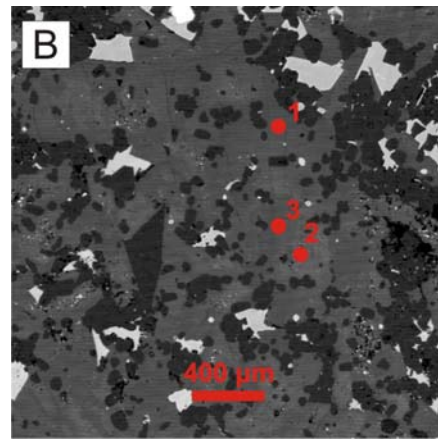
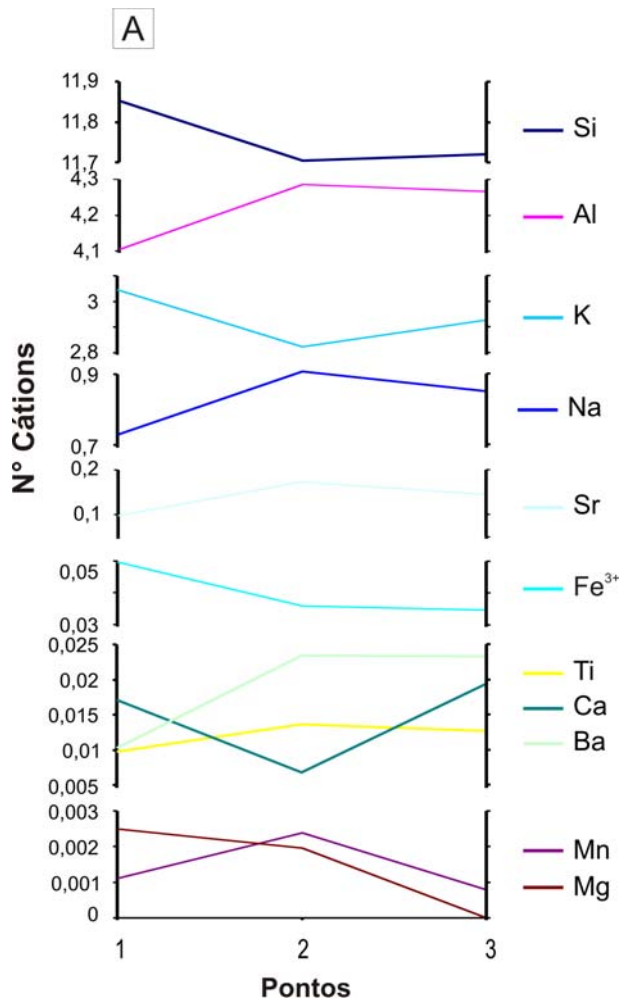


Figura 5-26: Análises por WDS de feldspato alcalino da amostra PPE-31 (enclave microgranular félsico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados.

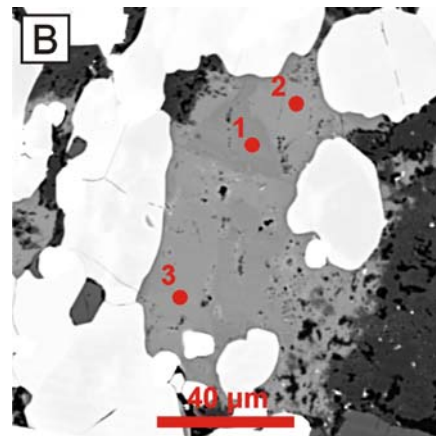
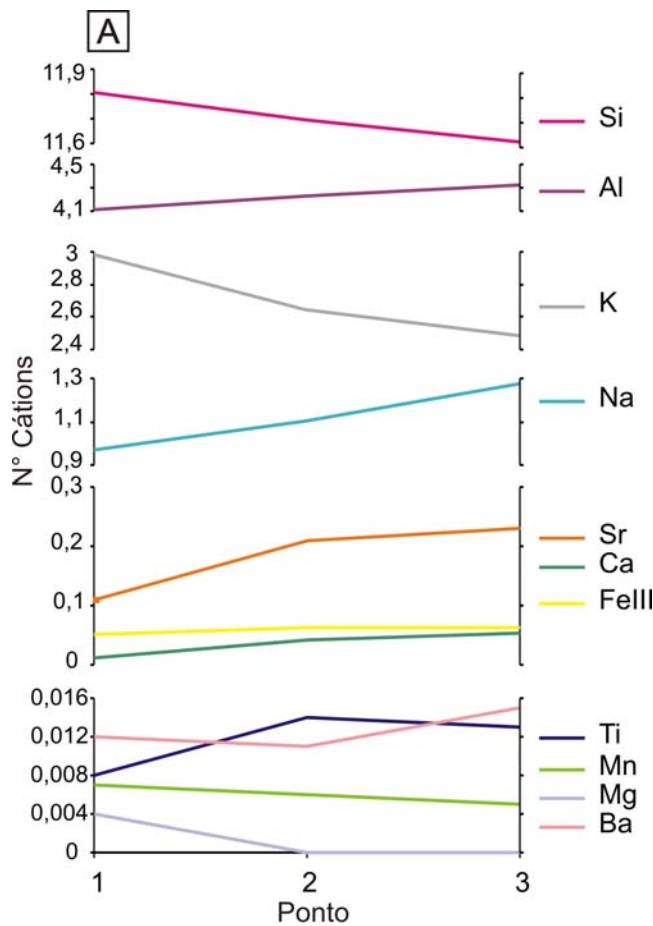


Figura 5-27: Análises por WDS de feldspato alcalino da amostra PPE-7Aa (enclave microgranular máfico-ultramáfico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados.

5.1.7 Nefelina

Foram obtidos dados analíticos para cristais de nefelina presentes nas duas fácies de nefelina sienitos, nos enclaves microgranulares félsicos e nos máfico-ultramáficos. Os resultados analíticos obtidos são apresentados na Tabela 7/ Anexo II.

A fórmula geral da nefelina é dada por: $\text{Na}_x\text{K}_y\text{Ca}_z \square_{8-(x+y+z)} \text{Al}_{(x+y+2z)} \text{Si}_{16-(x+y+2z)} \text{O}_{32}$, onde \square são os vazios na estrutura do cristal (Deer et al. 1966). Porém, na nefelina que possui conteúdo de Fe^{3+} maior do que o de Ca é justificável a inclusão de ferro na fórmula geral, como feito anteriormente por Mitchell (1972 apud Ulbrich 1983), resultando na seguinte fórmula: $\text{Na}_x\text{K}_y\text{Ca}_z \square_{8-(x+y+z)} \text{Fe}_w \text{Al}_{(x+y+2z)} \text{Si}_{16-(x+y+2z+w)} \text{O}_{32}$. A nefelina presente nas amostras estudadas segue o padrão descrito Deer et al. (1966), no sentido de que apresentam mais que 8 Si e menos que 8 Al cátions por fórmula unitária. As fórmulas gerais médias calculadas para a nefelina presente nas amostras estão discriminadas na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Fórmulas gerais médias das nefelinas das amostras analisadas.

Litotipo	Fórmula Geral Média
Nefelina sienito médio-grosso a grosso	$\text{Na}_{5,86}\text{K}_{1,97}\text{Ca}_0 \square_{0,17} \text{Fe}_{0,01} \text{Al}_{7,83} \text{Si}_{8,16} \text{O}_{32}$
Nefelina sienito médio-fino a fino	$\text{Na}_{5,97}\text{K}_{1,41}\text{Ca}_0 \square_{0,63} \text{Fe}_{0,24} \text{Al}_{7,38} \text{Si}_{8,38} \text{O}_{32}$
Enclave microgranular félsico	$\text{Na}_{5,72}\text{K}_{1,72}\text{Ca}_0 \square_{0,55} \text{Fe}_{0,07} \text{Al}_{7,45} \text{Si}_{8,49} \text{O}_{32}$
Enclave microgranular máfico-ultramáfico	$\text{Na}_{5,82}\text{K}_{1,41}\text{Ca}_0 \square_{0,73} \text{Fe}_{0,23} \text{Al}_{7,24} \text{Si}_{8,52} \text{O}_{32}$

5.1.7.1 Nefelina Sienitos

Os nefelina sienitos possuem duas gerações texturais distintas de nefelina, uma presente em ambas fácies, idiomórfica a subidiomórfica, límpida, porém pode estar alterada para cancrinita, associada ao feldspato, a outra presente somente no nefelina sienito mais fino, subidiomórfica, inclusa no feldspato alcalino e no piroxênio prismático, gerando a textura “poiquilítica” desta rocha. As imagens BSE obtidas revelam que os cristais de nefelina das rochas sieníticas são, em geral, homogêneos composicionalmente, não se observando zoneamentos significativos (ver Figura 5-28).

A nefelina da fácies mais fina distingue-se da mais grossa por possuir teores de K e Al mais baixos e os de Si e espaços vazios mais altos. O teor de Fe^{3+} é considerado alto no sienito fino (média de 0,23 cpf), apresentando-se mais elevado sempre nas bordas dos cristais, enquanto que o nefelina sienito mais grosso possui quantidades ínfimas de Fe^{3+} , menores que o limite de detecção. Pequenas quantidades de Ba e Sr entram na estrutura destas nefelina, particularmente na borda e na do nefelina sienito mais fino.

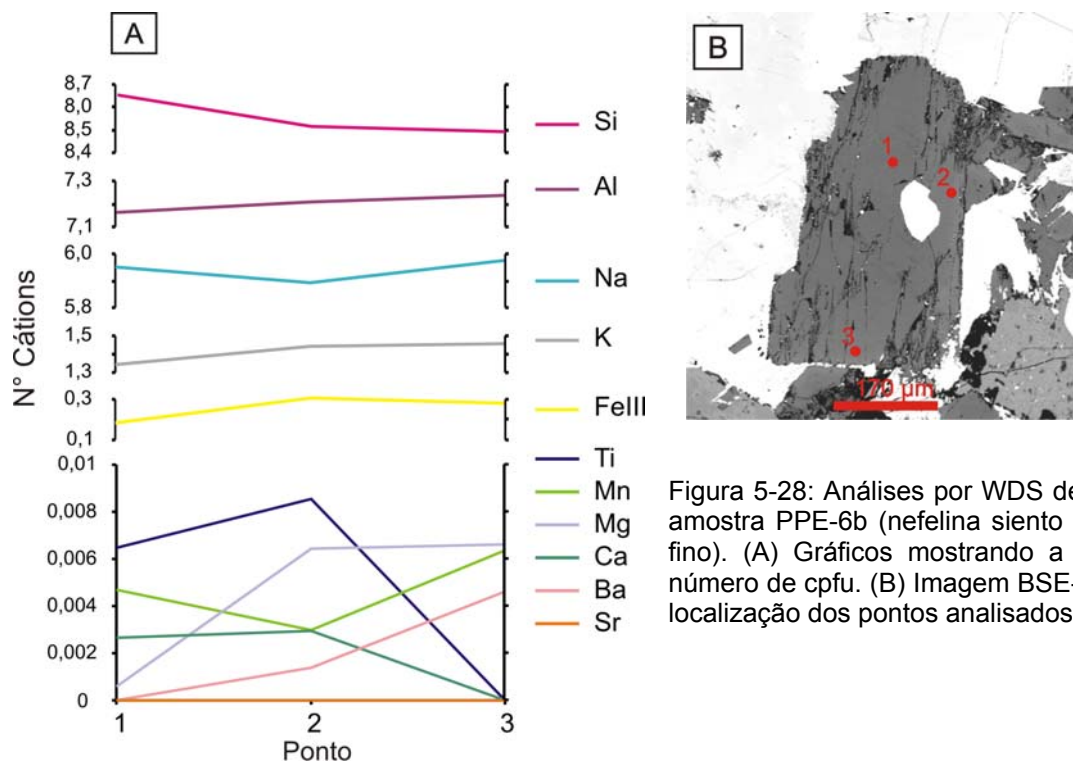


Figura 5-28: Análises por WDS de nefelina da amostra PPE-6b (nefelina sienito médio-fino a fino). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados.

Com relação as diferentes características texturais da nefelina dos sienitos mais finos, tem-se que os grãos menores, inclusos no feldspato e piroxênio, têm maior conteúdo de Na e menor de K do que os grãos idiomórficos maiores, estes últimos semelhantes a dos enclaves máfico-ultramáficos.

A nefelina do enclave máfico-ultramáfico e a do nefelina sienito mais fino são semelhantes do ponto de vista composicional, ao passo que no sienito de granulação mais grossa os teores de K e Al são mais altos e os de Si e espaços vazios menores. O teor de Fe^{3+} é considerado alto (média de 0,23 cpf) tanto no nefelina sienito fino quanto no enclave máfico-ultramáfico, apresentando-se mais elevado sempre na borda dos cristais, enquanto que no enclave félsico é mais baixo e no nefelina sienito mais grosso possui teores abaixo do limite de detecção.

5.1.7.2 Enclaves microgranulares félsicos

A nefelina presente nos enclaves félsicos ocorre tanto em cristais bem desenvolvidos, subidiomórficos a idiomórficos, como xenomórficos, pequenos, inclusos no feldspato alcalino e clinopiroxênio. Apresentam-se moderadamente alterados, com aspecto “sujo”. A zonalidade composicional destes cristais é muito sutil e de difícil reconhecimento em imagens BSE-Compo (Figura 5-29).

A nefelina inclusa no clinopiroxênio verde, prismático, denota teores mais elevados de Fe^{3+} , que chega a 0,17 cpf

5.1.7.3 Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos

A nefelina do enclave microgranular máfico-ultramáfico é quimicamente semelhante à do sienito mais fino, porém sua textura é muito diferente. No enclave, os cristais são xenomórficos e de aspecto mais sujo, associados também ao feldspato, porém se concentram em bolsões félsicos, descritos anteriormente, e não estão inclusos em nenhuma fase mineral.

Comparada a do nefelina sienito mais fino, a destes enclaves possui teores mais variados num mesmo cristal, este zoneamento pode ser visto na imagem BSE-Compo da Figura 5-30. A quantidade de Fe^{3+} é considerada alta, chegando a 0,3 cpf.

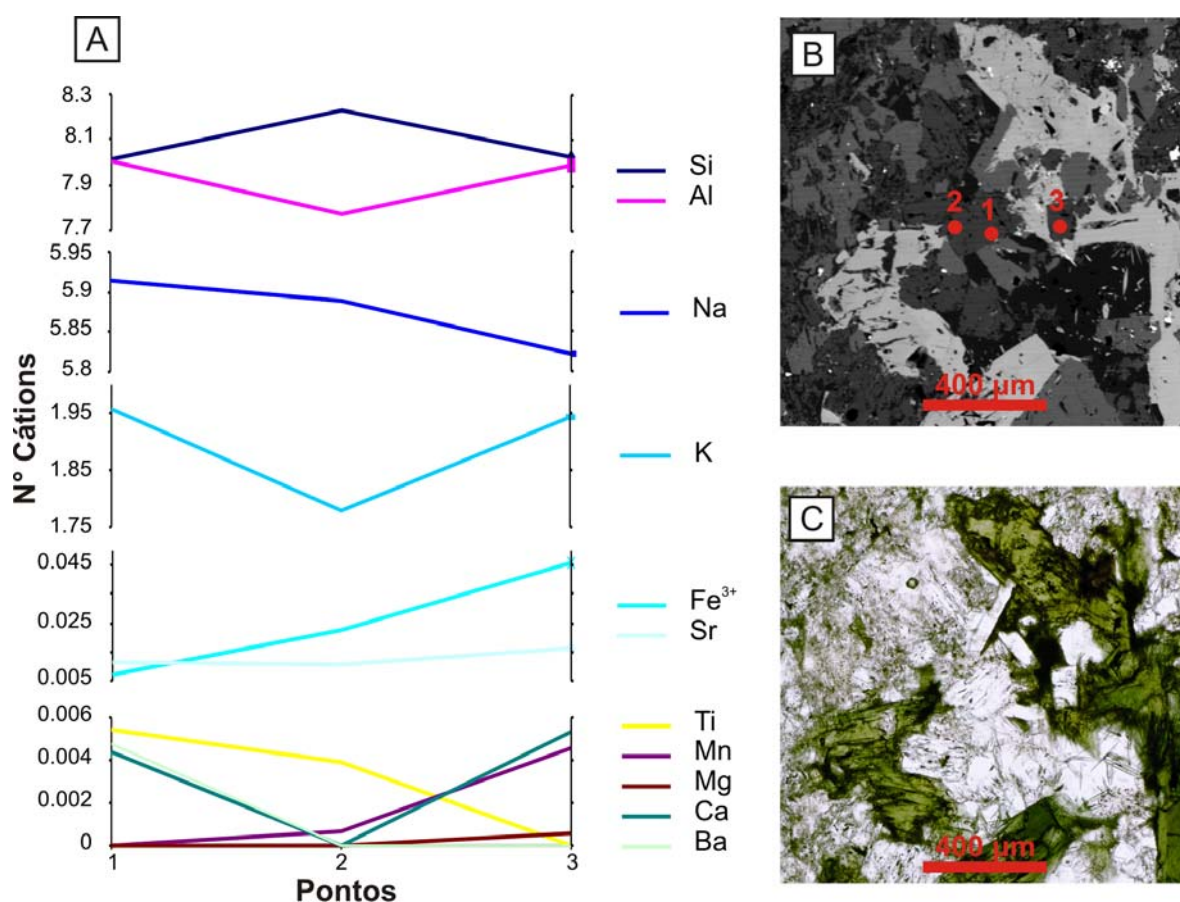


Figura 5-29: Análises por WDS de nefelina da amostra PPE-31 (enclave microgranular félsico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpf. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados. (C) Fotomicrografia com luz plano-polarizada.

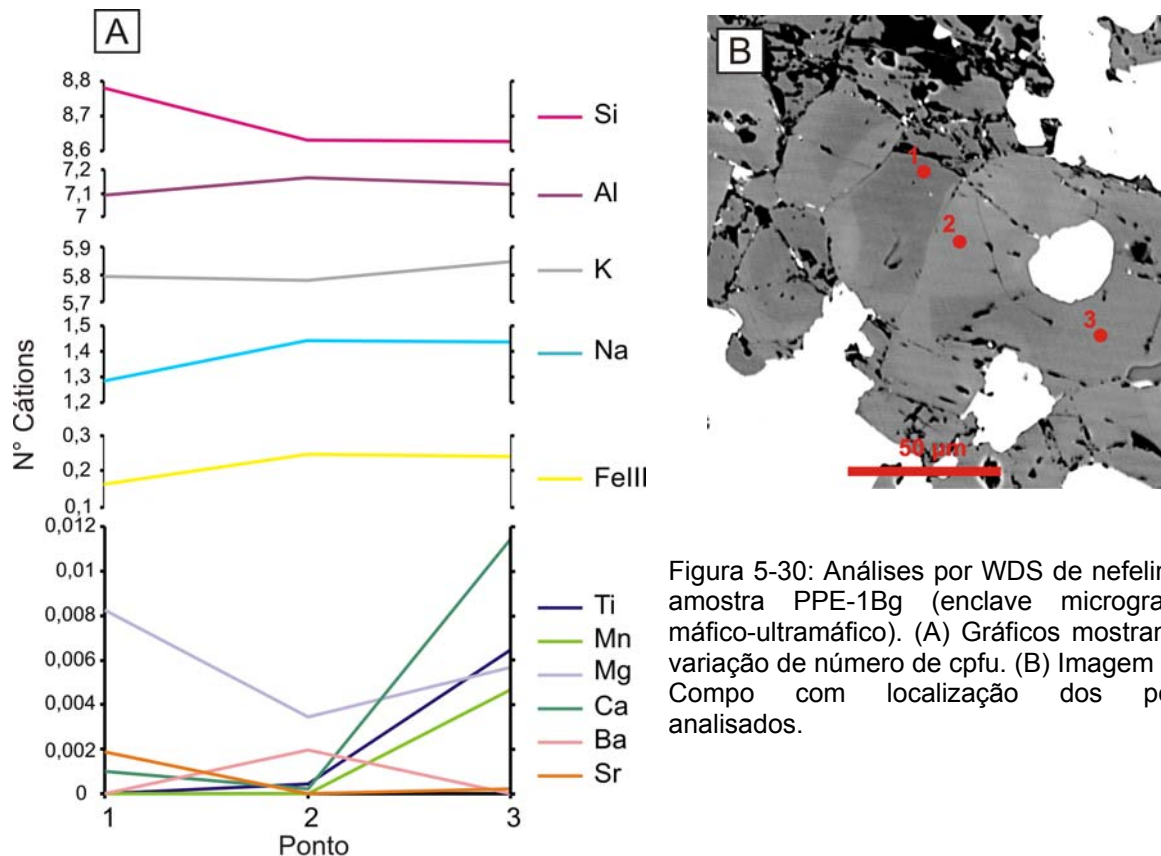


Figura 5-30: Análises por WDS de nefelina da amostra PPE-1Bg (enclave microgranular máfico-ultramáfico). (A) Gráficos mostrando a variação de número de cpfu. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados.

5.2 Elementos traços

As análises de elementos traços de clinopiroxênio, titanita e apatita foram realizadas através de ICPMS acoplado a laser de ablação, para as duas fácies do nefelina sienito e para os enclaves félsicos e máfico-ultramáficos. Os valores obtidos para estes elementos foram normalizados pelos valores condriticos de Taylor & McLennan (1985). Os resultados analíticos estão apresentados no ANEXO III.

5.2.1 Clinopiroxênio

A principal diferença entre dos clinopiroxênios analisados em relação aos elementos traços é o alto conteúdo de elementos terras-raras (ETR) nos clinopiroxênios verdes e na borda verde dos róseos, em relação ao núcleo róseo/incolor destes cristais. A curva destes elementos, normalizada pelo condrito, mostra enriquecimento em terras-raras leves (ETRL) e empobrecimento de elementos mais pesados. Nos clinopiroxênios dos nefelina sienitos, tanto de granulação grossa como fina, há uma inflexão no fim desta curva a partir do Er, indicando um enriquecimento relativo de elementos terras-raras mais pesados (ETRP) (Figura 5-31B). Alguns cristais possuem forte zoneamento de Rb, como mostra o diagrama B na Figura 5-31, para o clinopiroxênio do nefelina sienito de granulação grossa.

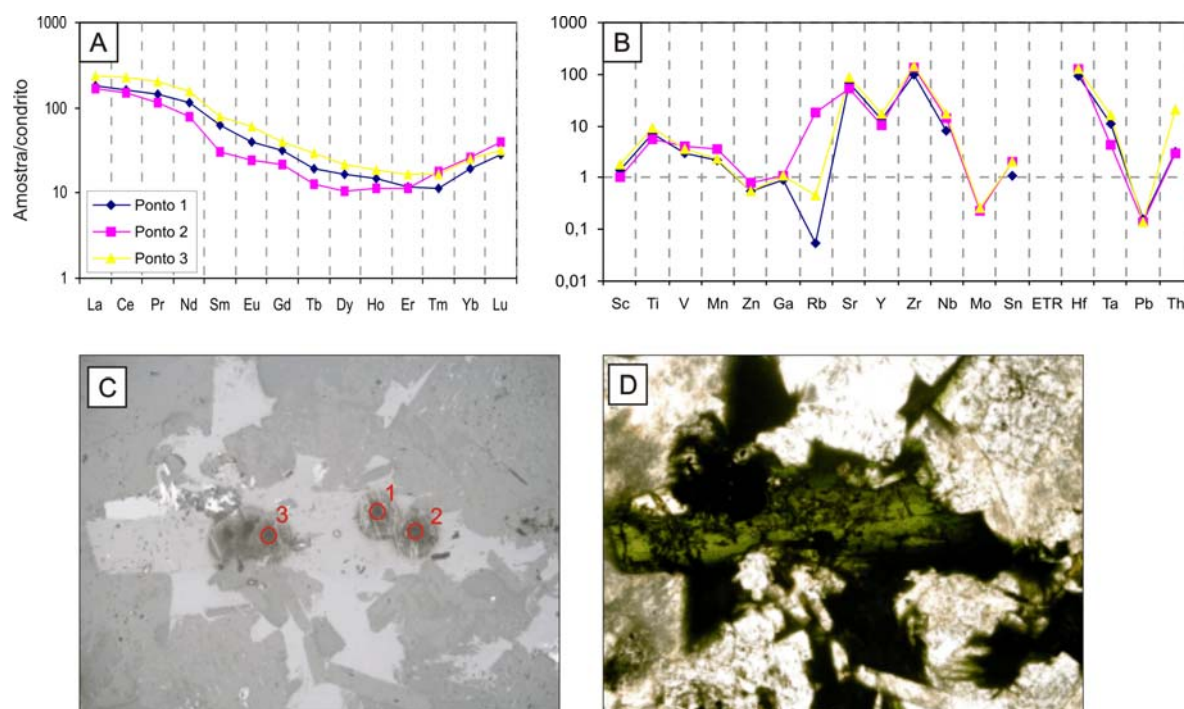


Figura 5-31: Dados obtidos por LA-ICPMS para clinopiroxênio verde-oliva do nefelina sienito médio-grosso a grosso (amostra PPE-8A). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz refletida do cristal, com os pontos analisados destacados, (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal (lado maior das fotos = 3,2mm).

