

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PETROGRAFIA E MINERALOGIA DE ENCLAVES  
MÁFICO-ULTRAMÁFICOS EM NEFELINA SIENITOS DA  
PEDREIRA DA PREFEITURA, MACIÇO ALCALINO  
POÇOS DE CALDAS (MG-SP).**

**Bruna Passarelli Ricardi**

Orientador: Prof. Dr. Silvio Roberto Farias Vlach

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF – 2006/08)**

SÃO PAULO  
2006

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Petrografia e Mineralogia de enclaves máfico-  
ultramáficos em nefelina sienitos da Pedreira da  
Prefeitura, Maciço Alcalino Poços de Caldas (MG-SP)**

**Bruna Passareli Ricardi**



**Monografia de Trabalho de Formatura**

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Silvio Roberto Farias Vlach

Prof. Dr. Excelso Ruberti

Prof. Dr. Gianna Maria Garda

São Paulo

2006



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PETROGRAFIA E MINERALOGIA DE ENCLAVES  
MÁFICO-ULTRAMÁFICOS EM NEFELINA SIENITOS DA  
PEDREIRA DA PREFEITURA, MACIÇO ALCALINO  
POÇOS DE CALDAS (MG-SP).**



Bruna Passarelli Ricardi

Orientador: Silvio Roberto Farias Vlach

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF – 2006/8)

DEDALUS - Acervo - IGC



30900024376

SÃO PAULO  
2006





Quanto à sua importância, gostaria de dizer que a agenda é um instrumento de trabalho que pode ser usado de muitas maneiras, dependendo das necessidades de cada um.

Quanto ao conteúdo, gostaria de dizer que a agenda é um instrumento de trabalho que pode ser usado de muitas maneiras, dependendo das necessidades de cada um.

Quanto ao formato, gostaria de dizer que a agenda é um instrumento de trabalho que pode ser usado de muitas maneiras, dependendo das necessidades de cada um.

Quanto ao preço, gostaria de dizer que a agenda é um instrumento de trabalho que pode ser usado de muitas maneiras, dependendo das necessidades de cada um.

Quanto ao design, gostaria de dizer que a agenda é um instrumento de trabalho que pode ser usado de muitas maneiras, dependendo das necessidades de cada um.

Quanto ao tamanho, gostaria de dizer que a agenda é um instrumento de trabalho que pode ser usado de muitas maneiras, dependendo das necessidades de cada um.

Quanto ao material, gostaria de dizer que a agenda é um instrumento de trabalho que pode ser usado de muitas maneiras, dependendo das necessidades de cada um.

Agenda 2010

**Ao meu pai.  
Obrigada por tudo.**



## Agradecimentos

Gostaria de, primeiramente, agradecer aos meus pais e família por todo apoio que me deram durante minha vida toda, sem vocês eu jamais teria alcançado tantos objetivos!

Quero agradecer a todas as pessoas que conviveram comigo, me amaram, me ajudaram, me odiaram, me agüentaram... enfim, estiveram ao meu lado durante os cinco anos de Geo.

Agradeço a todos os meus amigos e amigas que me ajudaram de alguma forma, direta ou indiretamente e a Rasga (ai, e suas histórias de amor!), Noku (me ensinou algo de geologia quando eu ainda não sabia nada! Ah! E me ensinou a não ter ciúmes!), Jaú (valeu pelo esforço para tirar meus enclaves!), Tropesso (o contador de histórias...), Rosa (não chora Rosa, você vai conseguir se formar!), Dalmo (que mente brilhante! Não cara... é brincadeira!), Kacilda, se não fosse você para encher meus dias de histórias, causos, intrigas, fofocas, conselhos, risadas e cervejas (devíamos contar quantas cervejas experimentamos em toda a graduação!), o que seria de mim?! Alê, obrigada por me ajudar a coletar praticamente todo o material deste trabalho! E, claro, obrigada por ser esse companheiro, amigo, palhação, amante e amor maravilhoso que você é!

Gostaria de agradecer ao Prof. Silvio R. F. Vlach, meu mestre nesta jornada e a quem eu admiro muito! Pra mim é uma honra ter você como meu orientador.

Ao Marcos Mansueto, que durante 2 semanas dia e noite no laboratório de microsonda me ajudou demais e me fez rir e notar que dar apelido aos espectrômetros não é normal! À Angélica, do laboratório de óptica, que me agüentou por temporadas...!

E por fim, mas não menos importante, agradeço ao casal Ulbrich por terem realizado estudos tão maravilhosos sobre o Maciço Alcalino Poços de Caldas, fundamentais para a realização deste.

Agradeço aos Devics por terem feito a melhor trilha sonora pra se escrever do mundo, e à minha cachorra, que foi o único ser mamífero que me acompanhou *full time* na confecção deste trabalho!

Viva Joseph Climber!



Os dados de origem da literatura de Fernando Pessoa foram recolhidos por Carlos Reis (1971), estabelecendo duas séries parciais de poemas: o Livro para um Homem e o Livro da Manhã. O primeiro grupo inclui os poemas que foram publicados em revistas literárias e em jornais, e o segundo grupo inclui os poemas que foram publicados em livros. Os dados de publicação são, em geral, muito precisos, mas há algumas excepções. Os dados de publicação de alguns poemas são, em geral, muito precisos, mas há algumas excepções. Os dados de publicação de alguns poemas são, em geral, muito precisos, mas há algumas excepções.

Os dados de origem da literatura de Fernando Pessoa foram recolhidos por Carlos Reis (1971), estabelecendo duas séries parciais de poemas: o Livro para um Homem e o Livro da Manhã. O primeiro grupo inclui os poemas que foram publicados em revistas literárias e em jornais, e o segundo grupo inclui os poemas que foram publicados em livros.

A literatura de Fernando Pessoa é, em geral, muito precisa, mas há algumas excepções. Os dados de publicação de alguns poemas são, em geral, muito precisos, mas há algumas excepções. Os dados de publicação de alguns poemas são, em geral, muito precisos, mas há algumas excepções. Os dados de publicação de alguns poemas são, em geral, muito precisos, mas há algumas excepções.

O primeiro grupo de poemas inclui os poemas que foram publicados em revistas literárias e em jornais, e o segundo grupo inclui os poemas que foram publicados em livros. Os dados de publicação de alguns poemas são, em geral, muito precisos, mas há algumas excepções. Os dados de publicação de alguns poemas são, em geral, muito precisos, mas há algumas excepções.

A segunda série de poemas inclui os poemas que foram publicados em livros. Os dados de publicação de alguns poemas são, em geral, muito precisos, mas há algumas excepções. Os dados de publicação de alguns poemas são, em geral, muito precisos, mas há algumas excepções.

**Para sê grande, sê inteiro: nada**

Para sê grande, sê inteiro: nada  
Teu exagera ou exclui.  
Sê todo em cada coisa. Põe quanto és  
No mínimo que fazes.  
Assim em cada lago a lua toda  
Brilha, porque alta vive.

(Fernando Pessoa - Ricardo Reis)



## Resumo

Os nefelina sienitos da Pedreira da Prefeitura, Maciço Alcalino Poços de Caldas (MG-SP), compreendem duas fácies petrográficas principais, distintas pela sua textura. A primeira apresenta granulação média-grossa a grossa e textura tipicamente foiaítica, enquanto a segunda tem granulação média-fina a fina. Os sienitos de granulação mais grossa possuem enclaves microgranulares fonolíticos, arredondados, de composição semelhante à da rocha. Os sienitos mais finos, além de enclaves fonolíticos, apresentam enclaves microgranulares de natureza máfico-ultramáfica, no geral, com bordas angulosas e lineares.

Nesta monografia, as duas fácies sieníticas e os enclaves microgranulares da Pedreira da Prefeitura são descritos através de petrografia detalhada, e através de quimismo mineral os enclaves microgranulares máfico-ultramáficos são comparados com a rocha encaixante.

A mineralogia dos sienitos é semelhante à dos enclaves félsicos, tendo como máfico principal o clinopiroxênio, e acessórios, titanita, magnetita e apatita. Os enclaves máfico-ultramáficos são compostos essencialmente por diopsídio e são agrupados em dois: o Tipo I, com feldspato alcalino, nefelina, magnetita e titanita, e acessórios, apatita e flogopita, possuem textura "porfírica" com macrocristais de diopsídio e; Tipo II, somente com feldspato alcalino (como félsico) e acessórios, magnetita, titanita, flogopita e apatita, possuem textura equigranular. O índice de máficos destes enclaves é, em média, 70.