A borda verde dos clinopiroxênios de núcleo róseo, do nefelina sienito de granulação mais fina e dos enclaves félsicos, possui proporção semelhante de ETR em relação aos cristais verdes do nefelina sienito mais grosso. Embora o padrão das curvas da borda e do núcleo seja semelhante, o núcleo possui concentrações uma ordem de grandeza menor de ETR em relação à borda (ver Figura 5-32A). O mesmo é notado para os outros elementos traços (Figura 5-32B), com exceção do Sc, que possui concentração maior no núcleo e Ti com concentração semelhante.

Padrão de ETR semelhante ao do cristal róseo do nefelina sienito médio-fino a fino ocorre nos cristais róseos do enclave félsico, onde as bordas verdes pleocroicas apresentam enriquecimento de ETR relativo ao núcleo (Figura 5-33).

Os cristais de núcleo róseo, tanto do nefelina sienito de granulação mais fina quanto dos enclaves félsicos possui menor concentração de ETR em relação à borda em ca. de 1 ordem de grandeza (ver figuras 5-32A e 5-33A). No caso do nefelina sienito mais fino, o mesmo padrão é observado para os demais elementos traços, com exceção do Sc, que está presente em maior concentração na borda destes cristais (ver Figura 5-32B).

No caso dos enclaves félsicos os elementos Sc, Ti e Co estão presentes em maior quantidade na borda e os elementos V, Ga e Ba possuem concentrações mais próximas na borda em relação ao núcleo dos cristais (ver Figura 5-32B). Os demais elementos,

apresentados nos diagramas A e B da figura 5-33, estão presentes em maior concentração na borda verde dos cristais de núcleo róseo/incolor dos enclaves félsicos.

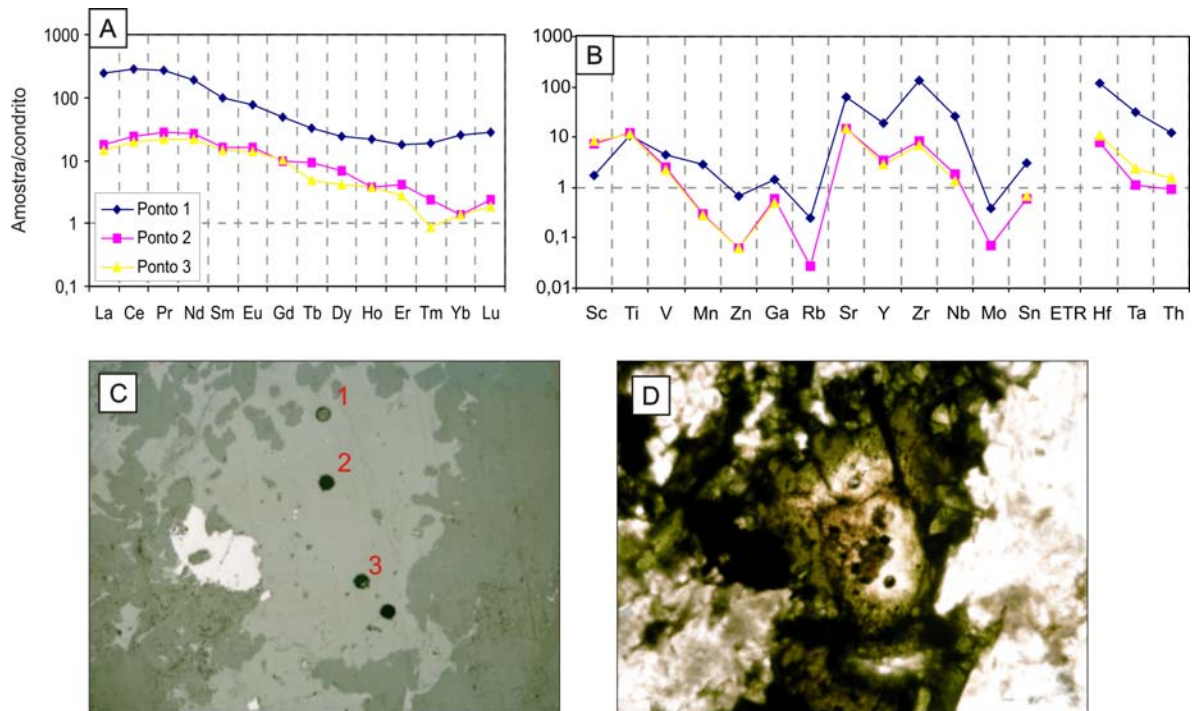


Figura 5-32: Dados obtidos para clinopiroxênio de núcleo róseo e borda verde do nefelina sienito médio-fino a fino (amostra PPE-6b). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz refletida do cristal, com os pontos analisados destacados, (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal (lado maior das fotos = 1,3mm).

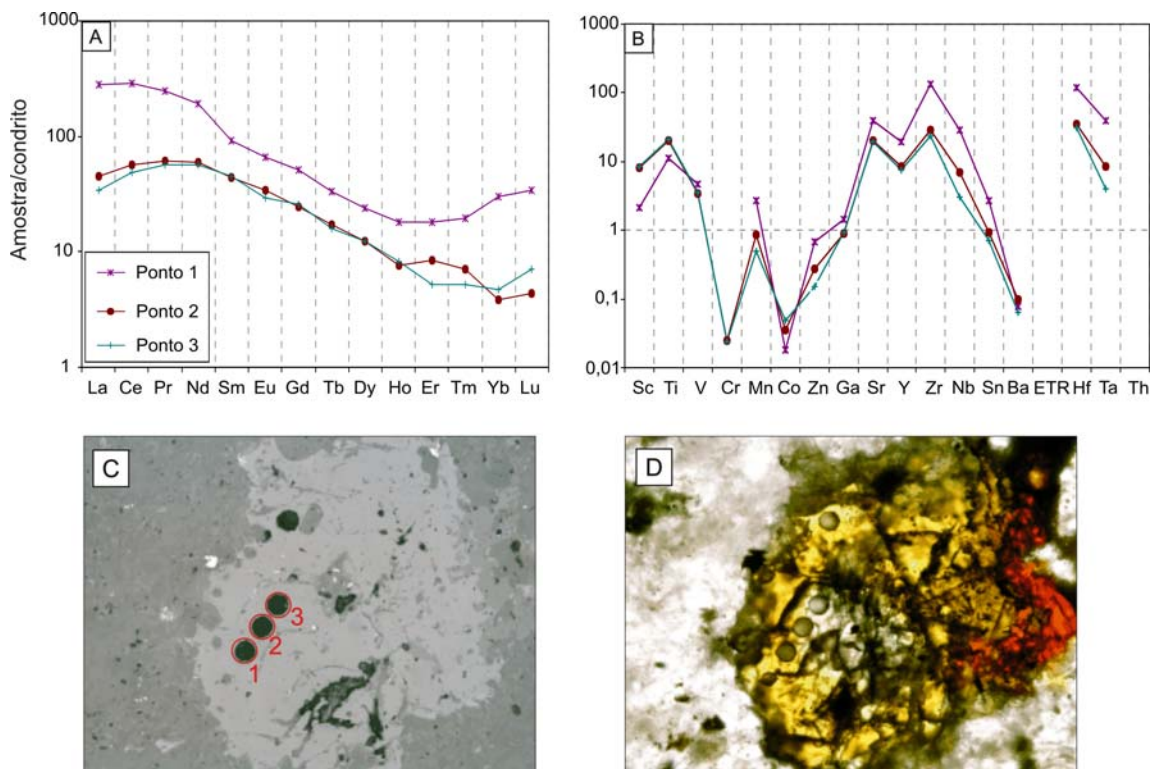


Figura 5-33: Dados obtidos para clinopiroxênio de núcleo róseo e borda verde-oliva pleocroica do enclave microgranular félsico (amostra PPE-31). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR,

ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz refletida do cristal, com os pontos analisados destacados, (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal (lado maior das fotos = 0,81mm).

Os cristais de diopsídio róseo presentes no glomérulo máfico do enclave microgranular félsico e os presentes nos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos apresentam as concentrações de ETR mais próximas do condrito, chegando a razões próximas de 1 no caso dos ETR mais pesados. Os zoneamentos de elementos traços nestes cristais são mais sutis, ao menos em seu núcleo. As bordas verdes não foram analisadas por possuírem espessura muito fina, impossibilitando o laser de abladir somente a borda em questão. No cristal da Figura 5-34 os principais zoneamentos são de Zr, Nb, Sn, Hf, Ta e Th, para os elementos traços apresentados.

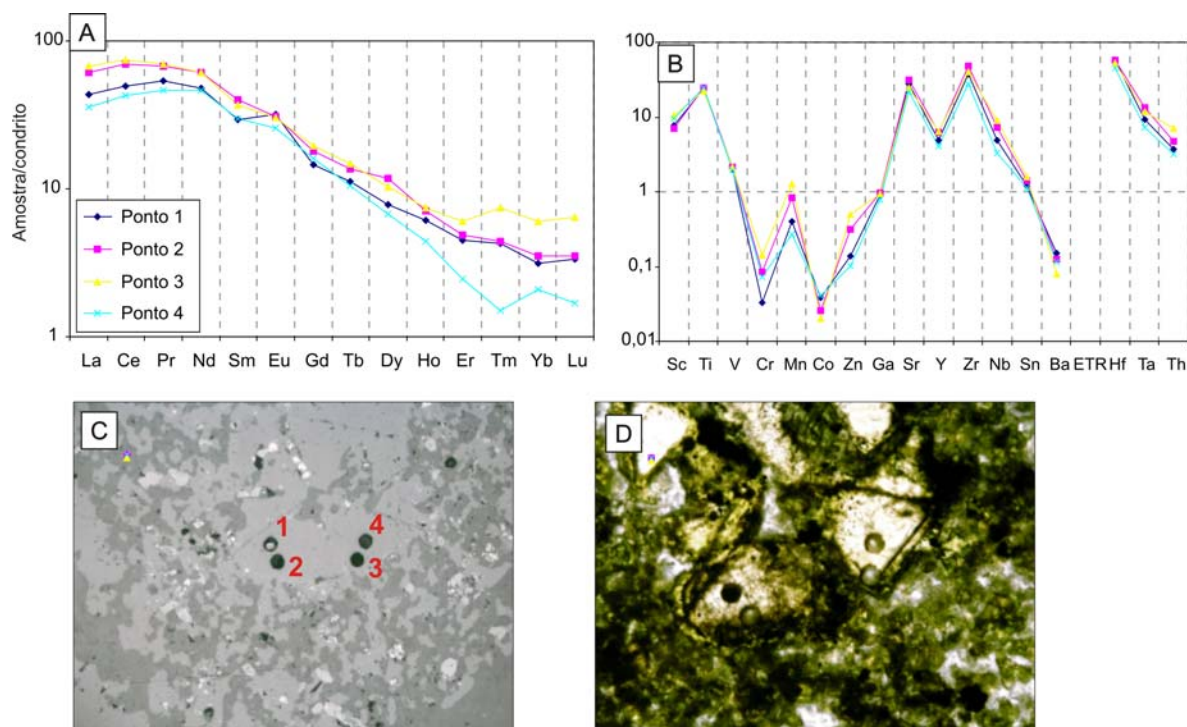


Figura 5-34: Dados obtidos para clinopiroxênio de núcleo róseo e borda verde do glomérulo máfico presente no enclave microgranular félsico (amostra PPE-31). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz refletida do cristal, com os pontos analisados destacados (lado maior da foto = 1,3mm), (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal (lado maior da foto = 0,81mm).

Já o diopsídio róseo presente no glomérulo máfico do enclave félsico possui zoneamento mais forte em relação aos do enclave máfico-ultramáfico. Na Figura 5-35 é possível notar certa semelhança entre o ponto 1 e o ponto 4 e entre os pontos 2 e 3. Nos pontos 1 e 4 o cristal possui menor concentração de ETR, com exceção à uma pequena anomalia positiva de Eu no ponto 1. Enquanto os pontos 2 e 3 possuem maior concentração de Mn, Zn, Zr, Nb, Ta e Th.

Na Figura 5-36 ficam evidentes as diferenças de concentração de ETR para os principais tipos de clinopiroxênio analisados. Os pontos plotados em tons verdes

correspondem aos clinopiroxênios de tonalidade verde do nefelina sienito de granulação mais grossa e à borda verde dos cristais de núcleo róseo/incolor. Os pontos plotados em tons rosas/alaranjados correspondem aos núcleos róseos/incolores dos clinopiroxênios analisados.

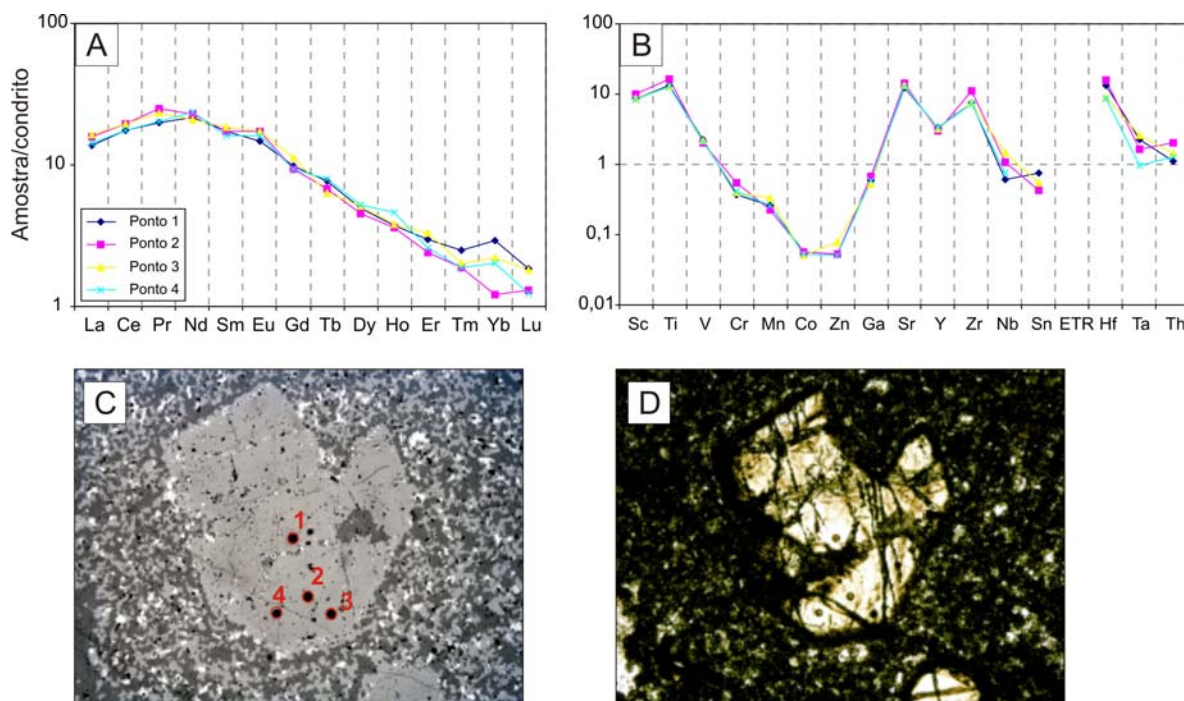


Figura 5-35: Dados obtidos para macrocristal de clinopiroxênio de núcleo róseo/incolor e borda verde do enclave microgranular máfico-ultramáfico “porfírico” (amostra PPE-22). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz refletida do cristal, com os pontos analisados destacados, (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal (lado maior das fotos = 2mm).

Nota-se que as concentrações mais altas de ETR dão-se nas zonas verdes dos cristais, em especial as bordas verdes nos cristais do nefelina sienito mais fino e do enclave félsico. As concentrações mais baixas de ETR correspondem aos espécimes róseos/incolores do nefelina sienito mais fino e do enclave máfico-ultramáfico, que são muito semelhantes entre si. Concentrações intermediárias são encontradas nos núcleos róseos dos cristais do enclave félsico, tanto da rocha quanto do agregado máfico nela presente. O clinopiroxênio verde do nefelina sienito médio-grosso a grosso tende a ser mais rico em ETR mais pesadas (Tm, Yb, Lu) do que os outros espécimes verdes.

Quanto aos demais elementos traços, os clinopiroxênios esverdeados tendem a ter maior concentração do que a variedade rosada, com exceção para os elementos Sc, Ti e Co, e um pico negativo de Rb para o cristal verde do nefelina sienito médio-grosso a grosso.

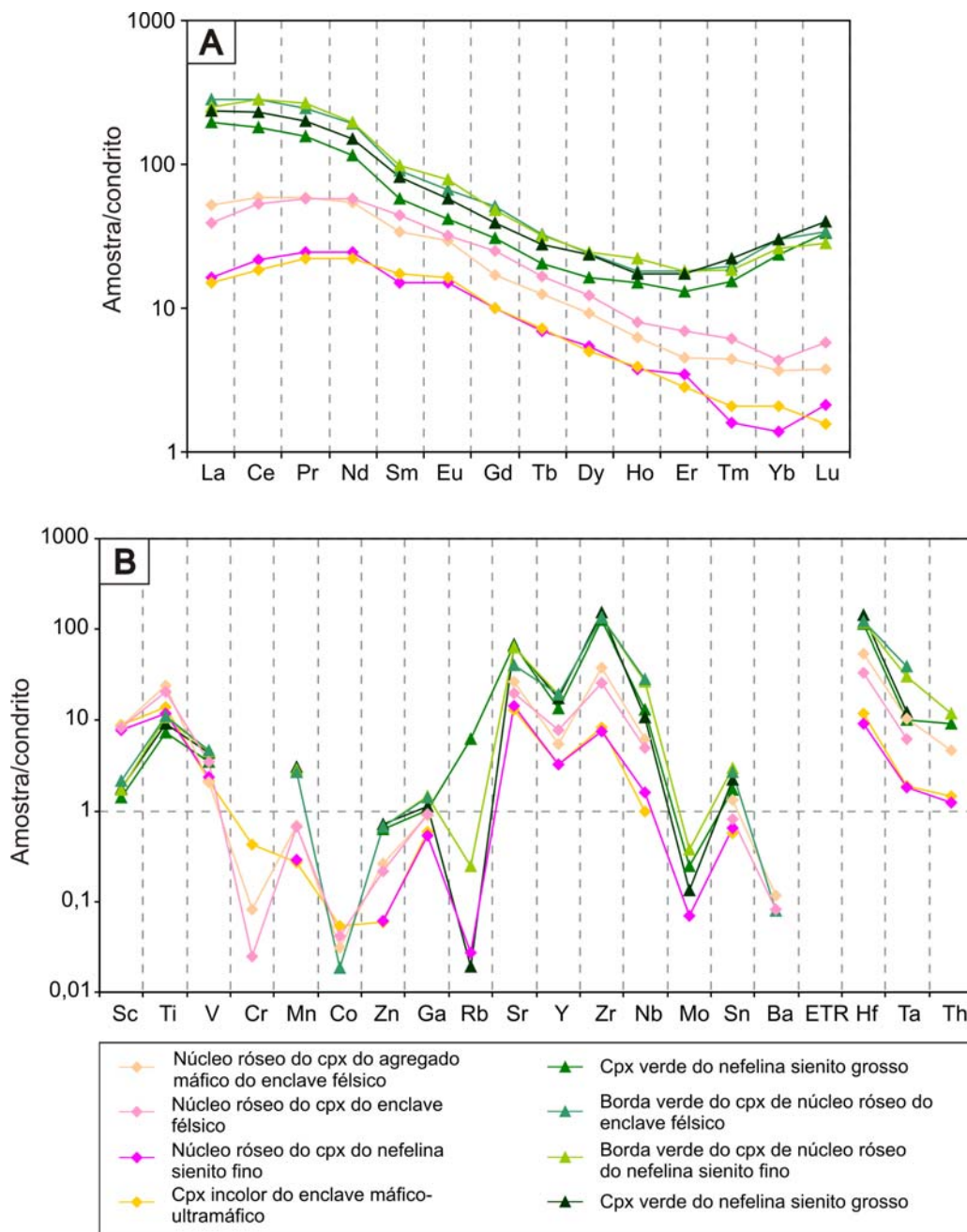


Figura 5-36: Diagramas binários das médias das concentrações de elementos traços dos principais clinopiroxênios analisados, normalizados pelo condrito de Taylor & McLennan (1985). (A) Para os ETR e (B) para alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR. Cpx = clinopiroxênio.

5.2.2 Titanita

A titanita presente na rocha hospedeira possui maior concentração de ETR do que a presente nos enclaves máfico-ultramáficos, em especial a do nefelina sienito de granulação média-fina a fina. A titanita presente nos enclaves máfico-ultramáficos, tanto nos equigranulares quanto nos “porfiríticos”, possui menor concentração de ETR em relação à presente nos outros litotipos e possui um leve pico positivo de Eu. A titanita presente nos bolsões félsicos dos enclaves máfico-ultramáficos possui padrão mais semelhante ao da rocha hospedeira dos enclaves do que a estes propriamente ditos. Já a titanita presente na

borda fonolítica dos enclaves máfico-ultramáficos possui padrão de ETR idêntico a do nefelina sienito de granulação grossa, como evidenciado na Figura 5-37.

Em relação aos demais elementos traços, as maiores diferenças de concentração são dos elementos Rb, Y, Zr, Nb, Hf, Ta, Th e U. Os nefelina sienitos possuem tendências semelhantes entre si, com exceção para o Sr, Mo e Th, os quais estão presentes em maior concentração no nefelina sienito de granulação fina, e Rb, presente em maior concentração no nefelina sienito mais grosso (ver Figura 5-37).

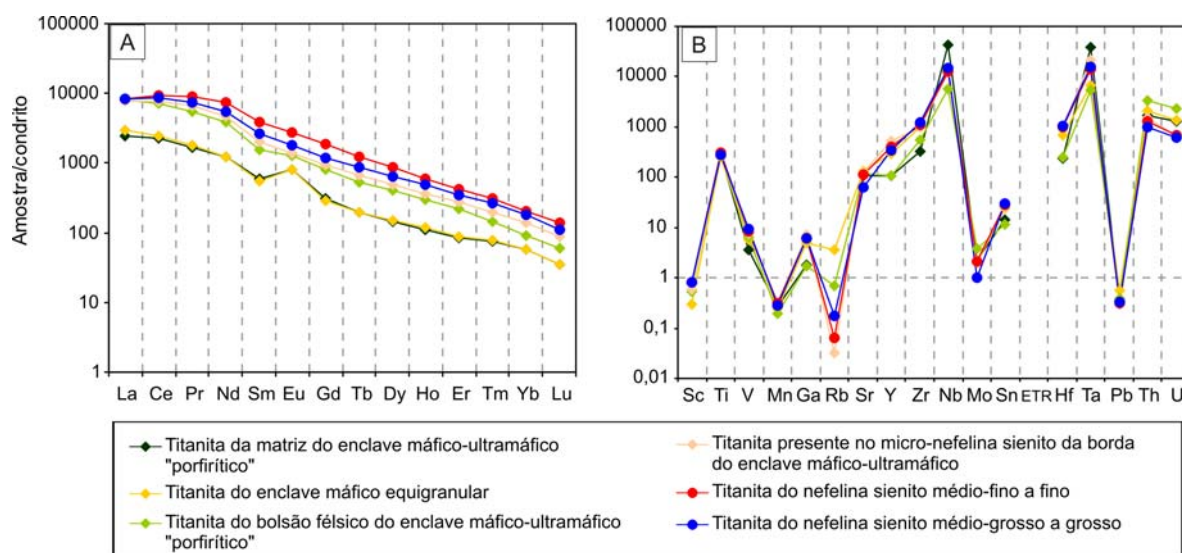


Figura 5-37: Média dos dados obtidos para titanita dos nefelina sienitos e do enclave microgranular máfico-ultramáfico. (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito de Taylor & McLennan (1985).

Os zoneamentos da titanita, observados por imagem BSE de caráter composicional, não foram possíveis de ser analisados por laser, pois o tamanho do spot excedia mais de cinco vezes o tamanho de cada zona, misturando-as durante a ablação.

5.2.3 Apatita

A apatita presente dos litotipos analisados é caracterizada por possuir quantidades significativas de Sr, Y, Th e U. Análises representativas destes cristais estão ilustradas nas Figuras 5-38, 5-39 e 5-40.

A apatita do nefelina sienito médio-fino a fino pode possuir um leve pico negativo de Nd e de Yb. O zoneamento dos elementos traços é muito sutil para esta apatita, como mostra o diagrama B da Figura 5-38. Assim como as outras fases minerais analisadas, a apatita do nefelina sienito possui maior concentração de ETR do que a dos enclaves (ver Figura 5-41).

A apatita dos enclaves máfico-ultramáficos "porfiríticos" possui notável zoneamento de Zr, Nb e U. O padrão de ETR para esta apatita possui um leve pico negativo de Sm

(Figura 5-39). Os enclaves máficos equigranulares possuem o menor teor de ETR em relação às apatitas estudadas (Figura 5-41).