O piroxênio dos nefelina sienitos possui forte zonamento, de diopsídio no núcleo para egirina-augita nas bordas, com índices *mg#* entre 0,9 e 0,2 respectivamente. Este piroxênio, em particular o do sienito mais fino, possui características texturais semelhantes às do diopsídio dos enclaves máficos-ultramáficos, como núcleos incolores e borda verde xenomórfica. O diopsídio destes enclaves possui zonamento mais discreto e índice *mg#* da ordem de 0,9, assim como o núcleo dos cristais dos sienitos, porém com maior conteúdo de  $\text{TiO}_2$ , que pode chegar a 4,3% (em peso), classificando-os como diopsídios com Ti.

A nefelina destes enclaves possui assinatura química semelhante à do sienito mais fino, com maior conteúdo de  $\text{Fe}^{3+}$  e menor de K em relação ao sienito mais grosso. O feldspato dos enclaves mostra maior variação composicional ( $\text{Ab}_{10-33}\text{Or}_{72-80}$ ), em seu extremo sódico é semelhante ao do sienito mais grosso e em seu extremo potássico, com teores de SrO, em média, de 1,7% (em peso), é semelhante ao mais fino.

De um modo geral, as características texturais, estruturais e o quimismo dos minerais dos enclaves máfico-ultramáficos e do nefelina sienito fino a fino-médio sustentam a hipótese de coexistência de dois magmas distintos, um sienítico, outro ultramáfico, interagindo e gerando o sienito fino "híbrido" e os enclaves máfico-ultramáficos.



## Abstract

The nepheline syenites of Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas Alkaline Massif (MG-SP), includes two main petrographic facies, distinguished by their textures. The first one is medium-course to course grained and has typical foyaitic texture, meanwhile the second is medium-fine to fine grained. The courser grained syenite has microgranular phonolitic enclaves, rounded, with composition similar to the rock. The finer one has microgranular enclaves of mafic-ultramafic nature, in addition of the felsic ones.

In this monography, the two syenitic facies and the microgranular enclaves of Pedreira da Prefeitura are described through detailed petrography, and through mineral chemistry, the mafic-ultramafic microgranular enclaves are compared to the hostess rock.

The mineralogy of the syenites is similar to the felsic enclaves and has clinopyroxene as main mafic, and accessories, sphene, magnetite and apatite. The highest mafic index is 15. The mafic-ultramafic enclaves are constituted mainly of diopside and are grouped in two: the I Type, with alkali feldspar, nepheline, magnetite and sphene, and as accesories, apatite and phlogopite, has typical "porphyritic" texture with macrocristals of diopside and; II Type, with only alkali feldspar (as felsic mineral) and accessories like magnetite, sphene, phlogopite and apatite, this one has equigranular texture. The mafic index of these enclaves is around 70.

The pyroxene of the nepheline syenites has a great zoning, from diopside in the core to aegirine-augite in the rim, with *mg#* values between 0,9 and 0,2, respectively. This pyroxene, in particular the one of the finer syenite, has similar textural characteristics compared to the diopside of the mafic-ultramafic enclaves, such as colorless cores and and green xenomorphic rim. The diopside of such enclaves has a more subtle zoning and *mg#* values around 0,9, just like the cores of the cristals in the finer syenite, however with more content of  $\text{TiO}_2$ , that could reach 4,3% (in weight), classifying them as diopside with Ti.

The nepheline of these enclaves has chemical signature more likely the finer syenite, with more content of  $\text{Fe}^{3+}$  and less of K than the courser syenite. The feldspar of the enclaves shows a wider compositional variation ( $\text{Ab}_{10-33}\text{Or}_{72-80}$ ), in its sodium highest values it is similar to the courser syenite and in its potassium highest, with contents of SrO, in average, 1,7% (in weight), it is similar to the finer.

In general, the textural, structural characteristics and the chemistry of minerals of the mafic-ultramafic enclaves and the medium-fine to fine grained nepheline syenite support the hipotesis of coexistence of two diferent magmas, one syenitic, other ultramafic, interacting and generating the "hybrid" fine grained syenite and the mafic-ultramafic enclaves.