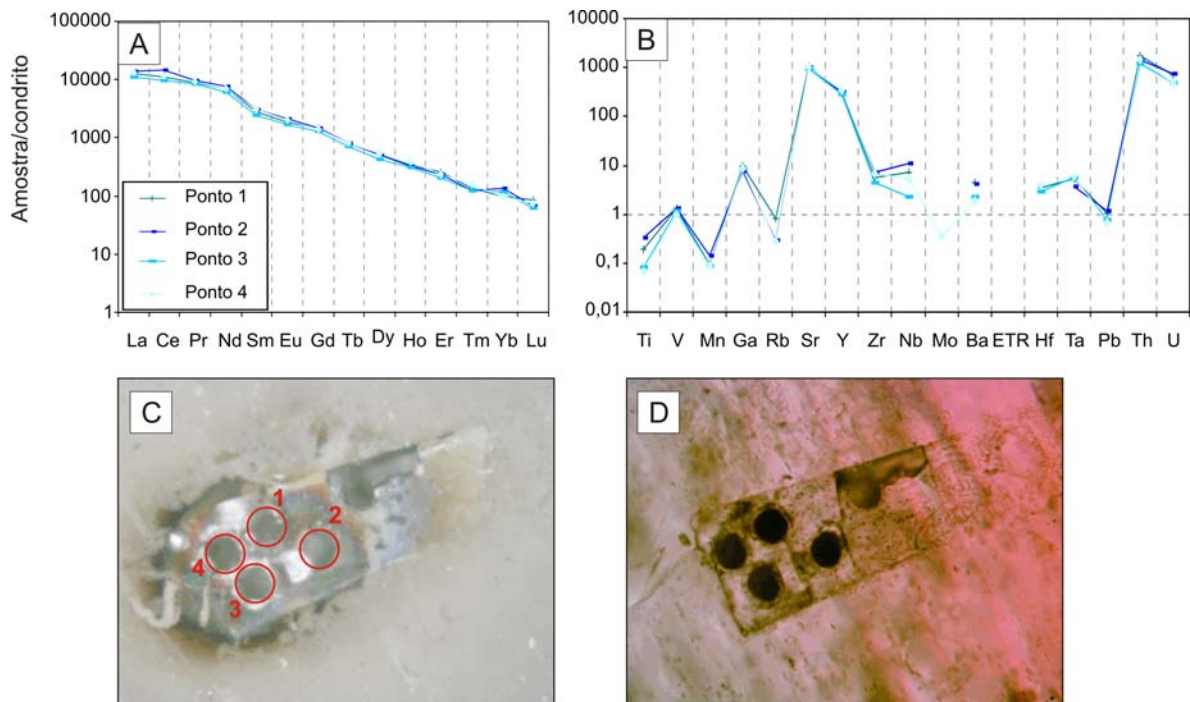


Figura 5-38: Dados obtidos para apatita do nefelina sienito médio-fino a fino (amostra PPE-6b). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz refletida do cristal, com os pontos analisados destacados, (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal. A porção rosada que aparece na foto (D) é devida a marcações com caneta indelével vermelha no vidro da lâmina (lado maior das fotos = 0,26mm).

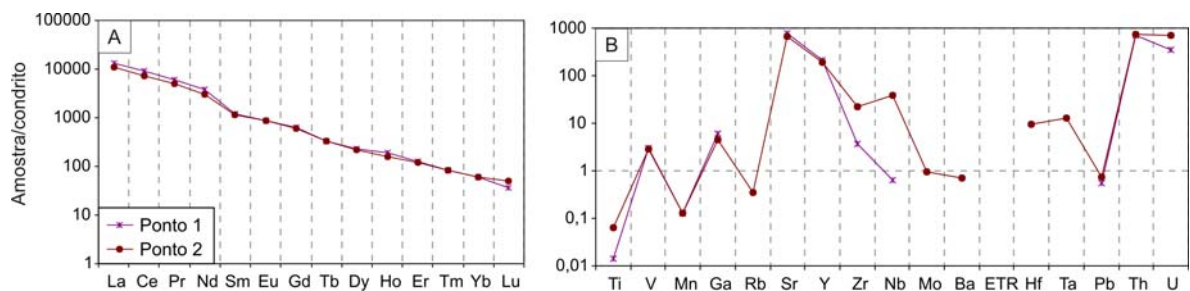


Figura 5-39: Dados obtidos para apatita do enclave microgranular máfico-ultramáfico "porfírico" (amostra PPE-32A). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada do cristal com os pontos analisados destacados (lado maior da foto = 0,65mm).

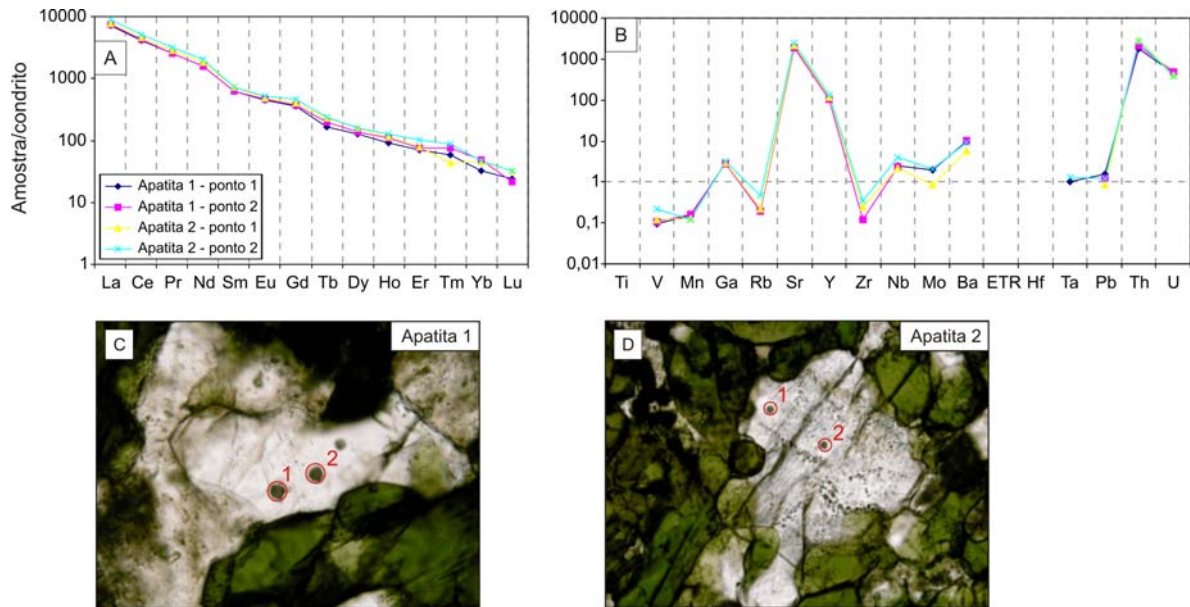


Figura 5-40: Dados obtidos para apatita do enclave microgranular máfico-ultramáfico equigranular (amostra PPE-5B). (A) Diagrama binário dos valores obtidos para os ETR e (B) diagrama binário de alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR, ambos normalizados pelo condrito. (C) Fotomicrografia sob luz refletida da apatita 1, com os pontos analisados destacados (lado maior da foto = 0,65mm), (D) Fotomicrografia sob luz plano-polarizada da apatita 2, com os pontos analisados em destaque (lado maior da foto = 1,3mm).

As apatitas do nefelina sienito médio-fino a fino, relativamente aos enclaves máfico-ultramáficos, possui um empobrecimento mais suave de ETR. As maiores diferenças de teor são dos elementos Sr, Y, Th e Zr.

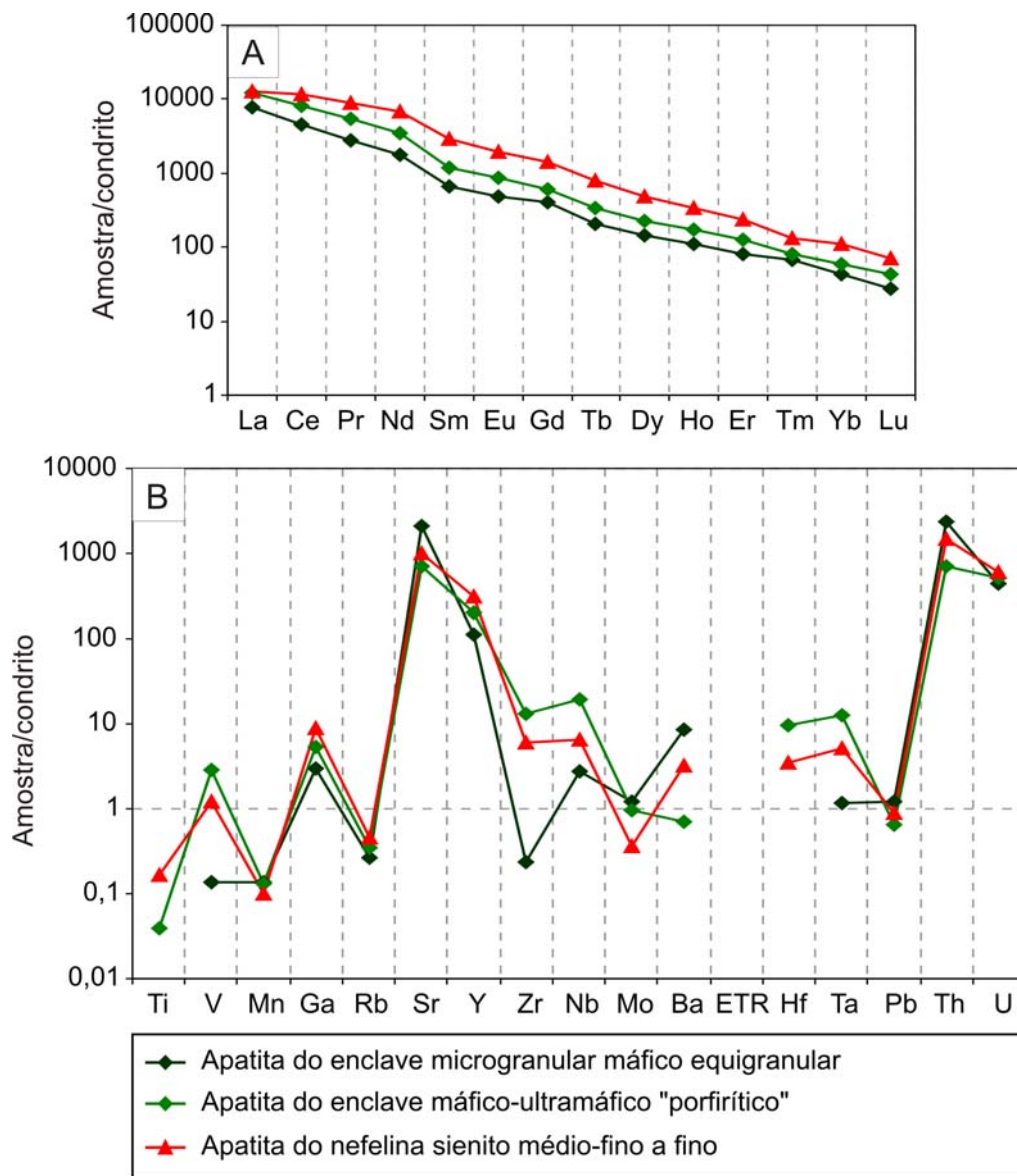


Figura 5-41: Diagramas binários das médias das concentrações de elementos traços apatitas analisadas, normalizadas pelo condrito de Taylor & McLennan (1985). (A) Para os ETR e (B) para alguns elementos traços mais leves e mais pesados do que os ETR.

6 QUÍMICA DE ROCHA

As análises químicas de rocha realizadas foram obtidas através de Fluorescência de Raios-X (FRX) e de Espectrometria de Massas com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS), de 13 amostras representativas, compreendendo os enclaves microgranulares félsicos e máfico-ultramáficos, o dique fonolítico e as duas fácies de nefelina sienito.

6.1 Classificação e nomenclatura

Os dados obtidos para elementos maiores e menores são apresentados na Tabela 1/ ANEXO IV.

Os enclaves félsicos, diques e nefelina sienitos apresentam variações sutis em relação aos elementos maiores. Possuem aproximadamente 54% (em peso) de SiO_2 , correspondendo a rochas intermediárias, e 16% de álcalis totais ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), o que lhes dá o caráter de fonolito (enclave félsico e dique) ou nefelina sienito no caso da rocha encaixante (que possui textura de caráter plutônico distinta), de acordo com o diagrama classificatório TAS de Le Bas *et al.* (1986, Figura 6-1). Ainda de acordo com este diagrama, os enclaves máfico-ultramáficos são classificados como tefritos/basanitos.

As amostras PPE-13 e PPE-14 (nefelina sienito de granulação grossa), analisadas durante a disciplina em 2007, mostraram valores inferiores de álcalis totais em relação aos outros litotipos félsicos analisados, esta discrepância de valores pode ter ocorrido pela forte heterogeneidade desta fácies, conferindo-lhe o aspecto “manchado”, descrito anteriormente. No entanto, os enclaves máfico-ultramáficos possuem concentrações muito inferiores de SiO_2 (ca. 44% em peso) e fraca alcalinidade (ca. 7% de álcalis totais).

Para a classificação dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos foi optado o diagrama classificatório de De La Roche *et al.* (1980), que utiliza $R_1 [4\text{Si} - 11(\text{Na} + \text{K}) - 2(\text{Fe} + \text{Ti})]$ e $R_2 (6\text{Ca} + 2\text{Mg} + \text{Al})$ como índices. Por seu alto grau de alcalinidade e muito baixa saturação em sílica estes enclaves são classificados como rochas ultrabásicas alcalinas e correspondem quimicamente a nefelinitos/ankaratritos (Figura 6-2).

Os nefelina sienitos presentes no Maciço Alcalino Poços de Caldas podem ter tanto caráter miasquítico como agpaítico, estes últimos caracterizados, principalmente, por presença de eudialita. Sørensen (1997) define como rocha agpaítica, não só aquelas que possuem o índice de peralcalinidade $((\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3)$ maior do que 1, mas também pela presença de minerais agpaíticos, como eudialita, astrofilita, mosandrita, etc.

Dentre os nefelina sienitos, o de granulação nefelina média-grossa a grossa tende a ser mais miasquítico, com $\text{IP} \sim 0,9$, enquanto o médio-fino a fino possui $\text{IP} \sim 1,1$. Os enclaves félsicos, os máfico-ultramáficos e o dique possuem IP em torno de 1.

As rochas estudadas, plotadas no diagrama classificatório de Shand (1943), são classificadas como peralcalinas/metaluminosas, beirando o limite entre elas (Figura 6-3). O nefelina sienito médio-grosso a grosso, o dique e os enclaves félsicos tendem a ser mais metaluminosos, podendo ser peralcalinos, enquanto o nefelina sienito médio-fino a fino é estritamente peralcalino. Os enclaves máfico-ultramáficos têm caráter peralcalino/metaluminoso. Em relação aos álcalis, estas rochas são estritamente potássicas e o nefelina sienito fino tende a ser pouco mais sódico.

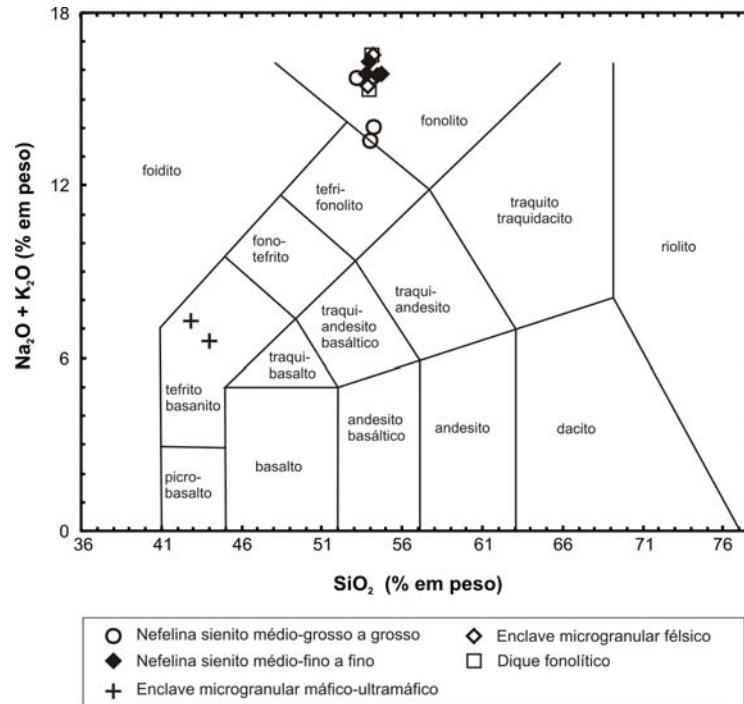


Figura 6-1: Diagrama classificatório TAS (Le Bas *et al.*, 1986), com amostras da Pedreira da Prefeitura.

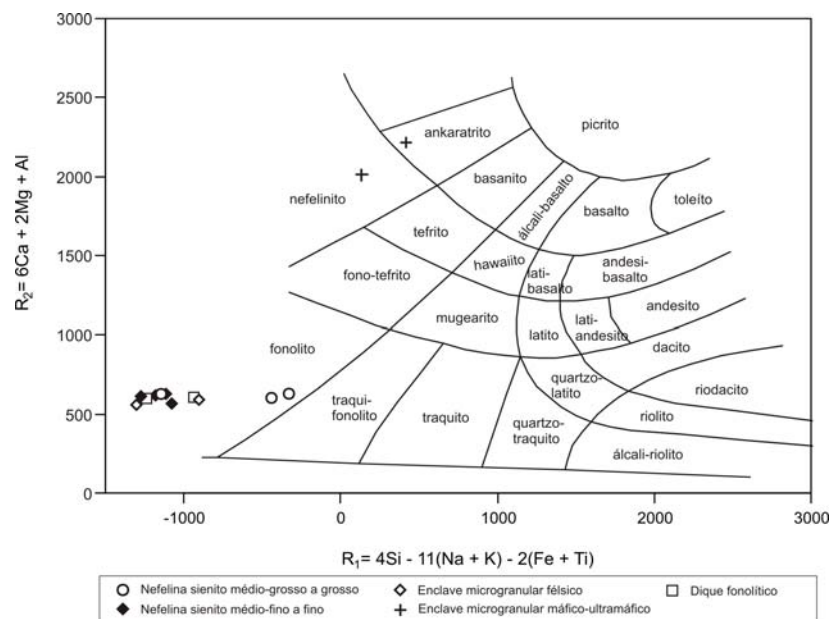


Figura 6-2: Diagrama classificatório $R_1 - R_2$ (De La Roche *et al.*, 1980) para as amostras de enclave microgranular máfico-ultramáfico.

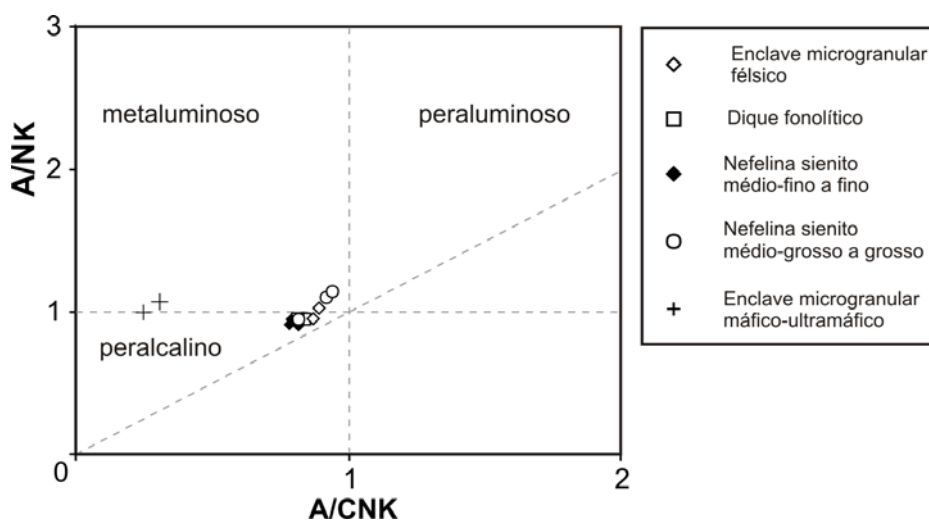


Figura 6-3: Diagrama de classificação das rochas da Pedreira da Prefeitura, de acordo com seu grau de peralcalinidade (Shand, 1943).

6.2 Elementos maiores e menores

Como citado anteriormente, o teor de SiO_2 das rochas félsicas varia muito pouco, em torno de 54% (em peso), e os enclaves máfico-ultramáficos possuem teores em torno de 43%. Como é de esperar para rochas ultrabásicas/ultramáficas, os enclaves máfico-ultramáficos possuem maiores teores de TiO_2 (3,2% em peso, em média), Fe_2O_3 (11,3%), MgO (6,1%) e CaO (15%) e menores de Al_2O_3 (10,6%), K_2O (1,7%), além de SiO_2 , do que os tipos félsicos intermediários estudados (cf. Tabela 1/ ANEXO IV).

O teor de CaO mostra-se pouco menor nos enclaves félsicos (1,3% em peso, em média) enquanto nos demais litotipos félsicos, ele varia muito pouco (em torno de 1,8%). O nefelina sienito de granulação mais grossa possui caráter alcalino menos sódico do que os outros litotipos félsicos, ao passo que os enclaves félsicos possuem menos Fe_2O_3 (3,1%, em média) e TiO_2 (0,5%).

Para todas as rochas félsicas estudadas observa-se comportamento incompatível entre SiO_2 e MgO , com valores inversamente proporcionais (Figura 6-4). Nos diagramas da Figura 6-5 têm-se os teores de TiO_2 e K_2O das rochas analisadas, usando o Índice de Diferenciação (soma de Q, Or, Ab, Ne, Ks e Lc normativos) como referência. É possível observar a tendência incompatível do TiO_2 , enquanto que o K_2O possui caráter compatível em relação a este índice. Os teores de K_2O dos enclaves félsicos mostram-se maiores do que o das encaixantes.

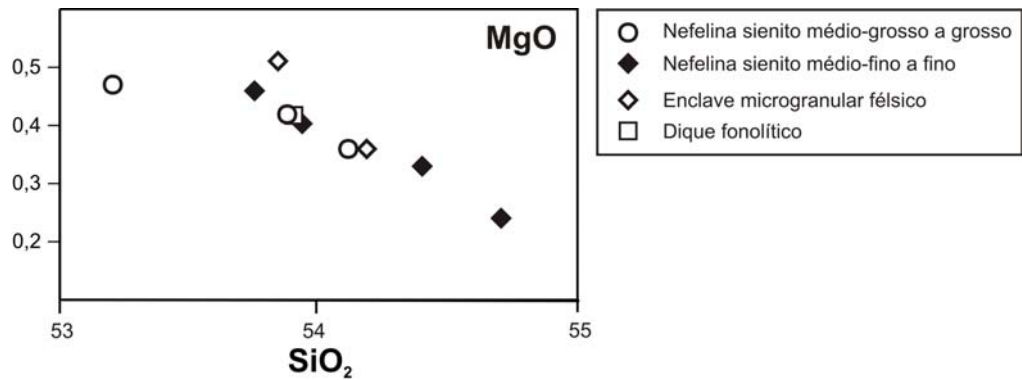


Figura 6-4: Diagrama de variação para MgO das amostras analisadas com exceção dos enclaves máfico-ultramáficos, utilizando sílica como índice de diferenciação. Valores estão em % em peso.

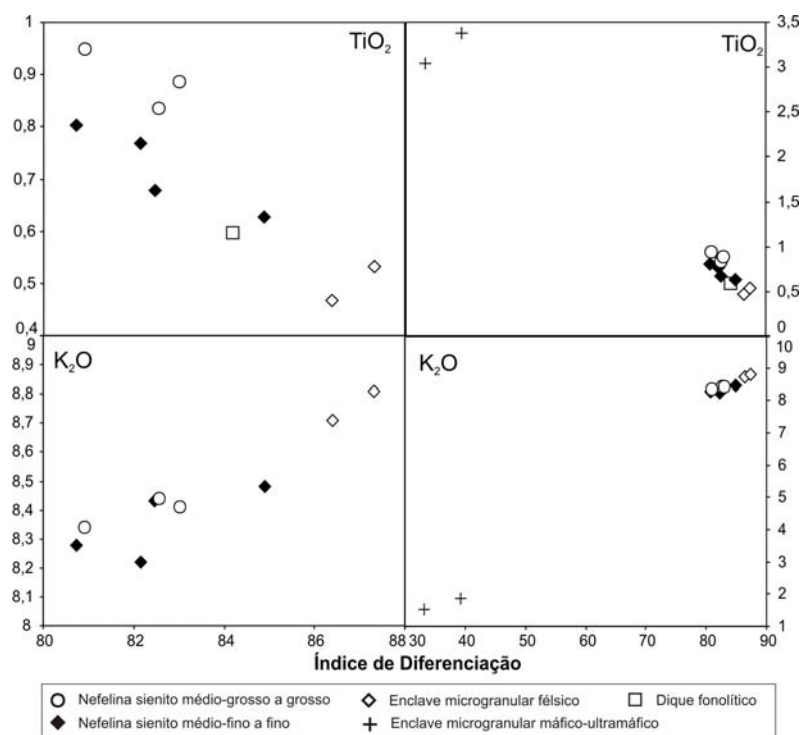


Figura 6-5: Diagramas de variação para TiO₂ e K₂O, das amostras analisadas, utilizando Índice de Diferenciação (soma de Q, Or, Ab, Ne, Ks e Lc normativos). Valores dos óxidos estão em % em peso.

6.3 Elementos traços e terras raras

Os dados obtidos para os elementos traços por FRX são apresentados na Tabela 3/ ANEXO IV e os obtidos para elementos traços e elementos terras raras (ETR) por ICP-MS no ANEXO V. O Cl, o F e o S não foram analisados em 2008 (rotina para enclaves máfico-ultramáficos).

Os elementos traços que foram analisados através da FRX e também do ICP-MS, que são Ba, Ce, La, Nb, Nd, Pb, Rb, Sr, U, Y e Zr, mostraram resultados muito próximos para ambas análises. Porém, como é sabido, o método por ICP-MS confere melhor

precisão, portanto os dados citados para estes elementos são os obtidos através do ICP-MS.

Uma característica notável das rochas analisadas é a alta concentração de Sr. O nefelina sienito médio-grosso a grosso possui ca. 3000 ppm de Sr, enquanto a fácies mais fina possui ca. 2000 ppm. Os enclaves máfico-ultramáficos apresentam as menores concentrações, com 1055 ppm (em média) enquanto os félsicos e o dique possuem 2400 ppm (em média) e 1640 ppm, respectivamente.

Os enclaves félsicos se destacam por possuírem menores teores de ETRs e também de Zn, Cl, Nb. Estes enclaves possuem assinatura química mais semelhante à do dique fonolítico.

Dentre os elementos traços, vale a pena destacar o Zr, Zn, La e Th por seu comportamento compatível com o Nb (Figura 6-6). Os dois enclaves máfico-ultramáficos analisados apresentam valores muito distintos entre si destes elementos. Essa diferença pode existir devido à maior ou menor quantidade de zonas heterogêneas destes enclaves, como quantidade de megacristais de clinopiroxênio ou mesmo de bolsões de mineralogia félsica. O enclave félsico apresenta os menores teores de Zr, Zn, La e Th, no entanto o dique fonolítico e o nefelina sienito fino possuem teores semelhantes e intermediários destes elementos, apesar de que as concentrações das amostras de nefelina sienito fino variam bastante.

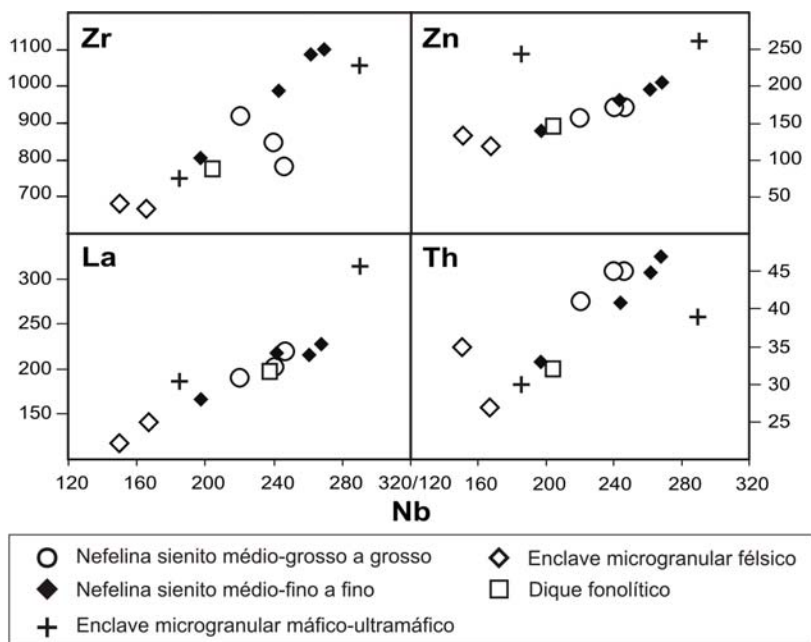


Figura 6-6: Diagramas de variação para Zr, Zn, La e Th das amostras analisadas, utilizando Nb como índice. Valores estão em ppm.

As contrações de U e Ba do nefelina sienito grosso tende a ser maior do q dos outros litotipos (ver Figura 6-7). No caso do diagrama U/Th da Figura 6-7, é marcada a maior afinidade do dique fonolítico com o enclave félsico, isso ocorre também para a relação

Ba/Sr, porém um dos enclaves félsicos analisados possui teores muito superiores destes elementos. No panorama geral, o nefelina sienito fino-médio a fino possui composições intermediárias em relação à linha de tendência.

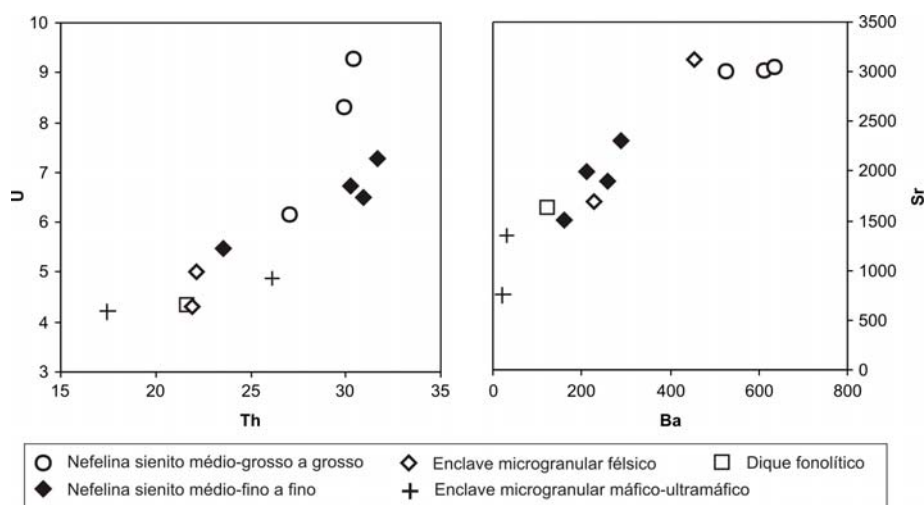


Figura 6-7: Diagramas de variação Th/U e Sr/Ba das amostras analisadas. Valores estão em ppm.

O diagrama multielementar tipo *spider* da Figura 6-8 nos mostra que, dentre os litotipos félsicos, os nefelina sienitos possuem valores maiores dos elementos traços analisados, com exceção do elemento Rb e de um pico anômalo positivo para o Sr, elementos os quais os enclaves microgranulares félsicos são mais ricos. Dentre os nefelina sienitos, o de granulação mais grossa possui maiores concentrações, no geral, do que o mais fino, com exceção de Rb, La, Zr, Y e Yb.

Os enclaves máfico-ultramáficos possuem menores concentrações de Cs, Rb, Ba, Th, U e Sr do que os litotipos félsicos. De fato, estes enclaves possuem picos fortemente negativos para o Ba e Sr, principalmente para o Ba, com teores deste bem mais próximos ao manto primitivo de Sun & McDonough (1989).

Ce, Pb, P, Sr e Ti têm maior concentração na rocha encaixante, em particular no nefelina sienito mais grosso, e está presente em menores quantidades nos enclaves microgranulares félsicos. De fato, os enclaves félsicos são mais pobres em Nb, La, Ce, P, Nd, Ti e Y e mais ricos em Rb do que os outros litotipos analisados.

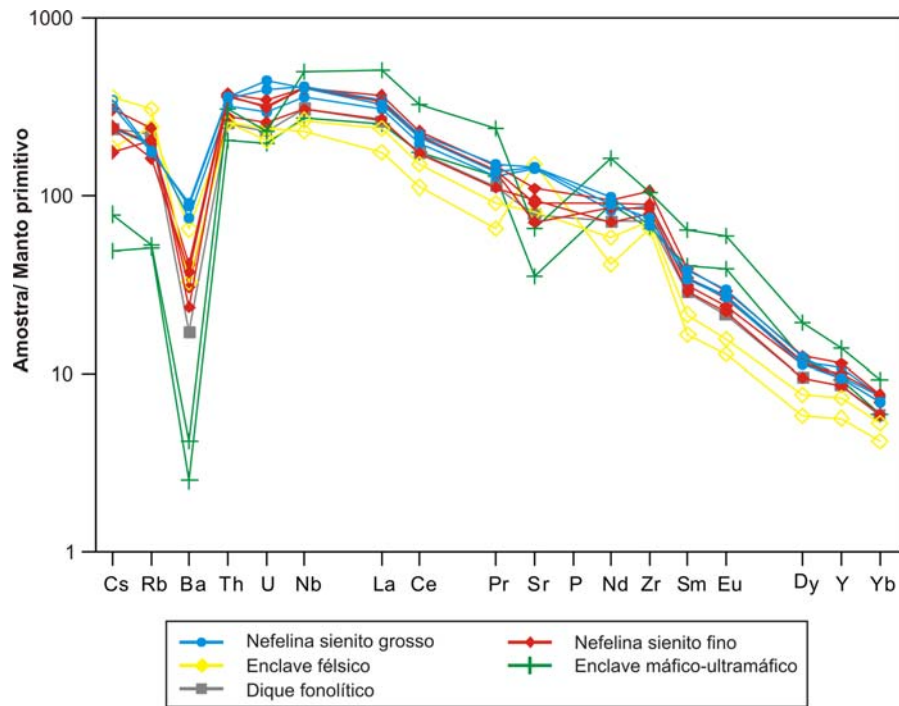


Figura 6-8: Diagrama multielementar para os elementos traços dos litotipos analisados, normalizados em relação ao Manto Primitivo de Sun & McDonough (1989).

Em relação aos ETRs, os enclaves félsicos possuem as menores concentrações e os máfico-ultramáficos as maiores. Os nefelina sienitos possuem concentrações intermediárias, mas ainda assim maiores do que o dique fonolítico (Figura 6-9).

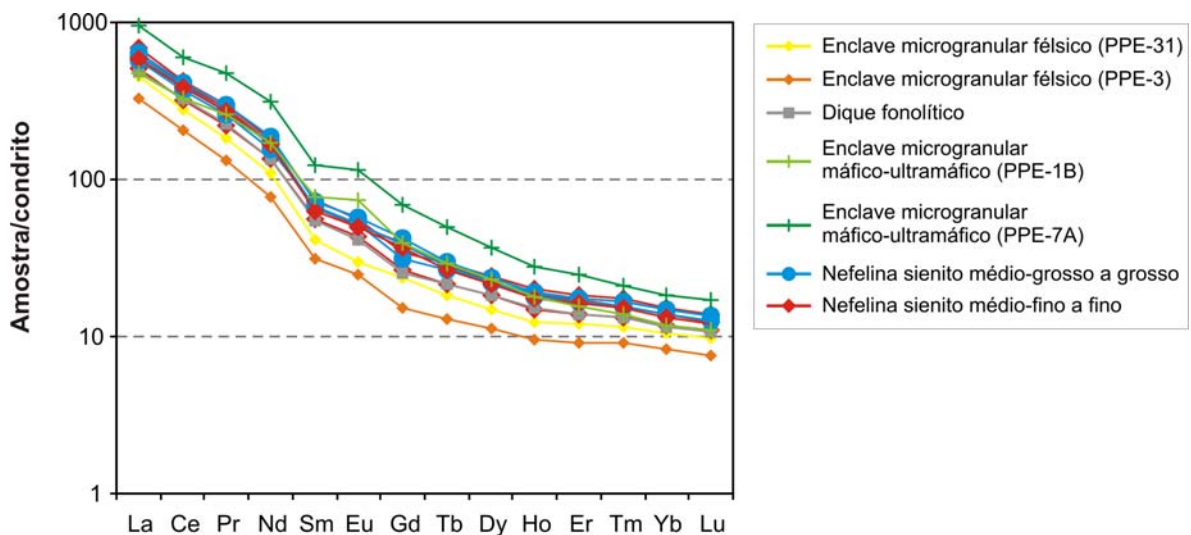


Figura 6-9: Diagrama para os elementos terras-raras dos litotipos analisados, normalizados em relação ao condrito de Taylor & McLennan (1985).

Os padrões de ETRs das rochas analisadas denotam um forte enriquecimento em elementos terras raras leves (ETRL) ($La_N/Yb_N \sim 43$). As rochas analisadas indicam um pico leve positivo de Eu no padrão de ETRs, mais evidente para os enclaves máfico-ultramáficos. Estes mostram padrões mais fracionados, principalmente para a amostra PPE-7A. Ainda

para os enclaves máfico-ultramáficos, há um empobrecimento mais acentuado de elementos terras raras pesados em relação às outras rochas.

O dique fonolítico possui padrão extremamente semelhante ao nefelina sienito de granulação mais fina, principalmente para a amostra PPE-28.

Com a finalidade de comparar, na Figura 6-10 são apresentados padrões de ETR de amostras coletadas pelo orientador e colegas, na região noroeste no Maciço Alcalino Poços de Caldas (pedreira Minas Pedra, ver Figura 3-2). Estas amostras correspondem a rochas sílico-carbonatíticas de afinidade alnoítica na forma de diques, veios e brechas, associadas com veios tardios de origem hidrotermal. Estes veios hidrotermais possuem como mineralogia: carbonato, flogopita, apatita, fluorita e egrina (Ulbrich *et al.*, 2002).

Na Figura 6-10 é possível notar diferenças e similaridades em relação ao padrão dos ETRs das rochas sílico-carbonatíticas em relação ao dos enclaves máfico-ultramáficos. A amostra PC-11B denota brusco empobrecimento em ETRs leves em relação aos outros litotipos, porém o padrão desta amostra denota suaves picos positivos de Er e Tm. Os picos positivos de Pr e Eu presentes nos padrões dos enclaves estão ausentes nos das rochas sílico-carbonatíticas.

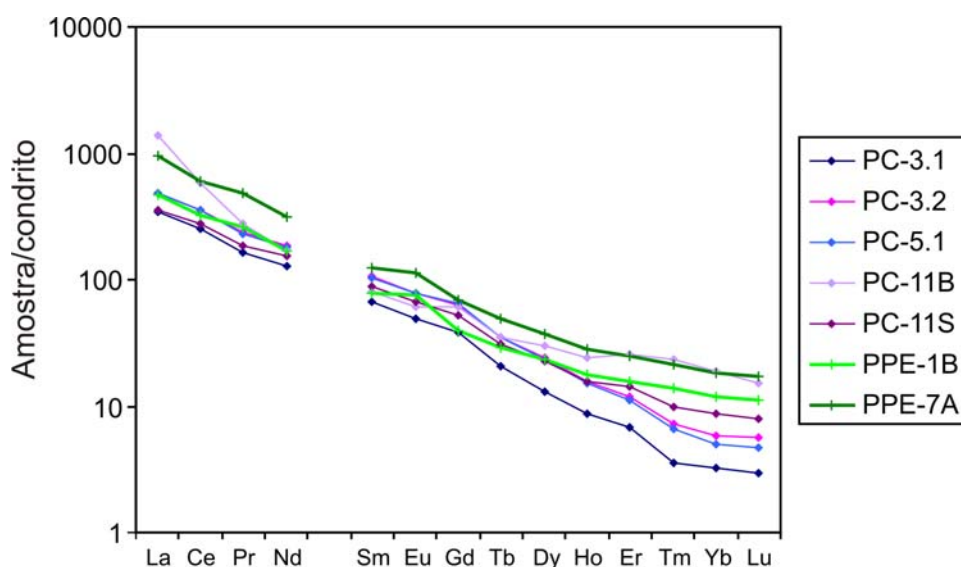


Figura 6-10: Diagrama para os elementos terras-raras das rochas sílico-carbonatíticas da pedreira Minas Pedra (amostras PC-3.1, 3.2, 5.1, 11B e 11S) e dos enclaves máfico-ultramáficos deste trabalho (PPE-1B, 7A). Os dados normalizados pelo condrito de Taylor & McLennan (1985).

7 INTERPRETAÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos para este trabalho visaram complementar e aprofundar os dados petrográficos e de química mineral, por microsonda eletrônica (WDS), obtidos durante a graduação para os projetos: “Evolução textural e mineralogia de enclaves microgranulares em nefelina sienitos da Pedreira da Prefeitura, Maciço Alcalino Poços de Caldas (MG-SP)” (IC/FAPESP) e “Petrografia e mineralogia de enclaves máfico-ultramáficos em nefelina sienitos da Pedreira da Prefeitura, Maciço Alcalino Poços de Caldas (MG-SP)” (Trabalho de Formatura). Não obstante, os dados geoquímicos e de química mineral por LA-ICPMS permitiram o conhecimento mais aprofundado de alguns dos litotipos estudados. A união destes dados elucidou alguns aspectos petrográficos, mineralógicos e petrológicos importantes das rochas e enclaves em questão. Estes aspectos serão detalhados a seguir.

Os nefelina sienitos da Pedreira, que tipicamente contêm enclaves, podem ser diferenciados pela textura: os nefelina sienitos de granulação média-grossa a grossa, tipicamente foiaíticos, e os de granulação fina a fina-média com feldspato alcalino poiquilítico. O dique fonolítico, encontrado no sienito de granulação mais grossa, apresenta um arranjo textural similar ao dos enclaves microgranulares félsicos (ver também Ulbrich *et al.*, 1979; Ulbrich, 1983, 1984).

As relações geológicas entre as rochas mais típicas, descritas (nefelina sienitos e dique aplítico) na Pedreira da Prefeitura, indicam a seqüência relativa de colocação dos corpos. As relações de contato demonstram que os nefelina sienitos foiaíticos se colocaram quando os de granulação mais fina ainda tinham capacidade de movimentação suficiente para serem rompidos. Em um período mais tardio houve nova manifestação magmática, esta responsável pela colocação de diques fonolíticos com textura equigranular ou porfirítica em matriz fina que preenchem fraturas tipicamente rúpteis no nefelina sienito grosso e fino (ver também Ulbrich *et al.*, 1979; Ulbrich, 1984).

Os enclaves microgranulares félsicos são mais comuns no nefelina sienito médio-grosso a grosso. Estes enclaves são texturalmente semelhantes ao dique fonolítico. No entanto, enclaves microgranulares máfico-ultramáficos são mais comuns no nefelina sienito médio-fino a fino. Quando presentes no nefelina sienito grosso, os enclaves máfico-ultramáficos geralmente são bordejados por um nefelina sienito fanerítica muito fino, de espessura milimétrica a centimétrica, e tendem a ter formas mais arredondadas, sugerindo estrutura do tipo “enclave duplo”.

Os enclaves máficos presentes no nefelina sienito médio-fino a fino podem ser divididos em dois tipos: um caracterizado por matriz fanerítica muito fina a afanítica, aspecto “porfirítico”, com macrocristais de clinopiroxênio; outro de textura equigranular e granulação

fina. Ambos, mais particularmente o equigranular, apresentam-se bem transformados, aparentemente recristalizados. Estes enclaves ocorrem concentrados próximos à zona de contato entre as diferentes fácies de nefelina sienito.

As relações entre os enclaves máfico-ultramáficos e os sienitos hospedeiros suportam a hipótese de coexistência de magmas distintos. Estes enclaves podem possuir bordas mais escuras, de granulação muito fina, que sugerem resfriamento rápido em contato com a encaixante. Em alguns espécimes, porções do enclave se encontram disruptas, formando lóbulos e sugerindo um estado ainda plástico durante sua colocação. A presença de pequenos glomérulos máficos no nefelina sienito mais fino, e também nos enclaves microgranulares félsicos, de textura semelhante à dos enclaves máfico-ultramáficos porfiríticos, sugere mistura parcial, com incorporação de macrocristais à rocha.

É interessante notar, entretanto, que parte significativa dos enclaves encontrados no nefelina sienito mais fino apresenta bordas lineares e angulosas, talvez relacionadas ao contraste de viscosidade entre o magma ultramáfico e o fonolítico, ou ainda à diferença de estágio de cristalização dos dois.

O clinopiroxênio, principal mineral máfico das rochas estudadas, está presente em diversas fases. Nos nefelina sienitos, a variedade verde prismática e poiquilítica é egirina-augita, o róseo/incolor é diopsídio e sua borda verde, egirina-augita, ou egirina no caso dos cristais do nefelina sienito mais grosso, e a variedade fibrosa, de cristalização tardia, corresponde a egirina. No enclave microgranular máfico-ultramáfico, o clinopiroxênio verde da matriz é diopsídio e os macrocristais correspondem a diopsídio com Ti. Na variedade equigranular de enclave máfico, o clinopiroxênio em contato com a encaixante possui zoneamento de diopsídio a egirina-augita (núcleo-borda), e o do interior do enclave varia entre diopsídio-hedenbergita.

No nefelina sienito mais fino o clinopiroxênio róseo/incolor possui teores mais extremos de Mg, indicando valores de *mg#* relativamente sempre maiores do que os do clinopiroxênio do nefelina sienito mais grosso, que possui teores mais extremos de Na. O índice *mg#* do clinopiroxênio dos enclaves máfico-ultramáficos é semelhante ao do núcleo róseo/incolor do clinopiroxênio do nefelina sienito mais fino, em torno de 0,9.

A Figura 7-1 nos esclarece quanto às tendências composicionais do clinopiroxênios das rochas estudadas. O clinopiroxênio do nefelina sienito mais grosso não possui termos tão magnesianos quanto o das outras rochas, entretanto, tanto os enclaves quanto os glomérulos máficos não desenvolvem a mineralogia sódica como as encaixantes. O nefelina sienito médio-fino a fino possui 2 notáveis *gaps* na curva de tendência, um entre o termo extremo magnesiano, outro entre o seu extremo sódico e as composições intermediárias.

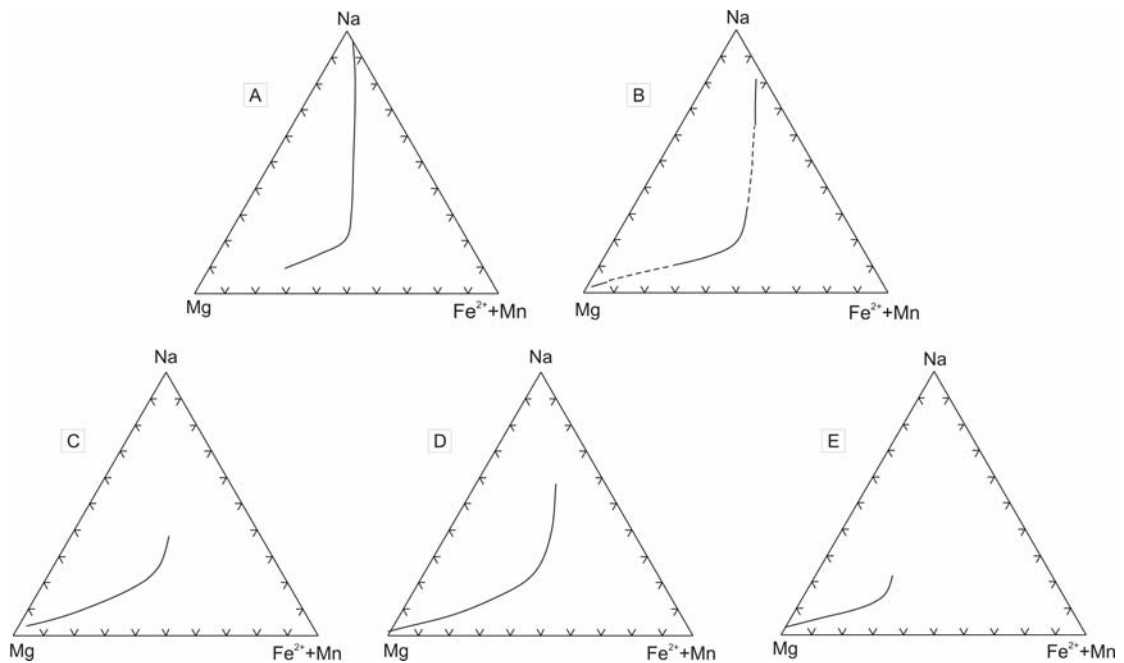


Figura 7-1: Diagramas ternários Na – Mg – Fe²⁺+Mn, mostrando as tendências composicionais do clinopiroxênio: (A) do nefelina sienito médio-grosso a grosso, (B) do nefelina sienito médio-fino a fino, (C) dos enclaves máfico-ultramáficos, (D) dos enclaves félsicos e (E) dos glomérulos máficos presentes no nefelina sienito fino e no enclave félsico.

Tendo em vista uma comparação mais ampla, a Figura 7-2 mostra uma compilação da literatura das tendências de clinopiroxênios de rochas variadas, ao redor do mundo. As rochas da pedreira da prefeitura mostram um alto grau tanto de enriquecimento em diopsídio, quanto em egirina, ainda mais quando somente as tendências insaturadas são comparadas.