## Índice

|          |                                                                          |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                   | <b>1</b>  |
| 1.1      | <i>Relevância, Fundamentação e Objetivos do Projeto .....</i>            | <i>1</i>  |
| 1.2      | <i>Localização e Acessos .....</i>                                       | <i>2</i>  |
| 1.3      | <i>Breve Síntese Bibliográfica.....</i>                                  | <i>3</i>  |
| 1.3.1    | <i>Contexto Geológico .....</i>                                          | <i>3</i>  |
| 1.3.2    | <i>O Maciço Alcalino Poços de Caldas .....</i>                           | <i>5</i>  |
| <b>2</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                         | <b>7</b>  |
| 2.1      | <i>Atividades de Campo.....</i>                                          | <i>7</i>  |
| 2.2      | <i>Atividades de Laboratório .....</i>                                   | <i>7</i>  |
| 2.3      | <i>Atividades de Gabinete.....</i>                                       | <i>10</i> |
| <b>3</b> | <b>RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÕES .....</b>                         | <b>11</b> |
| 3.1      | <i>Os nefelina sienitos e os enclaves da Pedreira da Prefeitura.....</i> | <i>11</i> |
| 3.1.1    | <i>Enclaves Microgranulares.....</i>                                     | <i>13</i> |
| 3.2      | <i>Petrografia .....</i>                                                 | <i>14</i> |
| 3.2.1    | <i>Nefelina sienitos de granulação médio-grossa a grossa.....</i>        | <i>14</i> |
| 3.2.2    | <i>Nefelina sienitos de granulação fina a fina-média.....</i>            | <i>18</i> |
| 3.2.3    | <i>Enclaves microgranulares félsicos.....</i>                            | <i>19</i> |
| 3.2.4    | <i>Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos.....</i>                 | <i>21</i> |
| 3.3      | <i>Quimismo Mineral.....</i>                                             | <i>24</i> |
| 3.3.1    | <i>Piroxênio .....</i>                                                   | <i>24</i> |
| 3.3.2    | <i>Titanita.....</i>                                                     | <i>33</i> |
| 3.3.3    | <i>Minerais Opacos.....</i>                                              | <i>37</i> |
| 3.3.4    | <i>Feldspato alcalino.....</i>                                           | <i>41</i> |
| 3.3.5    | <i>Nefelina .....</i>                                                    | <i>44</i> |
| <b>4</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                        | <b>48</b> |
| <b>5</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                   | <b>50</b> |

**ANEXO I:** Fotografias representativas microscópicas dos enclaves microgranulares e rocha hospedeira, e macroscópicas destes e das principais estruturas da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

**Prancha I:** Foto panorâmica da frente da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas, com a localização das amostras coletadas e destaque para algumas entre as principais feições texturais e estruturais dos nefelina sienitos.



**Prancha II:** Foto panorâmica da frente da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas. Destaque para os principais tipos de enclaves, suas feições características e o contexto no qual estão inseridos.

**Prancha III:** Fotomicrografias ilustrativas de algumas das principais características mineralógicas e texturais dos nefelina sienitos da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

**Prancha IV:** Fotomicrografias ilustrativas de algumas das principais características mineralógicas e texturais dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

**ANEXO II:** Análises químicas quantitativas (WDS) representativas das fases minerais máficas e félsicas mais importantes dos nefelina sienitos da Pedreira e dos enclaves microgranulares máficos da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

**Tabela 1:** Análises químicas representativas de piroxênios dos nefelina sienitos da Pedreira da Prefeitura.

**Tabela 2:** Análises químicas quantitativas representativas de piroxênio do enclave Tipo I.

**Tabela 3:** Análises químicas quantitativas representativas de piroxênio do enclave Tipo II

**Tabela 4:** Análises químicas quantitativas representativas de titanita dos enclaves Tipo I e II e da rocha hospedeira.

**Tabela 5:** Análises químicas quantitativas representativas de magnetita dos enclaves Tipo I e II e da rocha hospedeira.

**Tabela 6:** Análises químicas quantitativas representativas de feldspato alcalino dos enclaves Tipo I e II e da rocha hospedeira.

**Tabela 7:** Análises químicas quantitativas representativas de nefelina do enclave Tipo I e da rocha hospedeira.

## **Índice de Figuras**

|                                                                                                                                  |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Figura 1-1: Mapa rodoviário entre São Paulo e Poços de Caldas, adaptado de ENGEMAP (2005). .....                                 | 3 |
| Figura 1-2: Mapa Geológico Regional (adaptado de Ulbrich et al. 2005). .....                                                     | 4 |
| Figura 1-3: Localização da área de estudo no mapa geológico do Maciço Alcalino Poços de Caldas (adaptado de Ulbrich 1984). ..... | 6 |
| Tabela 2-1: Padrões e tempo de contagem dos elementos químicos analisados por WDS. 10                                            |   |
| Tabela 3-3: Simbologia adotada para os diagramas das amostras analisadas no item 3.3.. 24                                        |   |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3-1: Diagrama Q-J ( $Q = Ca + Mg + Fe^{2+}$ e $J = 2Na$ ) para clinopiroxênios dos nefelina sienitos e enclaves da Pedreira da Prefeitura, classificando-os em variedades Quad, cálcico-sódicas e sódicas.....                                                                                                                                                                                       | 25 |
| Figura 3-2: (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 pertence os sienitos aqui estudados). (B) Composição catiônica dos piroxênios dos nefelina sienitos através do diagrama ternário WEF-Jd-Eg. .... | 26 |
| Figura 3-3: 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. ....                                                                                                                                                                                 | 27 |
| Figura 3-4: (A) Diagramas mostrando a variação de número de cátions por cela unitária (cpfu) por ponto do perfil núcleo-borda do clinopiroxênio da amostra PPE-6b, nefelina sienito médio-fino a fino. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados no cristal. (C) Fotomicrografia, com luz plano-polarizada.....                                                                            | 27 |
| Figura 3-5: (A) Diagramas mostrando a variação de número de cátions por cela unitária (cpfu) por ponto do perfil núcleo-borda do clinopiroxênio da amostra PPE-8A, nefelina sienito médio-grosso a grosso. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados no cristal. (C) Fotomicrografia, com luz plano-polarizada. ....                                                                       | 28 |
| Figura 3-6: (A) Diagrama composicional ternário para classificação de piroxênios, expresso por moléculas de Wo-En-Fs (wollastonita, enstatita e ferrossilita). (B) Diagrama composicional ternário, expresso pelos cátions Na-Mg-( $Fe^{2+}+Mn$ ) por cela unitária dos macrocristais de piroxênio dos enclaves Tipo I. ....                                                                                | 29 |
| Figura 3-7: (A) Diagramas mostrando a variação de número de cátions por cela unitária (cpfu) por ponto do perfil núcleo-borda do macrocristal de clinopiroxênio da amostra PC-19, enclave Tipo I. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados no cristal. (C) Fotomicrografia, com luz plano-polarizada.....                                                                                 | 30 |
| Figura 3-8: (A) Diagrama composicional ternário para classificação de piroxênios, expresso por moléculas de Wo-En-Fs (wollastonita, enstatita e ferrossilita). (B) Diagrama composicional ternário, expresso pelos cátions Na-Mg-( $Fe^{2+}+Mn$ ) por cela unitária dos piroxênios da matriz do enclave Tipo I. ....                                                                                        | 31 |
| Figura 3-9: (A) Diagramas mostrando a variação de número de cátions por fórmula unitária (cpfu) por ponto do clinopiroxênio da matriz da amostra PPE-1Bg, enclave Tipo I. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados no cristal. (C) Fotomicrografia, com luz plano-polarizada.....                                                                                                         | 31 |