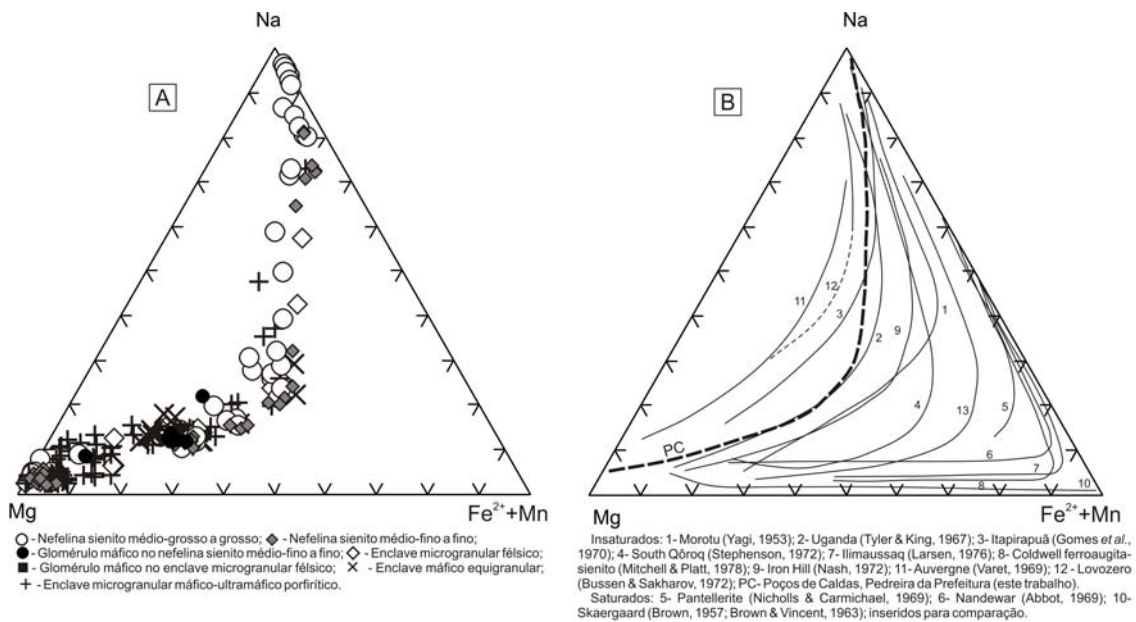


Figura 7-2: Diagramas ternários expressos por Na – Mg – Fe²⁺+Mn mostrando (A) todos os pontos de análise (por WDS) dos cristais de clinopiroxênio deste trabalho; (B) Compilação de tendências composicionais de clinopiroxênio publicados, comparativamente à dos analisados neste trabalho (PC); adaptada de Larsen (1976) e Mitchell & Platt (1982).

Os minerais/fases opacos presentes nas amostras estudadas são membros da solução-sólida magnetita-ulvoespínélio. As magnetitas dos enclaves máfico-ultramáficos possuem maior teor de Ti e menor de Fe^{2+} do que a dos nefelina sienitos. A nefelina destes enclaves possui assinatura química semelhante à do nefelina sienito mais fino, com maior conteúdo de Fe^{3+} e menor de K em relação ao nefelina sienito mais grosso. O feldspato dos enclaves máfico-ultramáficos mostra maior variação composicional ($Ab_{10-33}Or_{72-80}$), em seu extremo sódico é semelhante ao do nefelina sienito mais grosso e em seu extremo potássico, com teores de SrO, em média, de 1,7% (em peso), é semelhante ao do mais fino.

De acordo com os padrões de ETR, a variedade verde de clinopiroxênio é mais fracionada e possui notado enriquecimento em ETR pesados (ETRP). O núcleo incolor do diopsídio do enclave máfico-ultramáfico possui padrão semelhante ao diopsídio róseo do nefelina sienito mais fino, com composições mais próximas ao condrito, principalmente em relação aos ETRP. A inflexão positiva do padrão para ETRP só é observada nas variedades verdes de clinopiroxênio e de forma mais tênue no diopsídio róseo do nefelina sienito mais fino. O núcleo róseo do diopsídio do enclave microgranular félsico possui afinidade com o diopsídio róseo presente no glomérulo máfico.

A geoquímica das amostras analisadas mostra que os enclaves félsicos tendem a ser mais parecidos, composicionalmente, aos diques fonolíticos. Isso sugere que estas rochas tiveram algum parentesco em sua gênese. Nota-se também que as fácies dos nefelina sienitos possuem diferenças composicionais marcantes, não somente texturais. A variedade mais fina é peralcalina e mais sódica, enquanto a variedade mais grossa varia entre peraluminosa e metaluminosa. Os enclaves máfico-ultramáficos são ultrabásicos, classificados como tefritos/basanitos (Le Bas *et al.*, 1986) ou nefelinitos/ankaratritos (De La Roche *et al.*, 1980), enquanto as rochas félsicas são intermediárias, correspondentes a fonolitos ou nefelina sienitos, dependendo da granulometria.

As rochas ultramáficas/ultrabásicas de afinidade alnoítica, aflorantes na porção noroeste do Maciço Alcalino Poços de Caldas (Ulbrich *et al.*, 2002), possuem padrões de ETR que indicam que estas rochas podem estar geneticamente ligadas aos enclaves máfico-ultramáficos.

Estes aspectos texturais e químicos destas rochas mostram que os enclaves máfico-ultramáficos estão intimamente relacionados ao nefelina sienito mais fino, e se diferem do nefelina sienito mais grosso, e que os enclaves félsicos se assemelham ao dique fonolítico. Estas relações sugerem coexistência de pelo menos dois magmas distintos: um insaturado de composição sienítica (correspondente ao nefelina sienito de granulação mais fina), outro insaturado ultramáfico/ultrabásico (correspondente aos enclaves máfico-ultramáficos) que interagiram e formaram o nefelina sienito médio-fino a fino e, como estrutura de mistura parcial, os enclaves máfico-ultramáficos (em um estágio inicial) e glomérulos máficos (em um estágio avançado da mistura parcial).

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbot, M.J. (1969). Petrology of the Nandewar volcano, N.S.W. Austrália. *Contr. Miner. Petrol.*, **20**: 115-134.
- Almeida Filho, R. & Paradella, W.R. (1977). Estudo do maciço alcalino de Poços de Caldas através de imagens Landsat com ênfase em mineralizações radioativas. *INPE*, 11/2-TPT/065.
- Alves, A.D. (2003). *Rochas vulcanoclásticas do Complexo Alcalino de Poços de Caldas - MG/SP*. São Paulo, Instituto de Geociências – USP. Dissertação de Mestrado: 106pp.
- Amaral, G.; Bushee, J.; Cordani, U.G.; Kawashita, K.; Reynolds, J.H. (1967). Potassium-argon ages of alkaline rocks from southern Brazil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **31**(2): 117-142.
- Bastin, G.F. & Heijligers, H.J.M. (1990). Progress in electron-probe micro-analysis. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, **21**: 90-92.
- Brown, G.M. (1957). Pyroxenes from the early and middle stages of fractionation of the Skaergaard Intrusion, East Greenland. *Miner. Mag.*, **31**: 511-543.
- Brown, G.M. & Vincent, E.A. (1963). Pyroxenes from the late stages of fractionation of the Skaergaard Intrusion, East Greenland. *Journal of Petrology*, **4**: 175-197.
- Bussen, I.V.; Sakharov, A.S. (1972). *Petrology of the Lovozero alkaline massif* (em Russo), 1-296. Nauka, Leningrado.
- Bushee, J. (1974). A geochronological study of the alkaline massif of Poços de Caldas. Geology and petrography os the lujavrite ans nearby rocks, Poços de Caldas, Brazil. Berkeley, Department of Geology and Geophysics – UC Berkeley. Ph.D. Thesis, 145pp.
- Carmichael, I.S.E. (1967). The iron-titanium oxides of salic volcanic rocks and their associated ferromagnesian silicates. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **14**(1): 36–64.
- De La Roche, H.; Leterrier, J.; Grandclaude, P.; Marchal, M. (1980). A classification of volcanic and plutonic rocks using R_1R_2 -diagram and major element analyses – its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology* **29**, 183–210.

- Deer, W.A.; Howie, R.A.; Zussman, J. (1966). *An introduction to the rock forming minerals*. Longmans, Green and Co., Ltd. London. 558pp.
- Derby, O.A. (1887). On nepheline rocks in Brazil, with special reference to the association of phonolite and foyaite. *Quarterly Journal of the Geological Society*, **43**: 457-473.
- Didier, J.; Barbarin, B. (1991). *Enclaves and granite petrology*. In.: Developments in Petrology: 13. Amsterdam; New York, Elsevier Science Pub. Co. 625p.
- Dorais, M.J. (2003). The petrogenesis and emplacement of the New Hampshire plutonic suite. *American Journal of Science*, **303**: 447-487.
- Droop, G.T.R., (1997). A general equation for estimating Fe³⁺ in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analysis, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, **51**: 431-437.
- Ellert, R. (1959). Contribuição à geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. *Bol. Fac. Fil. Ciênc. Letras, USP, *Geologia 18)* **237**: 5-63.
- Ellert, R.; Björnberg, A.J.S.; Coutinho, J.M.V. (1959). Mapa geológico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, Brasil. In.: Ellert, R (1959). Contribuição à Geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. *Bol. Fac. Fil., Ciênc. Letras, USP, (Geologia 18)* **237**: 5-63.
- ENGEMAP – Engenharia e Mapeamento. 2005. *Mapa Rodoviário do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000*. Governo do Estado de São Paulo – Departamento de Estradas de Rodagem, Secretaria dos Transportes.
- Gao, S.; Liu, X.; Yuan, H.; Hattendorf, B.; Gunther, D.; Hu, S. (2002). Determination of forty two major and trace elements in SGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards Newsletter. The Journal of Geostandards and Geoanalysis*, **26**: 181-196.
- Gomes, C. de B.; Moro, S.L.; Dutra, C.V. (1970). Pyroxenes from the alkaline rock of Itapirapuã, São Paulo, Brazil. *Am. Min.*, **55**: 224-30.
- Haddad, R.C.; Janasi, V.A.; Ulbrich, H.H.G.J. (1997). Caracterização geoquímica preliminar dos granitóides aflorantes na vizinhança do batólito Pinhal-Ipiúna (SP-MG). *Rev. Bras. Geoc.*, **27**: 129-138.
- Janasi, V. A. (1999). Petrogênese de granitos crustais na Nappe de empurrão Socorro-Guaxupé (SP-MG): uma contribuição da geoquímica elemental e isotópica. Tese de Livre-Docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 302pp.

- Janousek, V.; Farrow, C. M.; Erban, V. (2006). TECHNICAL NOTE - Interpretation of Whole-rock Geochemical Data in Igneous Geochemistry: Introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, **47**(6): 1255-1259.
- Kawashita, K.; Mahiques, M.M.; Ulbrich, H.H. (1984). Idades Rb/Sr de nefelina sienitos do Anel Norte do maciço alcalino Poços de Caldas, MG-SP. In.: Congresso Brasileiro de Geologia, 33, Rio de Janeiro, 1984, *Resumos*, Rio de Janeiro, SBG, 244-245.
- Larsen, L.M. (1976). Clinopyroxenes and Coexisting Mafic Minerals from the Alkaline Ilímaussaq Intrusion, South Greenland. *Journal of Petrology*, **17**(2): 258-290.
- Le Bas, M.J.; Le Maitre, R.W.; Streckeisen, B.; Zanettin, B. (1986). A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, **27**(3): 745-750.
- Mackenzie, W.S.; Donaldson, C.H.; Guilford, C. (1995). *Atlas of igneous rocks and their textures*. Harlow, Longman. 148pp.
- Mitchell, R.H. & Platt, R.G. (1978). Mafic mineralogy of ferroaugite syenite from the Coldwell alkaline complex, Ontario, Canada. *Journal of Petrology*, **19**: 627-651.
- Mitchell, R.H. & Platt, R.G. (1982). Mineralogy and Petrology of Nepheline Syenites from the Coldwell Alkaline Complex, Ontario, Canada. *Journal of Petrology*, **23**(2): 186-214.
- Morimoto, N. (1988). Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, **39**(1): 55-76.
- Nash, W.P. (1972). Mineralogy and petrology of the Iron Hill carbonatite complex, Colorado. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **83**: 1311-1382.
- Navarro, M.S. (2004). A implantação de rotina, e seu refinamento, para a determinação de elementos terras raras em materiais geológicos por ICP-OES e ICP-MS. Aplicação ao caso dos granitóides de Piedade-Ibiúna (SP) e Cunhaporanga (PR). São Paulo, Instituto de Geociências – USP. Dissertação de Mestrado: 132pp.
- Nichols, J. & Carmichael, I.S.E. (1969). Peralkaline acid liquids: a petrological study. *Contr. Miner. Petrol.*, **20**: 268-294.
- Nixon, P. H. (1987). *Mantle Xenoliths*. Chichester, New York, Wiley-Interscience pub. 644pp.
- Plá Cid, J.P.; Nardi, L.V.S.; Stabel, L.Z.; Conceição, R.V.; Balzaretto, N.M. (2003). High-pressure minerals in mafic microgranular enclaves: evidences for co-mingling between lamprophyric and syenitic magmas at mantle conditions. *Contrib. Mineral. Petrol.* **145**(4): 444-459.
- Plá Cid, J.P.; Nardi, L.V.S.; Gisbert, P.E.; Merlet, C.; Boyer, B. (2005). SIMS analyses on trace and rare earth elements in coexisting clinopyroxene and mica from minette mafic

enclaves in potassic syenites crystallized under high pressures. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **148**: 675–688.

Ricardi, B.P. (2006). *Petrografia e mineralogia de enclaves máfico-ultramáficos em nefelina sienitos da Pedreira da Prefeitura, Maciço Alcalino Poços de Caldas (MG-SP)*. Monografia de Trabalho de Formatura. IGc-USP. 80pp.

Richard, L.R. (1995). MinPet: Mineralogical and Petrological Data Processing System, Version 2.02. MinPet Geological Software, Quebec, Canadá.

Schorscher H.D. & Shea M.E. (1992). The regional geology of the Poços de Caldas alkaline complex: mineralogy and geochemistry of selected nepheline syenites and phonolites. *J. Geoch. Explor.* **54**:173-214.

Shand, S.J. (1943). *Eruptive rocks*. New York, J. Wiley & Sons, 2ª ed., 444 pp.

Sonoki, I.K. & Garda, G.M. (1988). Idades K/Ar de rochas alcalinas do Brasil meridional e Paraguai oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. *Boletim IG-USP, Série Científica*, **19**: 63-85.

Sørensen, H. (ed.) (1974). *The alkaline rocks*. London, John Wiley, 622pp.

Sørensen, H. (1997) The agpaitic rocks; an overview. *Mineralogical Magazine*. **61**(4): 485-498.

Stephenson, D. (1972). Alkali clinopyroxenes from the nepheline syenite of the South Qôroq centre, south Greenland. *Ibid.*, **7**: 35-41.

Sun, S.S. & Mcdonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the Ocean Basins* Sanders, A. D. & Norry, M. J.). Geological Society of London, Special Publication, **42**: 313–346.

Taylor, S.R. & McLennan, S.M. (1985). *The continental crust: its composition and evolution*. Blackwell, Oxford. 311pp.

Tyler, R.C. & King, B.C. (1967). The pyroxenes of the alkaline igneous complexes of Eastern Uganda. *Miner. Mag.*, **36**: 5-22.

Ulbrich, H.H. & Ulbrich, M.N.C. (2000). The lujavrite and khibinite bodies in the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil: a structural and petrographic study. *Rev. Bras. Geoc.*, **30**(4): 615-622.


Ulbrich, H.H.G.J. (1984). *A petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienitos do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP*. São Paulo, Instituto de Geociências – USP. Tese de Livre Docência, 2 Vols. 735pp.

- Ulbrich, H.H.G.J. & Ulbrich, M.N.C. (1992). O maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP: características petrográficas e estruturais. In: CONG. BRAS. GEOL., 37. São Paulo, 1992. *Roteiro de Excursões*, São Paulo, p. 1-64.
- Ulbrich, H.H.G.J.; Ulbrich, M.N.C.; Kahn, H.; Vlach, S.R.F.; Bagnoli, E. (1979). Estrutura e petrologia dos nefelina sienitos do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP: nota preliminar. *Bol. Mineral.*, Recife, **6**: 31-40.
- Ulbrich, H.H.G.J.; Vlach, S.R.F.; Demaifee, D; Ulbrich, M.N.C. (2005). Structure and origin of the Poços de Caldas Alkaline Massif, SE Brazil. In: COMIN-CHIARAMONTI, P. & GOMES, C.B. (eds.) *Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform*. São Paulo, Edusp/Fapesp, p.367-418.
- Ulbrich, H.H.G.J.; Vlach, S.R.F.; Ulbrich, M.N.C.; Kawashita, K. (2002). Penecontemporaneous syenitic-phonolitic and basic-ultrabasic-carbonatitic rocks at the Poços de Caldas alkaline massif, SE Brazil: geologic and geochronologic evidence. *Rev. Bras. Geoc.*, **32**(1): 15-26.
- Ulbrich, M.N.C. (1983). Aspectos mineralógicos e petrológicos de nefelina sienitos do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. São Paulo, Instituto de Geociências – USP. Tese de Doutorado, 369pp.
- van Achterbergh, E.; Ryan, C.G.; Griffin, W.L. (2007). *Glitter User's manual. On line interactive data reduction for the LA-ICPMS microprobe v. 4.4* - Gemoc National Key Centre McQuarie University, Australia, 30pp.
- Varet, J. (1969). Les pyroxènes des phonolites du Cantal (Auvergne, France). *Neues Jb. Miner. Mh.*, **4**: 174-184.
- Yagi, K. (1953). Petrochemical studies of the alkalic rocks of the Morotu district, Sakhalin. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **64**: 769-810.

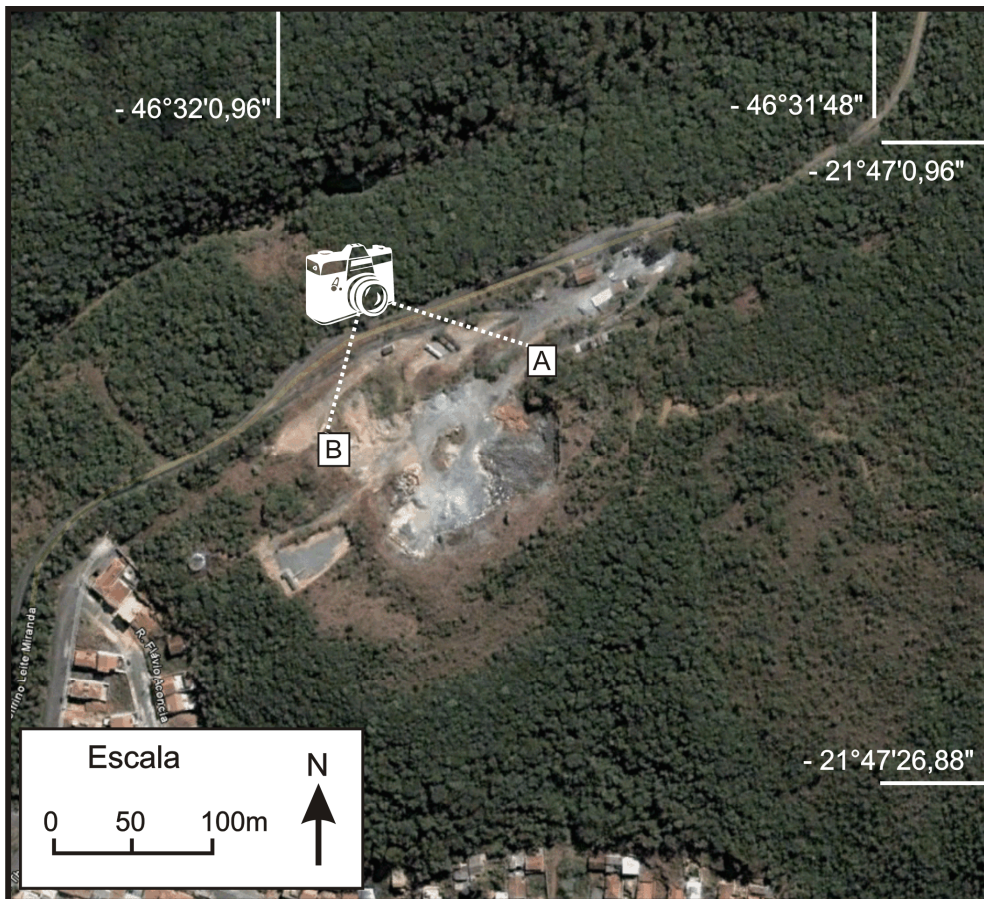
ANEXOS

ANEXO I

Foto panorâmica do perfil AB (NW-SE) da frente de lavra da Pedreira da Prefeitura, com localização das amostras coletadas.

-  Zona de contato entre as duas fácies de nefelina sienitos. O nefelina sienito médio-grosso a grosso fica mais próximo ao ponto A e o de granulação média-fina a mais próximo do ponto B do perfil.
- **1/2/3** Localização e identificação dos pontos de amostragem. Prefixo do nome das amostras está oculto (PPE).

Referência da foto panorâmica:



N

S



ENE

WNW



Anexo II

Análises químicas quantitativas (WDS) das fases minerais máficas e félsicas das rochas amostradas na Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Abreviações gerais:

- identificação do ponto: “número”;
- para localização dos pontos no cristal: b – borda do grão, z – zona intermediária entre borda e núcleo, n – núcleo do grão;
- para tonalidade na imagem BSE-Compo: esc – zonas mais escuras, cl – zonas mais claras;
- < l.d. – valores abaixo do limite de detecção do aparelho analítico;
- na – não analisado;
- Sum_Cat – Soma dos cátions por fórmula unitária;
- Z – Somatória de Si, Al e Fe³⁺;
- X – Somatória de Ti, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ba e Sr;
- FeOT – Ferro total;
- O_F = (F*0,4210526);
- CTot = Total – O_F;
- CF – cátions de flúor por fórmula unitária;
- O_F_Cl = (F*0,4210526)+(Cl*0,2256254);
- CTot = Total – O_F_Cl;
- CF – íons de flúor por fórmula unitária;
- CCl – íons de cloro por fórmula unitária;

Tabela 1 – Clinopiroxênio (CPX) – Fórmula estrutural com base 4 cátions e 6 O.

Tabela 2 – Titanita (TN) – Fórmula estrutural com base em 20 O.

Tabela 3 – Magnetita (MT) – Fórmula estrutural com base em 32 O.

Tabela 4 – Biotita-Flogopita (BT e PHL) - Fórmula estrutural com base em 24 O.

Tabela 5 – Apatita (AP) - Fórmula estrutural com base em 26 O.

Tabela 6 – Feldspato Alcalino (FA) - Fórmula estrutural com base em 32 O.

Tabela 7 – Nefelina (NE) - Fórmula estrutural com base em 32 O.