| Figura 3-10: (A) Diagrama composicional ternário para classificação de piroxênios, expresso por moléculas de Wo-En-Fs (wollastonita, enstatita e ferrossilita). (B) Diagrama                                                                                                                                                                                                                                |    |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| composicional ternário, expresso pelos cátions Na-Mg-(Fe <sup>2+</sup> +Mn) por cela unitária dos piroxênios do enclave Tipo II. (C) Composição catiônica destes piroxênios através do diagrama ternário WEF-Jd-Eg. ....                                                                                                    | 32 |
| Figura 3-11: (A) Diagramas mostrando a variação de número de cátions por fórmula unitária (cpfu) por ponto do perfil núcleo-borda do clinopiroxênio da borda do enclave Tipo II, amostra PPE-5Bb. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados no cristal. (C) Fotomicrografia, com luz plano-polarizada..... | 33 |
| Figura 3-12: Diagrama mostrando a correlação entre Ca e Mn + Na + ETR + Y + Nd para as titanitas do enclave Tipo I, Tipo II e da rocha hospedeira.....                                                                                                                                                                      | 34 |
| Figura 3-13: Diagrama mostrando a correlação entre Ti e Zr + Nb + Al + Fe <sup>3+</sup> + Mg para as titanitas do enclave Tipo I, Tipo II e da rocha hospedeira.....                                                                                                                                                        | 34 |
| Figura 3-14: (A) Imagem BSE-Compo destacando titanita da amostra PPE-8A, nefelina sienito médio-grosso a grosso, com a localização dos pontos analíticos. (B) Diagrama mostrando a variação química em c.p.f.u. entre os pontos analisados.....                                                                             | 35 |
| Figura 3-15: (A) Imagem BSE-Compo destacando titanita da amostra PPE-7Aa, enclave Tipo I, com a localização dos pontos analíticos. (B) Diagrama mostrando a variação química em c.p.f.u. entre os pontos analisados. ....                                                                                                   | 36 |
| Figura 3-16: (A) Imagem BSE-Compo destacando titanita da amostra PPE-, enclave Tipo II, com a localização dos pontos analíticos. (B) Diagrama mostrando a variação química em c.p.f.u. entre os pontos analisados.....                                                                                                      | 37 |
| Figura 3-17: Imagens BSE-Compo destacando as magnetitas dos nefelina sienitos (A) médio-grosso a grosso (amostra PPE-8A) e (B) médio-fino a fino (amostra PPE-6b)...                                                                                                                                                        | 38 |
| Figura 3-18: Diagrama ternário composicional dos minerais opacos dos nefelina sienitos, expresso em moléculas de TiO <sub>2</sub> , FeO e Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . ....                                                                                                                                             | 38 |
| Figura 3-20: Diagrama ternário composicional dos minerais opacos dos enclaves tipo I, expresso em moléculas de TiO <sub>2</sub> , FeO e Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . ....                                                                                                                                               | 40 |
| Figura 3-21: Imagem BSE-Compo com destaque para a magnetita do enclave Tipo II (amostra PPE-5Bb).....                                                                                                                                                                                                                       | 41 |
| Figura 3-22: Diagrama ternário composicional dos minerais opacos dos enclaves tipo II, expresso em moléculas de TiO <sub>2</sub> , FeO e Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . ....                                                                                                                                              | 41 |
| Figura 3-23: Diagrama composicional ternário, expresso por moléculas de Ab-Na-Or, dos feldspatos analisados. ....                                                                                                                                                                                                           | 42 |
| Figura 3-24: (A) Imagem BSE-Compo destacando feldspato alcalino da amostra PPE-7Aa, enclave tipo I, com a localização dos pontos analíticos. (B) Diagrama mostrando a variação química em c.p.f.u. entre os pontos analisados. ....                                                                                         | 43 |