Tabela 1a - Análises químicas quantitativas (WDS) dos clinopiroxênios das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Mineral																				CPX																			
Litotipo																				Enclave microgranular máfico-ultramáfico																			
Amostra																				PPE-1Bg																			
Cristal/Descrição					1Bg-g4/ matriz - verde							1Bg-g1/ macrocristal - núcleo róseo							1Bg-g3/ macrocristal - núcleo róseo																				
Ponto																				1	2	3	4	5	1 - n	2	3	4	5	6	7 - b	1 - n	2 - n	3 - n	4 - n	5 - z	6 - z	7 - b cl	8 - b cl
ÓXIDOS																																							
SiO ₂	49,46	48,93	48,90	49,63	49,18	46,98	46,66	46,38	46,90	46,86	47,20	50,06	46,86	47,10	46,43	43,99	42,81	42,84	43,31	51,96																			
TiO ₂	1,24	1,10	1,19	1,28	1,31	2,77	3,00	2,96	2,44	2,95	2,84	1,15	2,56	2,49	2,57	3,81	4,15	4,30	4,19	1,12																			
Al ₂ O ₃	2,29	2,39	2,25	2,26	2,30	5,03	5,23	5,66	4,88	4,90	5,02	1,49	5,16	4,89	5,25	7,30	8,02	7,89	7,64	1,36																			
Fe ₂ O ₃	4,84	5,65	5,92	5,07	5,59	5,26	4,00	4,78	5,03	4,43	4,97	5,12	4,74	4,67	4,91	5,17	6,28	6,29	6,01	3,77																			
FeO	5,34	6,88	6,13	6,66	6,57	1,14	2,20	1,49	1,31	1,96	1,10	6,34	1,28	1,34	1,56	1,50	0,81	0,90	0,95	3,64																			
Cr ₂ O ₃	< l.d.	0,03	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,12	0,18	0,17	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,03																			
MnO	0,74	1,00	0,87	0,79	0,81	0,08	0,06	0,07	0,04	0,04	0,18	0,86	0,05	0,05	0,06	0,06	0,09	0,11	0,08	0,51																			
MgO	11,10	9,74	10,16	10,36	10,03	13,71	13,69	13,45	13,80	13,55	13,41	10,35	13,85	14,02	13,71	12,54	12,05	11,87	12,03	13,59																			
CaO	21,86	21,41	21,46	21,79	21,41	24,17	23,51	24,30	24,10	24,29	24,15	21,46	23,92	24,02	23,66	23,91	24,04	24,01	24,26	21,78																			
Na ₂ O	1,38	1,48	1,49	1,43	1,58	0,44	0,37	0,31	0,31	0,31	0,62	1,67	0,36	0,30	0,32	0,33	0,38	0,46	0,44	1,49																			
K ₂ O	< l.d.	< l.d.	0,04	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,03	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,03	< l.d.	< l.d.																			
ZnO	< l.d.	0,04	0,03	0,07	0,05	0,03	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.																			
ZrO ₂	0,11	0,16	0,20	0,15	0,13	0,06	0,04	0,06	0,01	0,04	0,08	0,18	0,03	0,02	0,03	0,08	0,07	0,10	0,12	0,11																			
NiO	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na																			
TOTAL	98,39	98,82	98,63	99,53	98,99	99,68	98,76	99,49	98,85	99,35	99,61	98,74	98,93	99,10	98,68	98,70	98,73	98,82	99,04	99,37																			
CÁTIONS																																							
TSi	1,893	1,886	1,884	1,892	1,887	1,754	1,756	1,736	1,763	1,757	1,762	1,920	1,758	1,765	1,750	1,666	1,626	1,627	1,640	1,939																			
TAI	0,103	0,108	0,102	0,102	0,104	0,221	0,232	0,249	0,216	0,216	0,221	0,067	0,228	0,216	0,233	0,325	0,358	0,353	0,341	0,060																			
TFelll	0,003	0,006	0,014	0,006	0,009	0,025	0,012	0,015	0,021	0,026	0,017	0,012	0,014	0,020	0,017	0,008	0,016	0,020	0,019	0,002																			
M1Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000																			
M1Ti	0,036	0,032	0,034	0,037	0,038	0,078	0,085	0,083	0,069	0,083	0,080	0,033	0,072	0,070	0,073	0,109	0,119	0,123	0,119	0,031																			
M1Felll	0,136	0,158	0,157	0,139	0,153	0,122	0,101	0,119	0,121	0,098	0,122	0,135	0,120	0,112	0,122	0,139	0,164	0,160	0,152	0,104																			
M1Fell	0,171	0,222	0,198	0,212	0,211	0,035	0,046	0,047	0,036	0,061	0,034	0,203	0,030	0,030	0,029	0,044	0,026	0,029	0,030	0,108																			
M1Cr	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,003	0,005	0,005	0,000	0,001	0,000	0,001																			
M1Mg	0,634	0,560	0,583	0,589	0,574	0,763	0,768	0,750	0,773	0,757	0,746	0,592	0,774	0,783	0,771	0,708	0,682	0,672	0,679	0,756																			
M1Ni	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000																			
M2Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000																			
M2Fell	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,023	0,000	0,005	0,001	0,000	0,000	0,010	0,012	0,020	0,004	0,000	0,000	0,000	0,005																			
M2Mn	0,024	0,033	0,028	0,026	0,026	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,006	0,028	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,004	0,002	0,016																			
M2Ca	0,896	0,884	0,886	0,890	0,880	0,967	0,948	0,974	0,971	0,976	0,966	0,882	0,962	0,964	0,955	0,970	0,978	0,977	0,984	0,871																			
M2Na	0,103	0,111	0,111	0,106	0,117	0,032	0,027	0,022	0,023	0,022	0,045	0,124	0,026	0,022	0,023	0,024	0,028	0,034	0,033	0,107																			
M2K	0,001	0,000	0,002	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000																			
Sum_Cat	3,999	4,000	3,998	3,999	4,000	4,000	3,999	3,999	4,000	4,000	3,999	3,999	3,999	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000																			
Q	1,70	1,67	1,67	1,69	1,67	1,77	1,79	1,77	1,79	1,80	1,75	1,68	1,78	1,79	1,78	1,73	1,69	1,68	1,69	1,74																			
J	0,21	0,22	0,22	0,21	0,24	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,09	0,25	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,22																			
Wo	48,09	47,49	47,47	47,80	47,52	50,47	49,89	51,06	50,33	50,80	51,07	47,61	50,31	50,16	49,87	51,74	52,35	52,51	52,72	46,77																			
En	33,99	30,05	31,25	31,63	30,98	39,83	40,42	39,33	40,09	39,43	39,45	31,95	40,51	40,72	40,22	37,77	36,52	36,10	36,37	40,60																			
Fs	17,92	22,47	21,29	20,58	21,51	9,70	9,69	9,61	9,58	9,77	9,48	20,44	9,18	9,12	9,91	10,49	11,14	11,39	10,92	12,64																			
WEF	89,37	88,47	88,39	89,02	87,82	96,49	97,11	97,53	97,53	97,58	95,12	87,26	97,17	97,61	97,47	97,30	96,78	96,13	96,30	89,09																			
Jd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00																			
Ae	10,63	11,53	11,61	10,98	12,18	3,51	2,90	2,47	2,47	2,43	4,88	12,74	2,83	2,39	2,53	2,70	3,22	3,87	3,70	10,91																			

Tabela 1d - Análises químicas quantitativas (WDS) dos clinopiroxênios das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Mineral	CPX																	
Litotipo	Enclave microgranular máfico																	
Amostra	PC-19																	
Cristal/Descrição	19-g2/ macrocristal - núcleo incolor, borda rósea-verde										19-g3/ macrocristal - núcleo róseo							
Ponto	1 - n	2 - n	3 - n	4 - n	5 - b	6 - b	7 - b	8 - b	9 - n	10 - b	1 - n cl	2 - n	3 - n	4 - n	5 - z	6 - b	8 - n	7 - matriz
OXIDOS																		
SiO ₂	50,36	50,51	49,63	51,43	50,20	46,81	47,04	47,49	45,08	44,60	48,68	48,87	47,44	48,18	48,03	53,24	47,37	48,82
TiO ₂	1,47	1,48	1,62	1,00	1,42	3,41	2,74	2,77	3,84	3,68	2,49	2,52	2,94	2,58	2,39	0,74	2,56	1,31
Al ₂ O ₃	3,47	3,28	3,83	2,89	3,50	5,30	5,30	5,22	7,10	6,53	4,54	4,25	5,70	4,29	4,69	1,82	4,62	2,54
Fe ₂ O ₃	4,12	3,84	4,06	3,00	4,88	4,95	16,45	5,52	5,10	8,34	3,51	3,83	3,30	3,84	5,73	2,95	4,70	7,07
FeO	1,70	1,97	2,29	2,46	0,97	2,59	0,00	1,15	3,02	2,82	3,64	3,62	4,51	3,42	0,97	1,05	3,00	7,01
Cr ₂ O ₃	0,15	0,19	0,15	0,22	0,22	0,04	0,07	< l.d.	< l.d.	0,03	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,03	0,62	0,04	< l.d.
MnO	0,11	0,07	0,10	0,08	0,10	0,30	0,31	0,21	0,39	0,79	0,18	0,14	0,10	0,13	0,17	0,11	0,14	1,10
MgO	15,26	15,25	15,04	15,72	14,42	12,19	9,36	12,94	11,21	9,75	13,58	13,61	12,87	13,70	13,45	16,43	13,63	9,05
CaO	23,09	23,29	22,93	23,27	23,26	23,07	11,02	23,13	22,25	21,80	23,61	23,36	22,87	22,92	23,19	23,12	22,71	21,38
Na ₂ O	0,63	0,58	0,48	0,41	1,01	0,97	5,05	1,12	1,18	1,65	0,48	0,60	0,55	0,56	1,01	0,91	0,52	1,71
K ₂ O	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,12	1,84	0,01	< l.d.	0,03	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.
ZnO	< l.d.	< l.d.	0,03	0,04	< l.d.	0,05	1,04	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,03	< l.d.	< l.d.	0,03	< l.d.	< l.d.	< l.d.
ZrO ₂	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,04	0,08	< l.d.	< l.d.	0,07	0,07	0,09	0,05	0,03	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,13
NiO	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
TOTAL	100,39	100,45	100,17	100,55	99,99	99,84	100,29	99,61	99,18	100,10	100,77	100,92	100,32	99,68	99,72	100,98	99,32	100,16
CÁTIONS																		
TSi	1,848	1,853	1,830	1,881	1,850	1,755	1,776	1,771	1,704	1,691	1,800	1,805	1,766	1,799	1,787	1,925	1,778	1,866
TAI	0,150	0,142	0,167	0,119	0,150	0,234	0,224	0,229	0,296	0,292	0,198	0,185	0,234	0,189	0,206	0,075	0,204	0,114
TFellI	0,002	0,005	0,003	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,018	0,003	0,010	0,000	0,012	0,007	0,000	0,018	0,020
M1Al	0,000	0,000	0,000	0,006	0,002	0,000	0,012	0,000	0,019	0,000	0,000	0,000	0,016	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
M1Ti	0,041	0,041	0,045	0,028	0,039	0,096	0,078	0,078	0,109	0,105	0,069	0,070	0,082	0,072	0,067	0,020	0,072	0,038
M1FellI	0,112	0,101	0,110	0,083	0,135	0,128	0,467	0,155	0,145	0,220	0,095	0,097	0,092	0,096	0,153	0,080	0,114	0,184
M1Fell	0,008	0,019	0,014	0,020	0,025	0,081	0,000	0,036	0,095	0,089	0,087	0,084	0,096	0,069	0,030	0,000	0,049	0,224
M1Cr	0,004	0,006	0,004	0,006	0,007	0,001	0,002	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,018	0,001	0,000
M1Mg	0,835	0,834	0,827	0,857	0,792	0,681	0,441	0,719	0,631	0,551	0,749	0,749	0,714	0,762	0,746	0,880	0,763	0,516
M1Ni	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,086	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
M2Fell	0,044	0,042	0,057	0,055	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,028	0,045	0,038	0,000	0,032	0,045	0,000	0,000
M2Mn	0,004	0,002	0,003	0,002	0,003	0,009	0,010	0,007	0,012	0,025	0,006	0,004	0,003	0,004	0,005	0,003	0,004	0,036
M2Ca	0,908	0,915	0,906	0,912	0,919	0,927	0,446	0,924	0,901	0,886	0,935	0,925	0,912	0,917	0,925	0,896	0,913	0,876
M2Na	0,045	0,041	0,034	0,029	0,072	0,070	0,370	0,081	0,087	0,121	0,034	0,043	0,039	0,041	0,073	0,064	0,038	0,126
M2K	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,006	0,089	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001
Sum_Cat	4,000	4,000	4,000	3,999	4,000	3,994	3,911	3,999	4,000	3,999	4,000	4,000	4,000	4,000	3,999	3,999	4,000	3,999
Q	1,80	1,81	1,80	1,85	1,74	1,69	0,97	1,68	1,63	1,53	1,80	1,79	1,77	1,79	1,70	1,81	1,77	1,62
J	0,09	0,08	0,07	0,06	0,15	0,14	0,74	0,16	0,17	0,24	0,07	0,09	0,08	0,08	0,15	0,13	0,08	0,25
Wo	47,48	47,73	47,21	47,27	48,89	50,41	30,78	50,20	50,47	49,50	49,23	48,75	48,98	48,31	49,55	47,23	47,88	47,22
En	43,67	43,49	43,08	44,43	42,15	37,06	36,34	39,08	35,37	30,80	39,42	39,51	38,34	40,17	39,96	46,70	40,00	27,81
Fs	8,85	8,78	9,71	8,30	8,96	12,53	32,89	10,72	14,16	19,70	11,35	11,75	12,68	11,53	10,49	6,07	12,13	24,96
WEF	95,25	95,67	96,37	96,93	92,33	92,36	57,04	91,24	90,45	86,50	96,35	95,45	95,73	95,64	92,16	93,44	95,91	86,72
Jd	0,00	0,00	0,00	0,21	0,12	0,00	1,08	0,01	1,13	0,00	0,00	0,00	0,63	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00
Ae	4,75	4,34	3,63	2,86	7,54	7,64	41,88	8,75	8,43	13,50	3,65	4,55	3,65	4,36	7,84	6,41	4,09	13,28

Tabela 1e - Análises químicas quantitativas (WDS) dos clinopiroxênios das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Mineral	CPX														
Litotipo	Enclave microgranular máfico equigranular														
Amostra	PPE-5Bb														
Cristal/ Descrição	5Bb-g1/ verde			5Bb-g3/ verde do contato rocha-EM								5Bb-g2/ verde			
	Ponto	1	2	3	1 - n esc	2 - n	3 - n	4 - z	5 - cl	6 - b cl	7 - b cl	8 - b	1	2	3
OXIDOS															
SiO ₂	52,26	52,04	52,63	52,75	52,72	48,56	48,82	49,14	48,87	49,12	50,08	52,61	51,79	52,20	52,08
TiO ₂	0,89	1,03	0,97	0,80	0,83	1,38	1,40	1,36	0,94	0,71	0,70	0,86	1,03	0,98	0,90
Al ₂ O ₃	0,78	0,99	0,93	0,64	0,64	2,90	2,78	2,68	1,90	1,32	0,95	1,04	0,78	1,18	0,81
Fe ₂ O ₃	6,15	5,21	4,89	6,59	6,04	6,69	6,15	6,02	7,41	8,93	10,15	5,30	5,27	4,48	5,92
FeO	5,92	5,15	5,68	5,84	6,69	6,71	7,44	7,65	8,74	10,69	10,20	5,89	5,90	5,68	5,46
Cr ₂ O ₃	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,04
MnO	0,54	0,52	0,47	0,55	0,61	0,81	1,07	1,02	1,30	1,81	1,73	0,46	0,50	0,46	0,49
MgO	11,89	12,55	12,08	11,47	11,32	9,60	9,37	9,32	7,79	5,65	5,33	12,03	11,92	12,29	11,84
CaO	21,16	21,55	21,06	19,69	19,37	21,50	21,66	21,79	20,52	18,68	16,82	21,36	20,96	21,20	21,09
Na ₂ O	1,84	1,62	1,98	2,52	2,48	1,55	1,44	1,47	1,96	2,79	3,79	1,84	1,81	1,77	1,95
K ₂ O	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.
ZnO	0,03	< l.d.	< l.d.	0,04	0,04	0,05	< l.d.	< l.d.	0,03	0,07	0,06	0,05	0,03	< l.d.	< l.d.
ZrO ₂	0,12	0,07	0,06	< l.d.	0,04	0,14	0,08	0,11	0,15	0,31	0,26	0,05	0,15	0,17	0,11
NiO	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
TOTAL	101,58	100,74	100,75	100,92	100,77	99,91	100,24	100,58	99,61	100,09	100,07	101,49	100,13	100,41	100,70
CÁTIONS															
TSi	1,938	1,935	1,955	1,963	1,968	1,855	1,862	1,869	1,894	1,921	1,951	1,946	1,944	1,946	1,943
TAI	0,034	0,043	0,041	0,028	0,028	0,131	0,125	0,120	0,087	0,061	0,043	0,045	0,034	0,052	0,036
TFell	0,028	0,022	0,005	0,009	0,004	0,014	0,013	0,012	0,019	0,018	0,006	0,009	0,021	0,002	0,021
M1Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti	0,025	0,029	0,027	0,022	0,023	0,040	0,040	0,039	0,027	0,021	0,020	0,024	0,029	0,028	0,025
M1Fell	0,144	0,124	0,132	0,175	0,165	0,178	0,163	0,161	0,197	0,245	0,292	0,138	0,127	0,123	0,145
M1Fell	0,174	0,152	0,172	0,166	0,182	0,214	0,237	0,243	0,283	0,350	0,332	0,175	0,176	0,166	0,170
M1Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
M1Mg	0,657	0,696	0,669	0,636	0,630	0,547	0,533	0,528	0,450	0,330	0,309	0,663	0,667	0,683	0,659
M1Ni	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fell	0,009	0,008	0,005	0,016	0,027	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,009	0,011	0,000
M2Mn	0,017	0,016	0,015	0,017	0,019	0,026	0,035	0,033	0,043	0,060	0,057	0,014	0,016	0,014	0,016
M2Ca	0,841	0,858	0,838	0,785	0,774	0,880	0,885	0,888	0,852	0,783	0,702	0,847	0,843	0,847	0,843
M2Na	0,132	0,117	0,142	0,182	0,179	0,114	0,107	0,108	0,147	0,212	0,287	0,132	0,132	0,128	0,141
M2K	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Sum_Cat	3,999	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
Q	1,68	1,71	1,68	1,60	1,61	1,64	1,66	1,66	1,59	1,46	1,34	1,69	1,70	1,71	1,67
J	0,27	0,23	0,29	0,36	0,36	0,23	0,21	0,22	0,30	0,42	0,57	0,26	0,26	0,26	0,28
Wo	44,97	45,75	45,69	43,51	42,99	47,32	47,42	47,61	46,22	43,86	41,35	45,68	45,32	45,86	45,48
En	35,15	37,08	36,46	35,25	34,95	29,42	28,55	28,34	24,40	18,47	18,22	35,78	35,87	36,98	35,53
Fs	19,89	17,17	17,86	21,24	22,06	23,26	24,03	24,05	29,38	37,67	40,44	18,55	18,82	17,16	18,99
WEF	86,51	88,08	85,64	81,67	81,98	87,93	88,80	88,66	84,66	78,22	70,97	86,63	86,64	87,08	85,66
Jd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ae	13,49	11,92	14,36	18,33	18,02	12,07	11,20	11,34	15,34	21,78	29,03	13,37	13,36	12,92	14,34

Tabela 1f - Análises químicas quantitativas (WDS) dos clinopiroxênios das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Mineral	CPX																	
Litotipo	Nefelina sienito médio-grosso a grosso																	
Amostra	PPE-8A																	
Cristal/ Descrição	8A/ fibroso		8A-g12/ verde prismático															
	Ponto	1	2	1 - b	2	3	4	5	6	7	8 - n	9 - b	10	11	12	13	14	15
OXIDOS																		
SiO ₂	51,30	51,89	52,37	52,37	52,59	52,78	52,92	52,16	51,89	51,45	53,53	52,61	51,03	51,37	50,81	50,65	50,43	50,31
TiO ₂	2,76	3,33	0,28	0,27	0,18	0,30	0,55	0,89	1,59	2,99	0,71	0,34	0,67	0,44	0,56	0,53	0,77	0,74
Al ₂ O ₃	0,76	0,76	0,92	1,02	0,66	0,97	1,73	0,61	0,72	0,79	1,98	1,46	0,56	0,57	0,67	0,79	1,29	1,40
Fe ₂ O ₃	23,98	22,36	31,73	31,51	31,45	31,40	29,41	29,24	26,69	23,49	28,39	30,78	20,00	10,45	13,32	9,32	7,23	6,77
FeO	4,35	4,48	< l.d.	< l.d.	0,32	0,33	1,12	2,01	3,22	4,06	1,75	0,00	5,10	8,88	8,33	9,83	8,21	9,05
Cr ₂ O ₃	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,03
MnO	0,88	1,17	1,07	1,32	1,65	1,29	1,03	0,63	0,54	0,55	0,75	1,46	1,23	1,79	1,53	1,98	1,40	1,43
MgO	0,72	0,67	0,01	0,03	0,02	0,03	0,09	0,88	0,68	0,74	0,13	0,02	3,45	5,84	4,98	6,13	8,45	8,21
CaO	2,33	2,00	0,30	0,31	0,33	0,34	0,42	3,12	2,22	2,16	0,36	0,30	10,39	16,43	14,18	18,81	20,72	20,68
Na ₂ O	11,79	12,07	13,27	13,36	13,07	13,20	13,14	11,86	12,00	11,98	13,26	13,34	7,75	4,26	5,29	3,08	2,10	1,98
K ₂ O	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,03	< l.d.	< l.d.	< l.d.
ZnO	0,06	0,06	< l.d.	0,03	0,05	0,06	< l.d.	< l.d.	0,07	< l.d.	< l.d.	0,03	0,05	0,06	0,04	< l.d.	0,06	0,04
ZrO ₂	0,71	0,73	0,04	0,04	0,09	0,03	0,13	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,33	0,30	0,54	0,22	0,11	0,13
NiO	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
TOTAL	99,63	99,51	100,02	100,28	100,40	100,73	100,56	101,49	99,69	98,30	100,94	100,42	100,57	100,40	100,27	101,39	100,79	100,79
CÁTIONS																		
TSi	1,990	2,008	2,004	1,997	2,012	2,008	2,009	1,980	1,999	2,002	2,018	2,001	1,966	1,980	1,969	1,945	1,923	1,923
TAI	0,010	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,020	0,001	0,000	0,000	0,000	0,025	0,020	0,030	0,036	0,058	0,063
TFellI	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,000	0,020	0,019	0,014
M1Al	0,025	0,035	0,042	0,043	0,030	0,043	0,077	0,007	0,032	0,036	0,088	0,065	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Ti	0,080	0,097	0,008	0,008	0,005	0,009	0,016	0,025	0,046	0,087	0,020	0,010	0,019	0,013	0,016	0,015	0,022	0,021
M1FellI	0,699	0,650	0,913	0,903	0,905	0,898	0,839	0,834	0,773	0,687	0,804	0,880	0,570	0,303	0,388	0,250	0,188	0,180
M1Fell	0,141	0,145	0,000	0,000	0,010	0,010	0,036	0,064	0,104	0,132	0,055	0,000	0,164	0,286	0,270	0,316	0,262	0,289
M1Cr	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001
M1Mg	0,042	0,039	0,001	0,002	0,001	0,002	0,005	0,050	0,039	0,043	0,007	0,001	0,198	0,336	0,288	0,351	0,480	0,468
M1Ni	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Fell	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Mn	0,029	0,038	0,035	0,043	0,053	0,041	0,033	0,020	0,017	0,018	0,024	0,047	0,040	0,058	0,050	0,064	0,045	0,046
M2Ca	0,097	0,083	0,012	0,013	0,014	0,014	0,017	0,127	0,092	0,090	0,014	0,012	0,429	0,679	0,589	0,774	0,847	0,847
M2Na	0,887	0,906	0,984	0,988	0,969	0,974	0,967	0,873	0,896	0,904	0,969	0,983	0,579	0,319	0,397	0,229	0,155	0,147
M2K	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Sum_Cat	4,000	4,000	3,999	3,999	4,000	3,999	3,999	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	3,999	3,999	3,999	3,999	3,999
Q	0,28	0,27	0,01	0,01	0,03	0,03	0,06	0,24	0,24	0,27	0,08	0,01	0,79	1,30	1,15	1,44	1,59	1,60
J	1,77	1,81	1,97	1,98	1,94	1,95	1,94	1,75	1,79	1,81	1,94	1,97	1,16	0,64	0,80	0,46	0,31	0,29
Wo	9,60	8,68	1,29	1,31	1,39	1,44	1,85	11,59	8,95	9,28	1,58	1,29	30,40	40,83	37,16	43,62	45,98	45,91
En	4,12	4,06	0,07	0,19	0,11	0,17	0,55	4,55	3,82	4,43	0,82	0,13	14,05	20,19	18,16	19,79	26,09	25,36
Fs	86,28	87,26	98,64	98,50	98,51	98,39	97,60	83,86	87,23	86,29	97,60	98,58	55,55	38,98	44,68	36,59	27,93	28,73
WEF	14,80	14,41	2,38	2,81	3,88	3,35	4,49	13,00	12,33	13,54	4,94	2,98	41,79	68,09	60,11	76,67	84,05	84,89
Jd	2,93	4,33	4,25	4,41	3,04	4,45	8,06	0,72	3,48	4,33	9,35	6,70	0,00	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00
Ae	82,27	81,26	93,37	92,78	93,08	92,20	87,45	86,28	84,19	82,13	85,71	90,31	58,21	31,29	39,89	23,33	15,95	15,11

Tabela 1j - Análises químicas quantitativas (WDS) dos clinopiroxênios das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Mineral	CPX								
Litotipo	Enclave microgranular félsico				enclave microgranular máfico-ultramáfico				
Amostra	PPE-31				PPE-33				
Cristal/Descrição	31acpx1/ róseo com borda verde do agregado máfico				31acpx2	33cpx1/ verde da matriz			
Ponto	1 - n	2 - n	3 - b	4 - b	1	1	2	3	4
OXIDOS									
SiO ₂	46,57	46,74	47,64	47,83	49,19	50,37	48,62	48,08	48,36
TiO ₂	3,21	3,21	1,34	0,96	1,16	0,99	1,28	1,40	1,35
Al ₂ O ₃	4,77	4,71	2,53	2,24	1,97	1,49	2,40	2,63	2,51
Fe ₂ O ₃	7,08	6,24	8,65	8,97	7,57	6,56	7,62	7,43	8,58
FeO	0,13	0,89	4,67	4,69	1,48	8,66	5,66	5,30	5,07
Cr ₂ O ₃	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,05	0,34	< l.d.	0,03	0,03	0,04
MnO	0,09	0,20	1,03	0,98	0,53	1,20	0,97	0,83	0,92
MgO	13,40	13,22	9,85	9,82	12,92	8,50	9,79	10,09	9,87
CaO	24,94	24,67	21,88	21,74	23,37	20,81	21,87	22,07	21,75
Na ₂ O	0,55	0,54	1,49	1,50	1,05	2,04	1,55	1,38	1,61
K ₂ O	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,03	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,05
ZnO	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,08	< l.d.	0,07	< l.d.	0,06	0,05
ZrO ₂	0,07	< l.d.	0,11	0,12	< l.d.	< l.d.	0,10	0,14	0,14
NiO	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,03	< l.d.	0,03
TOTAL	100,82	100,45	99,23	99,01	99,60	100,92	99,92	99,44	100,33
CÁTIONS									
TSi	1,884	1,836	1,851	1,862	1,792	1,814	1,882	1,835	1,867
TAI	0,085	0,122	0,112	0,104	0,208	0,186	0,098	0,123	0,094
TFell	0,031	0,041	0,037	0,033	0,000	0,000	0,021	0,042	0,039
M1Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,067	0,018	0,000	0,000	0,000
M1Ti	0,023	0,037	0,033	0,031	0,022	0,025	0,021	0,027	0,025
M1Fell	0,080	0,212	0,198	0,193	0,448	0,284	0,085	0,084	0,081
M1Fell	0,000	0,180	0,221	0,220	0,000	0,278	0,000	0,000	0,000
M1Cr	0,016	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,021	0,029	0,025
M1Mg	0,879	0,513	0,499	0,507	0,336	0,345	0,872	0,859	0,868
M1Ni	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001
M2Mg	0,039	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,029	0,041	0,038
M2Fell	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000
M2Mn	0,001	0,034	0,037	0,036	0,041	0,057	0,001	0,002	0,002
M2Ca	0,934	0,901	0,891	0,898	0,673	0,823	0,936	0,928	0,935
M2Na	0,026	0,121	0,119	0,116	0,370	0,168	0,028	0,029	0,024
M2K	0,000	0,001	0,000	0,000	0,042	0,001	0,001	0,000	0,000
Sum_Cat	4,000	3,999	4,000	4,000	3,958	3,999	3,999	4,000	4,000
Q	1,73	1,74	1,61	1,61	1,71	1,60	1,63	1,65	1,61
J	0,08	0,08	0,22	0,22	0,15	0,30	0,23	0,20	0,24
Wo	52,93	52,53	48,76	48,43	50,04	46,68	48,42	48,85	48,26
En	39,55	39,15	30,52	30,43	38,46	26,53	30,15	31,06	30,45
Fs	7,53	8,32	20,73	21,14	11,51	26,79	21,44	20,10	21,29
WEF	95,68	95,72	88,11	88,02	91,87	84,55	87,86	89,13	87,34
Jd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ae	4,32	4,28	11,89	11,98	8,13	15,45	12,14	10,87	12,66

Tabela 1k - Análises químicas quantitativas (WDS) dos clinopiroxênios das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Mineral	CPX										
Litotipo	Enclave microgranular máfico-ultramáfico										
Amostra	PPE-22										
Cristal/ Descrição	22cpx1/ macrocristal incolor						22cpx2/ verde com nucleo incolor da borda				
Ponto	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5
ÓXIDOS											
SiO ₂	51,93	49,23	50,59	50,75	49,26	50,78	49,15	48,23	48,36	49,31	49,92
TiO ₂	0,76	0,98	0,89	1,18	0,96	0,96	0,49	1,37	1,41	0,56	0,61
Al ₂ O ₃	2,29	2,80	2,16	2,94	2,75	2,69	0,97	2,57	2,52	1,85	1,05
Fe ₂ O ₃	3,90	4,50	4,33	3,11	4,12	4,48	12,09	8,32	8,36	12,61	10,29
FeO	0,19	< l.d.	< l.d.	1,39	< l.d.	< l.d.	7,16	5,87	5,67	6,86	9,07
Cr ₂ O ₃	0,73	1,00	0,86	0,90	0,89	0,88	0,02	0,01	0,01	0,02	0,00
MnO	0,03	0,08	0,07	0,09	0,08	0,12	1,57	0,97	0,98	1,54	1,54
MgO	16,69	16,20	16,48	16,13	15,88	15,36	6,23	9,36	9,33	6,23	6,16
CaO	24,11	23,22	23,64	23,19	22,98	23,01	18,83	21,93	21,97	16,66	18,30
Na ₂ O	0,39	0,40	0,34	0,37	0,61	1,00	3,29	1,57	1,67	3,71	3,25
K ₂ O	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,48	0,05
ZnO	0,05	0,06	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,07	0,08	< l.d.	0,04	0,06
ZrO ₂	< l.d.	0,06	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,14	0,16	0,12	0,19	0,20
NiO	< l.d.	< l.d.	0,03	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.
TOTAL	101,10	98,53	99,40	100,10	97,54	99,31	100,01	100,44	100,41	100,06	100,50
CÁTIONS											
TSi	1,766	1,754	1,889	1,894	1,912	1,930	1,930	1,940	1,977	2,007	1,986
TAI	0,226	0,233	0,101	0,101	0,072	0,070	0,070	0,060	0,023	0,000	0,014
TFelII	0,008	0,013	0,010	0,005	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1Al	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,016	0,010	0,029	0,018
M1Ti	0,081	0,080	0,031	0,033	0,026	0,038	0,023	0,023	0,013	0,075	0,015
M1FelIII	0,087	0,112	0,188	0,160	0,156	0,108	0,145	0,105	0,336	0,605	0,341
M1FelII	0,047	0,034	0,245	0,264	0,190	0,227	0,225	0,257	0,251	0,189	0,272
M1Cr	0,007	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000
M1Mg	0,777	0,766	0,511	0,512	0,612	0,619	0,605	0,598	0,342	0,082	0,315
M1Ni	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M2FelII	0,025	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
M2Mn	0,002	0,001	0,036	0,034	0,025	0,021	0,026	0,026	0,049	0,029	0,048
M2Ca	0,952	0,957	0,848	0,874	0,870	0,869	0,849	0,867	0,648	0,175	0,614
M2Na	0,020	0,035	0,139	0,122	0,120	0,115	0,123	0,108	0,351	0,808	0,377
M2K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
Sum_Cat	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	3,999	4,000
Q	1,84	1,83	1,84	1,84	1,82	1,76	1,37	1,61	1,61	1,27	1,40
J	0,06	0,06	0,05	0,05	0,09	0,14	0,49	0,23	0,25	0,55	0,49
Wo	48,50	48,34	48,54	47,62	48,45	48,50	45,10	48,65	48,84	41,05	43,68
En	46,70	46,91	47,07	46,07	46,55	45,03	20,77	28,88	28,84	21,36	20,47
Fs	4,80	4,75	4,40	6,31	5,00	6,47	34,13	22,48	22,32	37,59	35,85
WEF	97,09	96,97	97,43	97,20	95,31	92,48	74,26	87,61	86,92	70,40	74,91
Jd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ae	2,92	3,03	2,57	2,80	4,69	7,53	25,74	12,39	13,08	29,60	25,09

Tabela 4a - Análises químicas quantitativas (WDS) de biotita das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Mineral	BT							
Litotipo	Enclave microgranular félsico							
Amostra	PPE-31							
Cristal/ Descrição	mica1			mica2		mica3		mica4
Ponto	1	2	3	1	2	1	2	1
ÓXIDOS								
SiO ₂	39,47	39,61	39,44	38,79	39,48	39,41	38,57	39,10
TiO ₂	2,47	2,47	2,53	2,75	2,14	2,73	3,21	2,42
Al ₂ O ₃	9,86	9,83	9,70	9,99	9,58	9,22	9,00	9,08
FeO	18,14	17,76	17,56	19,45	17,83	19,25	22,79	20,55
MnO	1,46	1,40	1,46	1,56	1,49	1,57	1,86	1,69
MgO	14,42	14,44	14,39	13,70	13,89	13,34	10,65	12,40
CaO	<l.d.	0,03	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0,04
Na ₂ O	0,36	0,30	0,34	0,32	0,33	0,28	0,27	0,24
K ₂ O	9,47	9,53	9,26	9,67	9,91	9,79	9,59	9,28
F	2,99	2,04	2,38	2,32	2,31	2,16	1,98	1,82
Cl	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
BaO	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0,03	0,05	0,06	<l.d.	0,03
Total	98,65	97,42	97,07	98,57	97,01	97,83	97,91	96,63
O_F_Cl	1,26	0,86	1,01	0,98	0,97	0,91	0,83	0,77
CTotal	97,39	96,56	96,06	97,59	96,04	96,92	97,08	95,87
CÁTIONS								
Si	6,560	6,590	6,600	6,470	6,640	6,610	6,580	6,650
Al IV	1,439	1,411	1,401	1,530	1,358	1,389	1,424	1,353
Al VI	0,493	0,516	0,511	0,435	0,542	0,434	0,384	0,466
Ti	0,308	0,309	0,318	0,345	0,270	0,345	0,411	0,310
Fell	2,522	2,471	2,458	2,713	2,509	2,700	3,250	2,921
Mn	0,206	0,197	0,206	0,220	0,212	0,222	0,268	0,243
Mg	3,574	3,580	3,590	3,407	3,482	3,334	2,707	3,141
Ca	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,007
Na	0,117	0,096	0,111	0,102	0,107	0,092	0,090	0,078
K	2,009	2,023	1,976	2,058	2,128	2,094	2,085	2,012
Ba	0,000	0,001	0,000	0,002	0,004	0,004	0,000	0,002
Sum_Cat	17,229	17,198	17,170	17,282	17,254	17,226	17,195	17,180
CF	1,573	1,071	1,260	1,225	1,227	1,146	1,068	0,978
CCI	0,000	0,000	0,003	0,001	0,003	0,003	0,000	0,000
O	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000
Fell/(Fell+Mg)	0,41	0,41	0,41	0,44	0,42	0,45	0,55	0,48
Mg/(Fell+Mg)	0,59	0,59	0,59	0,56	0,58	0,55	0,45	0,52

Tabela 4b - Análises químicas quantitativas (WDS) de flogopita das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Mineral	PHL										
Litotipo	Enclave microgranular máfico-ultramáfico										
Amostra	PPE-33					PPE-22		PPE-7Aa			
Cristal/ Descrição	mica1/ inclusa no megacristal de cpx roseo			mica2/ matriz	mica3/ matriz	mica1/ inclusa no megacristal de cpx roseo		mica1		mica2	
ponto	1	2	3	2	1	1	2	1	2	1	2
ÓXIDOS											
SiO ₂	41,25	41,15	40,94	40,86	40,37	40,07	39,94	39,90	40,25	40,67	39,86
TiO ₂	1,76	1,18	2,60	1,54	0,99	3,04	2,95	0,67	0,35	2,28	2,47
Al ₂ O ₃	11,92	11,40	11,66	10,86	11,89	11,65	11,45	11,55	11,37	10,94	11,03
FeO	7,65	11,02	8,29	13,84	10,73	9,67	9,67	8,88	8,97	9,97	10,97
MnO	0,38	0,49	0,46	0,68	0,55	0,43	0,44	0,49	0,53	0,67	0,75
MgO	22,73	21,20	21,73	17,40	19,45	19,57	20,00	21,16	22,19	19,94	19,04
CaO	<l.d.	0,06	<l.d.	<l.d.	0,17	<l.d.	0,06	0,03	0,04	0,04	0,05
Na ₂ O	0,32	0,35	0,29	0,29	0,28	0,35	0,36	0,44	0,45	0,46	0,45
K ₂ O	10,22	10,24	10,37	9,56	9,60	9,71	10,02	9,71	9,73	9,71	9,81
F	3,93	3,57	2,81	2,03	2,74	0,04	0,05	2,60	2,76	2,54	2,13
Cl	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	2,10	2,38	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
BaO	<l.d.	0,07	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0,04
Total	100,19	100,74	99,19	97,10	96,77	96,61	97,31	95,43	96,64	97,20	96,60
O_F_Cl	1,66	1,51	1,19	0,86	1,15	0,88	1,00	1,10	1,16	1,07	0,90
CTotal	98,53	99,23	98,00	96,24	95,62	95,73	96,31	94,33	95,47	96,14	95,70
CÁTIONS											
Si	6,442	6,480	6,421	6,639	6,535	6,435	6,407	6,504	6,490	6,533	6,469
Al IV	1,558	1,520	1,579	1,361	1,465	1,565	1,593	1,496	1,510	1,467	1,531
Al VI	0,636	0,595	0,576	0,719	0,803	0,639	0,571	0,722	0,652	0,604	0,579
Ti	0,207	0,139	0,307	0,189	0,120	0,367	0,355	0,082	0,043	0,276	0,301
FelI	0,999	1,451	1,087	1,881	1,453	1,299	1,298	1,210	1,209	1,339	1,489
Mn	0,051	0,066	0,061	0,093	0,075	0,058	0,060	0,067	0,072	0,091	0,103
Mg	5,291	4,976	5,080	4,212	4,694	4,684	4,782	5,141	5,333	4,774	4,606
Ca	0,004	0,010	0,002	0,003	0,030	0,000	0,010	0,004	0,006	0,007	0,009
Na	0,096	0,107	0,088	0,090	0,088	0,110	0,110	0,139	0,141	0,144	0,140
K	2,037	2,056	2,075	1,981	1,983	1,989	2,051	2,019	2,001	1,989	2,032
Ba	0,000	0,005	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003
Cations	19,263	19,187	18,672	18,213	18,649	17,734	17,912	18,729	18,865	18,510	18,354
CF	1,943	1,780	1,394	1,045	1,402	0,018	0,027	1,342	1,408	1,288	1,091
CCI	0,000	0,002	0,002	0,000	0,000	0,570	0,648	0,003	0,000	0,000	0,003
O	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000	24,000
FelI/(FelI+Mg)	0,16	0,23	0,18	0,31	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,22	0,24
Mg/(FelI+Mg)	0,84	0,77	0,82	0,69	0,76	0,78	0,79	0,81	0,82	0,78	0,76

Tabela 6a - Análises químicas quantitativas (WDS) do feldspato alcalino das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas. NeS-g = Nefelina sienito médio-grosso a grosso

Mineral	FA															
Litotipo	Nefelina sienito médio-fino a fino					NeS-g		Enclave microgranular máfico-ultramáfico								
Amostra	PPE-6b					PPE-8A		PPE-7Aa			PPE-1Bg		PC-19			
Cristal/ Descrição	6b-F2		6kfs1		6kfs2	8A-F2		7Aa-F2			7cpx2	7Aa-F1		19-F2		
Ponto	1-e	4-c	1	2	2	1-e	2-e	1-e	2-c	3-c	2	1-e	2-c	1-e	2-e	4
ÓXIDOS																
SiO ₂	63,80	64,20	64,30	63,38	63,73	65,52	64,98	64,13	64,10	63,28	62,79	64,85	65,20	64,91	65,05	63,55
Al ₂ O ₃	18,26	17,97	18,14	19,15	18,61	18,57	18,55	18,96	19,66	20,02	19,14	17,87	17,98	18,81	18,41	19,33
TiO ₂	0,06	0,06	0,03	0,08	0,06	0,12	0,03	0,06	0,10	0,09	0,13	0,04	<l.d.	0,08	0,07	0,06
Fe ₂ O ₃	0,38	0,60	0,56	0,21	0,39	0,51	0,39	0,38	0,45	0,45	0,43	0,66	0,48	0,42	0,48	0,39
MnO	<l.d.	<l.d.	0,03	<l.d.	<l.d.	0,03	<l.d.	0,05	0,04	0,03	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0,04	<l.d.
MgO	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
CaO	0,04	<l.d.	<l.d.	0,10	0,07	0,06	0,05	0,06	0,22	0,27	0,23	<l.d.	<l.d.	0,03	<l.d.	0,06
Na ₂ O	1,42	1,82	1,72	2,87	2,18	3,05	3,10	2,72	3,12	3,58	3,06	2,25	1,14	1,58	1,46	1,79
K ₂ O	14,74	14,35	14,22	12,18	13,25	12,57	12,36	12,71	11,38	10,62	11,02	13,23	14,93	13,82	14,37	13,56
BaO	0,08	0,13	0,08	1,06	0,72	0,14	0,00	0,17	0,15	0,21	1,66	<l.d.	<l.d.	0,26	0,11	0,37
SrO	0,32	0,11	<l.d.	0,21	0,12	0,38	0,48	1,05	1,95	2,15	0,19	0,12	0,04	1,22	0,69	1,77
Total	99,10	99,24	99,09	99,26	99,16	100,95	99,94	100,30	101,16	100,70	98,65	99,02	99,83	101,14	100,67	100,89
CÁTIONS																
Si	11,907	11,946	11,951	11,767	11,855	11,915	11,918	11,804	11,697	11,605	11,725	12,009	12,029	11,878	11,940	11,725
Al	4,012	3,938	3,973	4,191	4,080	3,976	4,007	4,110	4,224	4,323	4,211	3,897	3,907	4,054	3,979	4,200
FeIII	0,054	0,084	0,078	0,030	0,055	0,070	0,054	0,052	0,062	0,063	0,060	0,092	0,067	0,057	0,067	0,054
Ti	0,009	0,008	0,005	0,011	0,009	0,017	0,004	0,008	0,014	0,013	0,019	0,005	0,003	0,010	0,009	0,009
Mn	0,000	0,000	0,004	0,002	0,003	0,004	0,000	0,007	0,006	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000
Mg	0,002	0,001	0,004	0,000	0,002	0,000	0,001	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,002	0,000	0,000
Ba	0,006	0,009	0,000	0,015	0,009	0,010	0,000	0,012	0,011	0,015	0,014	0,000	0,001	0,019	0,008	0,027
Sr	0,030	0,010	0,008	0,114	0,077	0,040	0,050	0,110	0,210	0,230	0,180	0,010	0,000	0,130	0,070	0,190
Ca	0,008	0,000	0,000	0,020	0,013	0,011	0,010	0,012	0,043	0,053	0,046	0,001	0,000	0,006	0,000	0,012
Na	0,515	0,655	0,618	1,033	0,787	1,076	1,103	0,969	1,102	1,271	1,107	0,809	0,407	0,561	0,518	0,642
K	3,509	3,407	3,371	2,884	3,144	2,917	2,893	2,986	2,649	2,485	2,625	3,126	3,514	3,226	3,365	3,191
Sum_Cat	20,052	20,058	20,013	20,069	20,034	20,036	20,040	20,074	20,018	20,063	19,986	19,949	19,932	19,943	19,962	20,050
Sum_O	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000
Z	15,982	15,976	16,007	16,000	15,999	15,978	15,983	15,974	15,997	16,004	16,015	16,003	16,006	15,999	15,995	15,988
X	4,076	4,091	4,006	4,069	4,035	4,068	4,057	4,112	4,032	4,074	3,971	3,946	3,927	3,963	3,975	4,089
Ab	12,8	16,1	15,5	26,2	19,9	26,9	27,5	24,4	29,0	33,4	29,3	20,6	10,4	14,8	13,3	16,7
An	0,2	0,0	0,0	0,5	0,3	0,3	0,2	0,3	1,1	1,4	1,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3
Or	87,0	83,9	84,5	73,3	79,7	72,9	72,2	75,3	69,8	65,2	69,5	79,4	89,6	85,1	86,7	83,0

Tabela 6b - Análises químicas quantitativas (WDS) do feldspato alcalino das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Mineral	FA																	
Litotipo	Enclave microgranular máfico-ultramáfico									Enclave máfico equigranular					Enclave félsico			
Amostra	PC-19							PPE-22		PPE-5Bb					PPE-31			
Cristal/ Descrição	19-F1							22kfs1	22kfs2	5Bb-F1		5Bb-F2			31kfs1			
Ponto	1-c	2-c	p3-p2	4-c	5-c	6-e	7-e	1	2	1	2	1-c	2	3-e	1	3	1	2
ÓXIDOS																		
SiO ₂	62,77	63,05	63,30	66,02	64,51	65,22	65,03	64,26	62,90	64,81	64,83	64,46	64,96	65,26	63,53	64,16	64,66	63,91
Al ₂ O ₃	18,58	18,12	18,08	18,09	18,50	18,16	18,12	18,30	19,32	18,13	18,61	18,83	18,14	18,00	19,30	18,02	18,12	17,76
TiO ₂	0,04	0,08	0,05	0,01	0,05	0,04	0,06	0,09	0,02	0,05	0,13	0,07	0,08	0,09	0,11	0,01	0,06	0,00
Fe ₂ O ₃	0,48	0,60	0,48	0,43	0,45	0,42	0,39	0,56	0,73	0,75	0,62	0,50	0,79	0,92	0,46	0,56	0,58	0,58
MnO	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0,03	<l.d.	<l.d.	0,03	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
MgO	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
CaO	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	0,04	<l.d.	0,04	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.	<l.d.
Na ₂ O	1,36	1,25	1,41	1,41	1,16	1,15	1,20	2,05	2,59	2,66	2,48	2,82	2,90	2,87	1,08	0,50	0,68	1,10
K ₂ O	14,43	14,88	14,89	14,40	14,45	14,78	14,92	13,29	14,06	12,90	12,81	12,31	12,62	12,82	14,88	15,97	15,44	14,91
BaO	0,21	0,14	0,06	0,10	0,35	0,10	0,12	0,32	0,17	0,35	0,61	0,80	0,40	0,16	0,64	0,11	0,27	0,17
SrO	0,90	0,37	0,21	0,16	0,78	0,27	0,39	0,12	<l.d.	0,23	0,47	0,59	0,24	0,14	0,07	0,06	0,07	<l.d.
Total	98,77	98,49	98,48	100,64	100,31	100,16	100,24	99,03	99,80	99,93	100,58	100,43	100,13	100,26	100,07	99,39	99,88	98,44
CÁTIONS																		
Si	11,807	11,875	11,901	12,056	11,912	12,005	11,987	11,930	11,675	11,938	11,884	11,843	11,934	11,958	11,764	11,965	11,975	11,991
Al	4,115	4,018	4,004	3,890	4,023	3,936	3,934	4,004	4,227	3,932	4,016	4,073	3,926	3,884	4,212	3,961	3,954	3,928
FeIII	0,067	0,085	0,067	0,059	0,063	0,059	0,055	0,078	0,101	0,104	0,086	0,069	0,109	0,127	0,064	0,079	0,081	0,081
Ti	0,006	0,012	0,007	0,001	0,007	0,006	0,008	0,013	0,003	0,007	0,018	0,010	0,011	0,012	0,015	0,002	0,009	0,000
Mn	0,001	0,001	0,000	0,002	0,005	0,000	0,001	0,004	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg	0,000	0,000	0,000	0,004	0,003	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,003	0,002	0,002	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000
Ba	0,015	0,010	0,004	0,007	0,026	0,007	0,009	0,009	0,000	0,025	0,044	0,058	0,029	0,011	0,005	0,004	0,005	0,001
Sr	0,100	0,040	0,020	0,020	0,080	0,030	0,040	0,035	0,018	0,020	0,050	0,060	0,030	0,020	0,068	0,012	0,029	0,019
Ca	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,003	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,007	0,000	0,001	0,005	0,000	0,000	0,000
Na	0,496	0,455	0,514	0,500	0,414	0,412	0,428	0,737	0,931	0,949	0,883	1,005	1,033	1,019	0,386	0,179	0,243	0,399
K	3,463	3,575	3,571	3,355	3,404	3,470	3,509	3,148	3,330	3,031	2,996	2,885	2,958	2,998	3,515	3,798	3,646	3,568
Sum_Cat	20,070	20,071	20,089	19,894	19,939	19,928	19,971	19,959	20,288	20,015	19,981	20,012	20,032	20,031	20,034	20,002	19,943	19,988
Sum_O	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000	32,000
Z	15,995	15,990	15,979	16,006	16,005	16,006	15,984	16,024	16,007	15,981	16,004	15,995	15,980	15,981	16,054	16,007	16,019	16,000
X	4,090	4,091	4,114	3,895	3,960	3,929	3,996	3,934	4,281	4,059	4,021	4,075	4,081	4,061	3,980	3,994	3,924	3,988
Ab	12,5	11,3	12,6	13,0	10,8	10,6	10,9	19,0	21,8	23,8	22,8	25,8	25,9	25,4	9,9	4,5	6,2	10,1
An	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
Or	87,5	88,7	87,4	87,0	89,1	89,3	89,1	81,0	78,2	76,0	77,2	74,0	74,1	74,6	90,0	95,5	93,8	89,9

Tabela 6c - Análises químicas quantitativas (WDS) do feldspato alcalino das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Mineral	FA		
Litotipo	Enclave félsico		
Amostra	PPE-16		
Cristal/ Descrição	16kfs1		
Ponto	1	3	4
ÓXIDOS			
SiO ₂	63,90	62,51	62,70
Al ₂ O ₃	18,77	19,42	19,36
TiO ₂	0,07	0,10	0,09
Fe ₂ O ₃	0,50	0,30	0,28
MnO	<l.d.	<l.d.	<l.d.
MgO	<l.d.	<l.d.	<l.d.
CaO	0,09	0,03	<l.d.
Na ₂ O	2,03	2,50	2,35
K ₂ O	12,87	11,82	12,28
BaO	0,91	1,59	1,34
SrO	0,14	0,32	0,32
Total	99,29	98,61	98,82
CÁTIONS			
Si	11,852	11,704	11,720
Al	4,104	4,286	4,265
FeIII	0,069	0,042	0,039
Ti	0,010	0,014	0,013
Mn	0,001	0,002	0,001
Mg	0,002	0,002	0,000
Ba	0,010	0,023	0,023
Sr	0,098	0,173	0,145
Ca	0,017	0,007	0,019
Na	0,729	0,907	0,852
K	3,045	2,823	2,927
Sum_Cat	19,938	19,983	20,005
Sum_O	32,000	32,000	32,000
Z	16,035	16,046	16,037
X	3,903	3,938	3,968
Ab	19,2	24,3	22,4
An	0,5	0,2	0,5
Or	80,3	75,5	77,1

Anexo III

Análises químicas por ICPM-LA de clinopiroxênio, titanita e apatita dos nefelina sienitos e dos enclaves microgranulares félsicos e máfico-ultramáficos da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Abreviações utilizadas neste anexo:

- identificação do ponto: número;
- para localização dos pontos: B – borda do grão, I – zona intermediária entre borda e núcleo,
N – núcleo do grão;
- < “número”: análises abaixo do limite de detecção, indicado pelo valor escrito em cinza;
- n.a.: não analisado.