|                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3-25: (A) Imagem BSE-Compo referente à nefelina da amostra PPE-6b, nefelina sienito médio-fino a fino, com pontos de análises WDS indicados. (B) Diagrama mostrando a variação de c.p.f.u. por ponto analisado..... | 46 |
| Figura 3-26: Composição das nefelinas, expressa em termos das moléculas de Ne, Qz e Ks. ....                                                                                                                               | 46 |
| Figura 3-27: (A) Imagem BSE-Compo referente à nefelina da amostra PPE-1Bg, enclave Tipo I, com pontos de análises WDS indicados. (B) Diagrama mostrando a variação de c.p.f.u. por ponto analisado.....                    | 47 |

### Índice de Tabelas

|                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2-1: Padrões e tempo de contagem dos elementos químicos analisados por WDS. 10                                                                                                                                                                                 |    |
| Tabela 3-1: Análises modais (% em volume), obtidas por contagem de grãos, de amostras típicas dos enclaves microgranulares e dos nefelina sienitos encaixantes da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas (tr = traços; FA = Feldspato Alcalino; Nef = Nefelina)..... | 17 |
| Tabela 3-2: Ângulo de extinção dos clinopiroxênios ( $x^\circ$ na variedade fibrosa, $z^\circ$ nas demais variedades) de enclaves microgranulares e rochas hospedeiras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas. ....                                               | 20 |
| Tabela 3-3: Simbologia adotada para os diagramas das amostras analisadas no item 3.3..                                                                                                                                                                                | 24 |
| Tabela 3-4: Fórmulas gerais médias das nefelinas das amostras analisadas. ....                                                                                                                                                                                        | 45 |



## 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 (e.g. Nixon 1987, Didier & Barbarin 1991).

Os nefelina sienitos que afloram na região da Pedreira da Prefeitura, região norte do Maciço Alcalino Poços de Caldas, MG-SP, a oeste da cidade homônima, contêm dois grupos de enclaves microgranulares intrigantes. O primeiro grupo reúne enclaves microgranulares félsicos arredondados, de dimensões centimétricas a decimétricas e granulações finas a fina-médias; são em geral equigranulares e apresentam composição modal fonolítica (e.g. Ulbrich *et al.* 2002). O segundo grupo inclui enclaves mais angulosos, milimétricos a centimétricos, que apresentam em geral textura inequigranular fina a muito fina, freqüentemente com aspecto “porfirítico” dado por macrocristais de piroxênio e com composição modal máfica-ultramáfica, rica em clinopiroxênio.

O presente Trabalho de Formatura pretende estudar em detalhe amostras selecionadas destes últimos enclaves, com ênfase na sua caracterização estrutural, textural e mineralógica, utilizando-se de métodos petrográficos e micro-analíticos com microsonda eletrônica.

### 1.1. Relevância, Fundamentação e Objetivos do Projeto

Enclaves microgranulares 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).

Enclaves microgranulares de composição fonolítica ocorrem nos denominados nefelina sienitos da Pedreira, particularmente nos afloramentos da Pedreira da Prefeitura, sendo conhecidos na literatura há muitos anos e em geral interpretados como possíveis autólitos (Ulbrich *et al.* 1979; Ulbrich 1983; Ulbrich 1984). Trabalhos de campo mais recentes realizados pelo orientador e colegas mostraram que, além destes, aparecem outros enclaves, em geral menores e de natureza mais máfica, ricos em clinopiroxênio, os quais ocorrem ora isolados, ora no interior de alguns daqueles enclaves fonolíticos, resultando em um aspecto de “enclaves duplos”.



A análise dos clinopiroxênios presentes em algumas seções delgadas polidas mostrou que correspondem opticamente a uma “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, bordejados por egrina-augita e finalmente egrina. Por fim, vale a pena destacar que “titano-augitas” estão entre os minerais máficos mais típicos das rochas ultramáficas que afloram nas proximidades (*e.g.* Ulbrich *et al.* 2005).

As evidências apontadas dão o necessário suporte para se explorar uma hipótese de coexistência e interação entre magmas fonolíticos e ultrabásicos nesta área, que, se demonstrada, trará implicações importantes para a compreensão da gênese e evolução deste magmatismo e das rochas alcalinas da plataforma brasileira. O presente TF pretende explorá-la com base em dados estruturais, petrográficos e mineralógicos. Para tanto, serão enfatizadas as análises das relações estruturais entre os enclaves e as rochas hospedeiras e das relações texturais e variações composicionais dos minerais presentes nos enclaves e nas rochas hospedeiras imediatamente adjacentes.

## 1.2. 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.

A partir de São Paulo, se segue pela SP-330 ou SP-348 (Rodovias Anhanguera e Bandeirantes, respectivamente) até o Município de Campinas, então pela SP-340 até Aguaí, 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). O acesso à Pedreira da Prefeitura é, em grande parte através de ruas no interior do município até a Pedreira.