Tabela 1 – clinopiroxênio

Tabela 2 – titanita

Tabela 3 - apatita

Tabela 2: Análises químicas representativas de titanita das duas fácies de nefelina sienito e dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos

Litotipo	Nefelina sienito médio-grosso a grosso				Nefelina sienito médio-fino a fino				Enclave microgranular máfico-ultramáfico equigranular			Micro-nefelina sienito da borda do enclave máfico-ultramáfico		Enclave microgranular máfico-ultramáfico "porfiritico"					
	PPE-8A				PPE-6b				PPE-5B			PPE-22		PPE-32A					
	Titanita 1		Titanita 2		Titanita 3		Titanita 4		Titanita 1			Titanita NeS		Titanita da matriz		Titanita do bolsão félsico			
	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2	3	1	2	1	2	1	2	3	
Sc	6,42	8,33	5,24	7,71	4,51	5,78	3,91	6,19	4,76	6,64	8,44	8,35	5,67	3,15	5,36	<3,00	4,66	3,53	
Ti	194460,63	223665,94	200349,3	238609,27	201067,97	197576,2	178600,28	187726,97	180511,83	190037,92	187003	178818,86	187837,75	196638,53	195008,14	201294,59	83689,23	188886,44	
V	652,52	736,84	653,7	818,28	613,79	539,06	666,27	685,34	345,59	324,46	238,56	774,06	798,46	623,24	599,38	611,54	205,64	547,39	
Cr	<22,92	<22,83	<16,30	<18,65	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Mn	855,87	922,09	868,29	1076,66	935,63	982,79	820,13	890,27	849,29	918,65	656,01	741,36	887,17	508,09	602,96	807,79	602,36	778,31	
Co	<0,33	<0,55	0,19	<0,52	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Ni	<2,25	<1,53	<1,12	<1,27	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Cu	1,97	3,75	<1,65	<2,16	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Zn	17,42	5,72	<4,12	<6,82	11,95	<7,36	5,94	6,78	<6,14	<7,88	9,97	13,54	15,05	4,58	5,67	<7,60	8,28	23,39	
Ga	87,2	104,93	83,7	106,25	120,25	112,47	106,72	100,61	34,23	24,32	23,5	72,98	111,95	30,46	23,51	78,29	76,26	85,75	
Rb	<0,30	0,24	0,16	0,29	<0,25	0,21	<0,25	0,23	<0,28	<0,30	<0,25	1,01	0,24	0,65	3,83	0,33	20,22	16,59	
Sr	1396,75	1496,71	1070,18	1411,07	1841,86	2214,52	925,2	1002,87	1273,24	1284,2	1207,53	691,96	828,42	1375,7	1349,83	934,88	3423,8	1386,24	
Y	903,67	995,67	771,52	1009,13	1329,81	1245,84	1029,76	1012,45	306,12	236,54	193,76	568,99	1015,27	251,47	235,84	760,59	564,34	672,28	
Zr	5946,09	6345,09	5952,95	7068,62	4517,03	3737,32	6123,81	7084,17	1953,01	1840,95	1574,62	6032,8	7738,72	2962,5	3278,86	6948,82	3799,24	5307,57	
Nb	3933,55	4646,04	4434,5	4857,52	4160,95	3031,74	4846,35	6355,2	16796,73	16028,32	14666,08	5227,33	5753,56	3035,14	2900,19	6577,74	2761,11	5060,71	
Mo	1,71	2,38	2,95	3,82	4,7	2,41	2,04	2,96	2,58	3,3	3,34	1,76	0,99	7,67	6,86	2,73	1,24	5,45	
Sn	73,18	73,08	78,38	67,32	62,97	53,24	71,08	72,87	41,63	37,37	29,13	76,67	73,42	22,88	31,07	77,53	27,02	64,05	
Sb	<0,62	<0,35	<0,51	<0,41	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Cs	0,088	0,085	0,059	<0,080	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	
Ba	1,56	0,25	<0,00	<0,00	<1,30	0,8	<0,89	<0,92	0,57	<0,90	<0,90	<1,17	<0,76	0,9	<0,00	<0,87	0,96	1,05	
La	3054,39	3176,35	3191,01	2855,79	2924,85	2529,08	3150,22	3440,14	1241,38	1049,15	933,33	2438,25	3255,99	881,68	848,88	2750,23	3925,87	2702,23	
Ce	8063,75	8354,83	8329,68	7718,46	9019,4	7883,83	9111,18	9889,02	2906,5	2117,4	1876,73	6347,79	8609,14	2176,62	2109,61	6534,87	7603,81	6188,57	
Pr	1021,28	1036,39	964,2	975,78	1312,27	1111,84	1223,95	1262,67	320,13	217,56	197,18	751,13	1054,94	244	234,42	744,78	803,83	678,95	
Nd	3941,39	4059,97	3486,93	3871,94	5878,55	5237,1	5024,08	5269,26	1141,97	738,24	698	2612,69	3988,44	942,01	878,36	2671,94	2924,78	2443,16	
Sm	625,08	631,08	519,71	623	1026,6	929,08	768,27	788,62	178,23	107,31	101,68	352,87	570,27	119,89	133,95	357,21	354,75	306,63	
Eu	166,52	170,33	131,36	154,03	280,81	279	199,47	203,88	81,94	64,86	64,98	94,99	147,77	54,4	59,69	107,52	119,93	101,41	
Gd	369,54	386,95	302,54	339,94	677,32	638,57	443,63	497,16	119,32	81,07	59,08	209,73	365,63	87,51	84,04	244,95	229,28	223,49	
Tb	50,45	52,92	43,72	44,51	83,5	78,46	58,64	60,95	15,48	9,63	9,21	31,95	46,11	11,66	10,51	30,1	28,37	29,45	
Dy	240,01	267,29	229,56	237,33	378,08	360,24	293,86	286,42	78,78	51,55	41,93	151,71	224,2	56,31	49,99	162	131,54	146,28	
Ho	44,95	45,08	34,7	39,7	56,95	57,99	44,48	45,42	12,72	9,86	8,02	23,61	38,92	9,13	8,53	26,88	22,55	23,47	
Er	88,72	94,75	77,78	80,63	116,83	108,32	95,17	91,51	27,87	20,62	16,84	54,83	80,73	20,03	18,56	56,87	44,52	56,06	
Tm	9,59	9,98	8,7	9,88	12,1	11,27	10,28	10,07	3,76	2,14	2,43	5,24	8,55	2,26	2,23	5,58	4,37	4,51	
Yb	47,63	49,66	44,13	41,84	50,89	51,58	50,27	49,75	18,3	12,22	13,02	30,72	38,74	14,96	12,56	23,86	19,44	18,61	
Lu	4,81	4,73	3,67	4,12	6,25	5,59	4,78	4,58	1,4	1,24	1,33	2,72	3,93	1,56	1,09	2,1	2,07	2,47	
Hf	197,96	179,8	183,14	178,1	132,56	120,04	192,6	263,76	49,6	39,35	35,1	184,85	192,91	45,04	45,85	144,71	68,85	99,88	
Ta	377,13	359,5	312,63	325,21	486,22	352,57	574,88	827,19	1523,8	1044,58	505,82	314,36	483,74	209,33	247,07	226,75	123,41	136,49	
Pb	1	1,34	0,77	1,54	0,89	1,22	0,89	1,26	1,15	1,23	1,47	1,07	1,29	0,7	1,89	1,95	3,37	1,85	
Th	58,81	56,41	45,29	48,58	67,83	75,12	52,79	67,57	68,87	71,07	70,96	32,57	52,97	143,12	137,03	64,62	150,25	90,46	
U	8,21	7,82	7,11	8,76	7,05	7,38	7,81	8,97	15,21	15,06	16,83	6,61	8,22	27,7	29,93	13,31	21,17	23,88	

Tabela 3: Análises químicas representativas de apatita do nefelina sienito médio-fino a fino, dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos equigranulares e dos "porfiríticos".

Litotipo	Nefelina sienito médio-fino a fino			
Amostra	PPE-6b			
Cristal	Apatita 1			
Ponto	1	2	3	4

Enclave máfico-ultramáfico equigranular			
PPE-5B			
Apatita 1		Apatita 2	
1	2	1	2

Enclave máfico-ultramáfico "porfirítico"	
PPE-32A	
Apatita 1	
1	2

Sc	<2,31	<1,61	<1,90	<2,30
Ti	127,53	212,51	54,79	44,87
V	111,08	115,46	98,81	83,82
Mn	266,69	412,73	263,48	253,67
Zn	<4,77	30,93	<3,91	8,29
Ga	149,72	119,37	131,66	129,78
Rb	2,77	0,98	<0,24	0,96
Sr	12689,93	12382,68	11208,32	12135,81
Y	680,6	725,09	635,59	781,8
Zr	30,68	39,59	24,81	36,91
Nb	2,68	4,14	0,88	2,01
Mo	<0,75	<0,53	<0,00	0,49
Sn	<4,45	<3,20	<3,57	4,64
Ba	14,8	14,18	7,85	6,58
La	4663,33	5088,55	4008,76	4987,27
Ce	10758,98	13781,59	9376,68	11102,64
Pr	1188,44	1317,05	1161,99	1288,5
Nd	4881,95	5556,44	4258,4	5003,33
Sm	654,88	710,64	565,25	714,82
Eu	161,95	185,87	144,85	179,15
Gd	455,48	447,26	390,03	431,34
Tb	47,26	46,73	40,34	46,47
Dy	195,14	191,08	163,08	202,13
Ho	29,29	27,27	26,73	32,56
Er	63,26	59,27	51,66	58,99
Tm	4,72	4,3	4,36	5,62
Yb	23,88	33,15	29,01	23,83
Lu	3,19	2,61	2,35	2,78
Hf	0,64	<0,53	0,51	0,7
Ta	0,14	0,1	0,15	0,152
Pb	3,75	4,16	2,73	2,54
Th	73,79	60,76	52,83	62,55
U	8,6	8,85	5,83	6,11

<2,69	<3,07	<3,17	<3,28
<11,17	<12,47	<15,11	<14,23
7,98	9,01	10,39	18,89
442,9	466,82	367,25	360,24
<5,28	<7,36	<8,50	<8,52
44,51	43,43	45,25	46,61
0,68	0,65	0,77	1,6
23602,42	23074,38	25533,87	28979,29
230,82	239,1	261,34	293,78
<0,22	0,67	1,34	1,94
0,92	0,87	0,81	1,5
2,66	<1,76	1,21	2,87
<5,06	<5,17	<6,01	<6,06
33,67	34,31	19,1	31,28
2667,95	2681,94	2827,52	3237,27
3970,29	4088,73	4332,36	4916,15
353,32	350,7	395,02	434,86
1126,92	1127,82	1303,42	1424,6
143,96	142,46	164,78	166,84
38,34	40,34	42,63	44,83
111,08	115,45	121,49	142,2
9,66	11,32	13,14	13,77
48,35	51,93	60,23	60,72
7,83	9,18	9,83	10,74
17,43	18,64	19,43	25,26
2,06	2,72	1,56	3,08
8,06	11,97	11,07	11,59
0,91	0,82	1,22	1,25
<0,00	<0,63	<0,66	<0,00
0,027	<0,00	<0,095	0,033
5,5	4,42	3,05	4,4
77,13	89,83	122,93	117,27
5,66	5,8	5,07	4,59

<2,27	<2,79
9,12	41,48
252,72	243,48
383,14	380,97
5,75	<5,63
93,39	68,13
<0,190	1,19
9054,56	7930,95
465,48	439,29
19,96	123,86
0,24	14,54
<0,70	1,34
<4,02	<5,25
<0,69	2,38
4941,92	4081,99
8863,2	7058,26
835,49	673,12
2697,77	2192,27
281,3	263,4
76	74,92
195,36	180,37
19,44	19,4
86,5	83,04
16,02	13,77
31,18	30,62
2,97	2,9
14,77	14,95
1,39	1,95
<0,70	1,72
<0,072	0,331
2,01	2,68
29,27	31,35
4,22	8,52

Anexo IV

Análises químicas por FRX dos nefelina sienitos, dique fonolítico e enclaves microgranulares félsicos e máfico-ultramáficos da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Tabela 1: Elementos maiores e menores

- Óxidos expressos em % em peso;
- Fe_2O_3 simboliza o ferro total;
- para o cálculo das normas, a proporção molecular de FeO foi calculada pela proporção $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,5$ (para rochas félsicas) e $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,1$ (para os enclaves máfico-ultramáficos).

Tabela 2: Normas e índices

- Normas CIPW;
- Índice de Diferenciação (ID) = $Q+Ab+Or+Ne+Ks+Lc$ (normativos);
- Índice de Peralcalinidade (IP) = $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$;
- $\#Mg = 100 \cdot \text{molar Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$.

Tabela 3: Elementos traços

- Elementos expressos em ppm;
- n.a. – não analisado;
- números em cinza indicam valores muito próximos ou abaixo do limite de detecção.

Tabela 1 - Análises químicas dos elementos maiores por FRX das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Amostra	Litotipo	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5	Loi	Total
PPE-03	Enclave félsico	54,21	0,47	21,22	3,06	0,17	0,36	1,14	7,85	8,71	0,06	1,44	98,68
PPE-31	Enclave félsico	53,86	0,53	20,78	3,26	0,17	0,51	1,52	6,65	8,81	0,06	3,15	99,31
PPE-21	Dique fonolítico	54,08	0,60	20,55	3,55	0,21	0,37	1,62	7,15	9,40	0,07	1,59	99,18
PPE-1B	Enclave máfico-ultramáfico	44,06	3,04	9,79	11,02	0,55	7,12	15,61	5,08	1,54	0,59	0,86	99,25
PPE-7A	Enclave máfico-ultramáfico	42,87	3,38	11,48	11,49	0,62	5,16	14,29	5,38	1,87	1,04	1,08	98,66
PPE-12	Nefelina sienito grosso	53,21	0,84	19,96	4,06	0,23	0,47	1,83	7,28	8,44	0,11	2,28	98,70
PPE-13	Nefelina sienito grosso	53,90	0,95	19,96	4,30	0,24	0,42	2,03	5,15	8,34	0,15	4,31	99,75
PPE-14	Nefelina sienito grosso	54,14	0,89	19,96	4,03	0,24	0,36	1,90	5,57	8,41	0,14	3,87	99,50
PPE-28A	Nefelina sienito fino	53,94	0,68	20,35	3,75	0,20	0,41	1,64	7,86	8,43	0,09	1,45	98,80
PPE-36A	Nefelina sienito fino	53,77	0,80	19,71	4,49	0,28	0,46	1,94	7,59	8,28	0,11	1,32	98,76
PPE-5A	Nefelina sienito fino	54,43	0,77	19,79	4,27	0,27	0,33	1,93	7,59	8,22	0,13	1,30	99,03
PPE-5B	Nefelina sienito fino	54,74	0,63	20,22	3,91	0,25	0,24	1,60	7,41	8,48	0,07	2,16	99,71
	Limite de detecção	0,03	0,02	0,002	0,01	0,01	0,02	0,01	0,003	0,003	0,01	0,01	

Tabela 2 - Normas CIPW e índices, calculados utilizando os dados de FRX das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Amostra	Litotipo	Or	Ab	An	Ne	Di	OI	Mt	Il	Ap	Ac	Lc	Wo	Hm	Pf	Total	ID	IP	#Mg
PPE-03	Enclave félsico	51,47	4,52		30,41	4,33		1,89	0,89	0,13	5,08		0,05			98,78	86,40	1,05	22,44
PPE-31	Enclave félsico	52,06	10,41	0,83	24,84	2,75		4,28	1,01	0,15			1,16	0,31		97,80	87,32	0,99	27,78
PPE-21	Dique fonolítico	54,25			28,91	4,86		2,00	1,13	0,16	6,29	1,02	0,76			99,37	84,18	1,07	20,40
PPE-1B	Enclave máfico-ultramáfico	9,10	3,34		20,82	38,33		0,07	5,77	1,37	1,06		10,21	10,60		100,68	33,27	1,02	73,05
PPE-7A	Enclave máfico-ultramáfico	11,05	7,61	1,65	20,54	27,78			6,17	2,42			11,01	11,49	0,22	99,94	39,20	0,95	65,32
PPE-12	Nefelina sienito grosso	49,88	5,50		27,18	4,23		3,27	1,59	0,26	5,22		1,33			98,46	82,56	1,06	22,16
PPE-13	Nefelina sienito grosso	49,29	17,48	6,71	14,14	1,87	0,13	4,96	1,80	0,34				0,88		97,59	80,90	0,88	19,37
PPE-14	Nefelina sienito grosso	49,70	16,97	4,62	16,34	1,94		4,69	1,68	0,32			0,59	0,80		97,65	83,01	0,92	18,01
PPE-28A	Nefelina sienito fino	49,82	2,98		29,66	5,61		1,56	1,29	0,21	7,73		0,37			99,24	82,46	1,08	21,19
PPE-36A	Nefelina sienito fino	48,93	4,05		27,75	5,98		2,56	1,53	0,25	7,88		0,75			99,69	80,74	1,09	20,12
PPE-5A	Nefelina sienito fino	48,58	7,04		26,54	4,96		2,57	1,46	0,30	7,22		1,20			99,87	82,16	1,08	15,97
PPE-5B	Nefelina sienito fino	50,11	8,76		26,02	3,68		3,06	1,19	0,17	5,21		1,31			99,51	84,89	1,06	13,11

Tabela 3 - Análises químicas de elementos traços por FRX das amostras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Amostra	Litotipo	Ba	Ce	Cl	Co	Cr	Cu	F	Ga	La	Nb	Nd	Ni	Pb	Rb
PPE-03	Enclave félsico	507	142	910	< 6	< 13	< 5	1457	38	112	150	44	< 5	27	203
PPE-31	Enclave félsico	325	178	68	< 6	< 13	< 5	590	37	142	166	52	< 5	17	300
PPE-21	Dique fonolítico	138	230	1221	< 6	< 13	< 5	1232	38	171	204	84	< 5	19	184
PPE-1B	Enclave máfico-ultramáfico	< 37	369	n.a.	21	538	< 5	n.a.	22	187	185	118	74	13	34
PPE-7A	Enclave máfico-ultramáfico	48	557	n.a.	9	85	< 5	n.a.	29	314	290	201	31	12	40
PPE-12	Nefelina sienito grosso	649	240	1007	< 6	< 13	< 5	2274	38	190	220	94	< 5	30	176
PPE-13	Nefelina sienito grosso	628	601	< 50	< 6	< 13	< 5	< 550	37	217	246	130	< 5	47	176
PPE-14	Nefelina sienito grosso	654	560	< 50	< 6	< 13	< 5	1019	37	203	240	114	< 5	46	172
PPE-28A	Nefelina sienito fino	249	202	1433	< 6	< 13	< 5	1518	39	167	197	88	< 5	24	168
PPE-36A	Nefelina sienito fino	344	300	1440	< 6	< 13	< 5	2593	39	228	268	101	< 5	32	171
PPE-5A	Nefelina sienito fino	347	581	1394	< 6	< 13	< 5	2736	39	216	261	136	< 5	42	175
PPE-5B	Nefelina sienito fino	194	604	681	< 6	< 13	< 5	2030	40	220	243	113	< 5	40	227
	Limite de detecção	37	35	50	6	13	5	550	9	28	3	14	5	4	3

Amostra	Litotipo	S	Sc	Sr	Th	U	V	Y	Zn	Zr
PPE-03	Enclave félsico	397	< 14	3305	35	38	46	31	135	683
PPE-31	Enclave félsico	352	< 14	1903	27	23	54	37	121	671
PPE-21	Dique fonolítico	345	< 14	1896	32	25	57	45	146	777
PPE-1B	Enclave máfico-ultramáfico	n.a.	35	743	30	12	277	45	244	750
PPE-7A	Enclave máfico-ultramáfico	n.a.	23	1455	39	15	269	70	261	1058
PPE-12	Nefelina sienito grosso	543	< 14	3183	41	34	76	54	157	920
PPE-13	Nefelina sienito grosso	< 300	< 14	3348	45	36	95	51	171	783
PPE-14	Nefelina sienito grosso	337	< 14	3349	45	36	82	50	172	847
PPE-28A	Nefelina sienito fino	479	< 14	2055	33	27	69	43	139	806
PPE-36A	Nefelina sienito fino	554	< 14	2452	47	32	73	56	206	1096
PPE-5A	Nefelina sienito fino	613	< 14	2429	45	28	81	54	195	1085
PPE-5B	Nefelina sienito fino	493	< 14	1740	41	24	67	56	181	988
	Limite de detecção	300	14	2	7	3	9	2	2	2

Anexo V

Análises químicas por ICP-MS dos nefelina sienitos, dique fonolítico e enclaves microgranulares félsicos e máfico-ultramáficos da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

Tabela única.

- Valores expressos em ppm.

Tabela 1: Análises químicas por ICP-MS das amostras da Pedreira da Prefeitura (Rotinas 1 e 2).

	Amostra	Litotipo	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
Rotina 1	PPE-31	enclave félsico	196	1695	33,1	805	190	2,85	229	165	265	25,1	78,3	9,50	2,61	7,28
	PPE-7A	enclave máfico-ultramáfico	33,6	1368	62,4	1165	357	0,62	29,2	351	580	65,8	220	28,3	9,95	21,2
	PPE-27B	nefelina sienito fino	114	1656	41,3	905	263	1,81	216	213	372	37,0	118	14,6	4,29	11,4
	PPE-5A	nefelina sienito fino	103	1900	42,6	1005	286	1,87	258	225	385	38,7	123	15,2	4,43	12,1
	PPE-5B	nefelina sienito fino	153	1496	45,0	945	285	2,41	164	234	380	37,5	116	13,9	3,96	11,2
	PPE-13	nefelina sienito grosso	113	3040	43,9	757	293	2,73	609	236	394	41,4	133	16,8	4,95	13,0
	PPE-14	nefelina sienito grosso	111	3056	42,8	835	287	2,52	631	226	375	37,5	120	15,1	4,49	11,8
Rotina 2	PPE-1B	enclave máfico-ultramáfico	32,0	742	41,9	730	196	0,39	17,4	174	314	35,6	120,9	17,8	6,50	11,9
	PPE-21	dique fonolítico	139	1650	39,2	806	219	1,88	120	180	311	31,3	97,0	12,6	3,60	7,72
	PPE-3	enclave félsico	155	3147	25,5	732	165	1,47	452	120	198	18,1	55,4	7,26	2,15	4,63
	PPE-12	nefelina sienito grosso	123	3013	48,5	987	255	1,90	527	212	353	35,3	112	15,4	4,56	9,64
	PPE-28A	nefelina sienito fino	130	1988	38,8	882	218	1,39	214	186	308	30,6	96,0	12,8	3,73	8,08
	PPE-36A	nefelina sienito fino	125	2312	51,5	1190	287	1,95	287	252	409	40,9	127	17,1	4,90	10,6

	Amostra	Litotipo	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U
Rotina 1	PPE-31	enclave félsico	1,06	5,60	1,06	2,98	0,41	2,60	0,37	13,6	12,1	21,8	4,34
	PPE-7A	enclave máfico-ultramáfico	2,86	14,1	2,38	6,24	0,75	4,52	0,65	20,3	2,69	26,1	4,86
	PPE-27B	nefelina sienito fino	1,55	8,17	1,48	4,08	0,54	3,31	0,46	17,8	16,8	26,6	5,70
	PPE-5A	nefelina sienito fino	1,64	8,50	1,54	4,22	0,56	3,40	0,47	20,4	18,5	30,9	6,58
	PPE-5B	nefelina sienito fino	1,57	8,31	1,58	4,37	0,60	3,75	0,52	19,5	18,1	30,4	6,66
	PPE-13	nefelina sienito grosso	1,75	9,02	1,62	4,40	0,59	3,68	0,52	16,1	21,1	29,9	8,33
	PPE-14	nefelina sienito grosso	1,60	8,32	1,51	4,11	0,55	3,41	0,48	17,3	19,9	30,3	9,29
Rotina 2	PPE-1B	enclave máfico-ultramáfico	1,69	8,88	1,52	3,86	0,49	2,91	0,42	14,5	1,59	17,5	4,17
	PPE-21	dique fonolítico	1,25	6,96	1,29	3,46	0,47	2,87	0,41	15,5	13,9	21,7	4,88
	PPE-3	enclave félsico	0,75	4,26	0,82	2,28	0,33	2,04	0,29	13,6	16,3	22,2	5,02
	PPE-12	nefelina sienito grosso	1,53	8,52	1,58	4,30	0,60	3,65	0,52	18,5	17,8	27,0	6,18
	PPE-28A	nefelina sienito fino	1,26	6,96	1,27	3,45	0,47	2,90	0,42	16,4	15,6	23,7	5,43
	PPE-36A	nefelina sienito fino	1,67	9,24	1,70	4,55	0,62	3,75	0,53	22,3	21,7	31,7	7,30