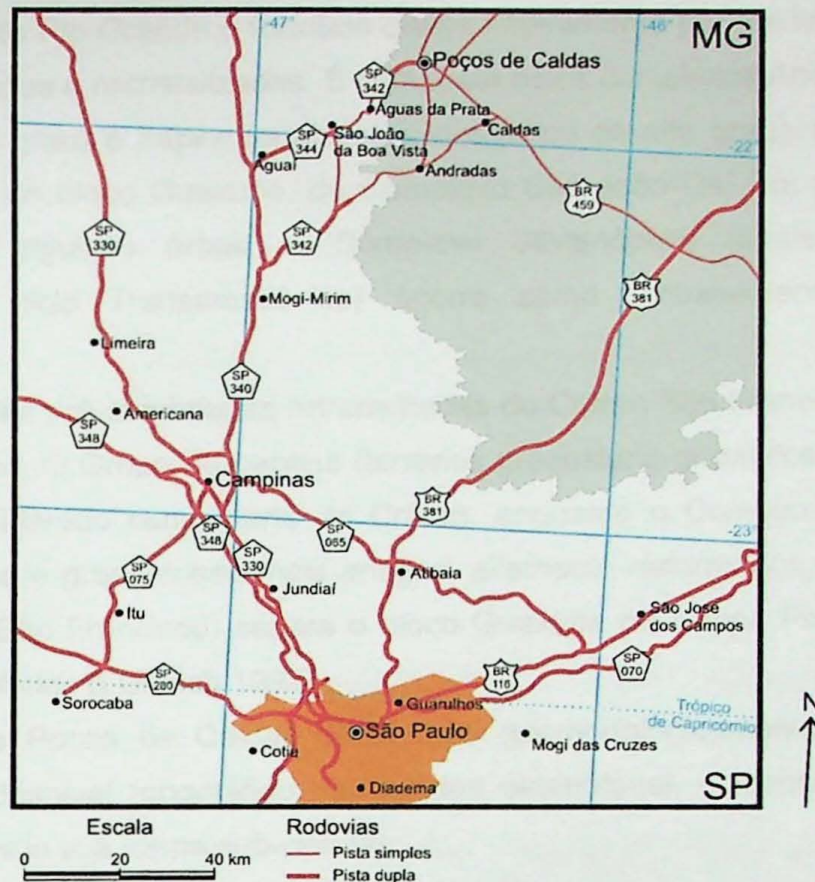


Figura 1-1: Mapa rodoviário entre São Paulo e Poços de Caldas, adaptado de ENGEMAP (2005).

### 1.3. Breve Síntese Bibliográfica

#### 1.3.1. Contexto Geológico

O Maciço Alcalino Poços de Caldas é uma de diversas ocorrências de intrusões alcalinas cretáceas da borda leste da Bacia do Paraná. Estas intrusões ocorreram a partir do rifteamento das placas Sul-Americana e Africana. Estas rochas são datadas entre 80 e 90 Ma (e.g. Amaral 1967 *apud* Alves 2003). O embasamento pré-cambriano nesta região pode ser agrupado em três unidades tectono-estratigráficas bem definidas: a descontínua Nappe Socorro-Guaxupé; a Faixa Alto Rio Grande e; o embasamento arqueano retrabalhado com porções adjacentes ao Cráton São Francisco e porções pertencentes ao Cráton. (Ulbrich & Ulbrich 1992, ver também Figura 1-2).

A Nappe Socorro-Guaxupé, estudada por diversos autores (e.g. Haddad *et al.* 1997, Janasi 1999) representa um grande cavalgamento da crosta durante o Neoproterozóico em direção a leste, sobre o Cráton São Francisco e é dividida em dois segmentos: ao norte, o bloco Guaxupé e ao sul, a estrutura Socorro. O bloco Guaxupé é composto pelos complexos Caconde (gnaisses quartzosos supracrustais) e Pinhal (subdivido em fácies graníticas migmatíticas e deformadas).



A Faixa Alto Rio Grande é formada quase inteiramente por unidades supracrustais fortemente deformadas e recrystalizadas. É composta pelos complexos Andrelândia (xistos e gnaisses de médio grau) e Itapira (gnaisses e quartzitos de alto grau), com afloramentos menores, ao norte do bloco Guaxupé, do Complexo São João Del Rei (filitos e xistos de baixo grau); em algumas áreas, 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 N e E do bloco 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 bloco Guaxupé da Nappe Passos (ao norte do bloco Guaxupé) (Ulbrich & Ulbrich 1992).

O Maciço Poços de Caldas destaca-se geomorfologicamente das rochas pré-cambrianas pelo desnível topográfico nas bordas setentrional, ocidental e meridional do maciço, que evidencia sua forma sub-circular.

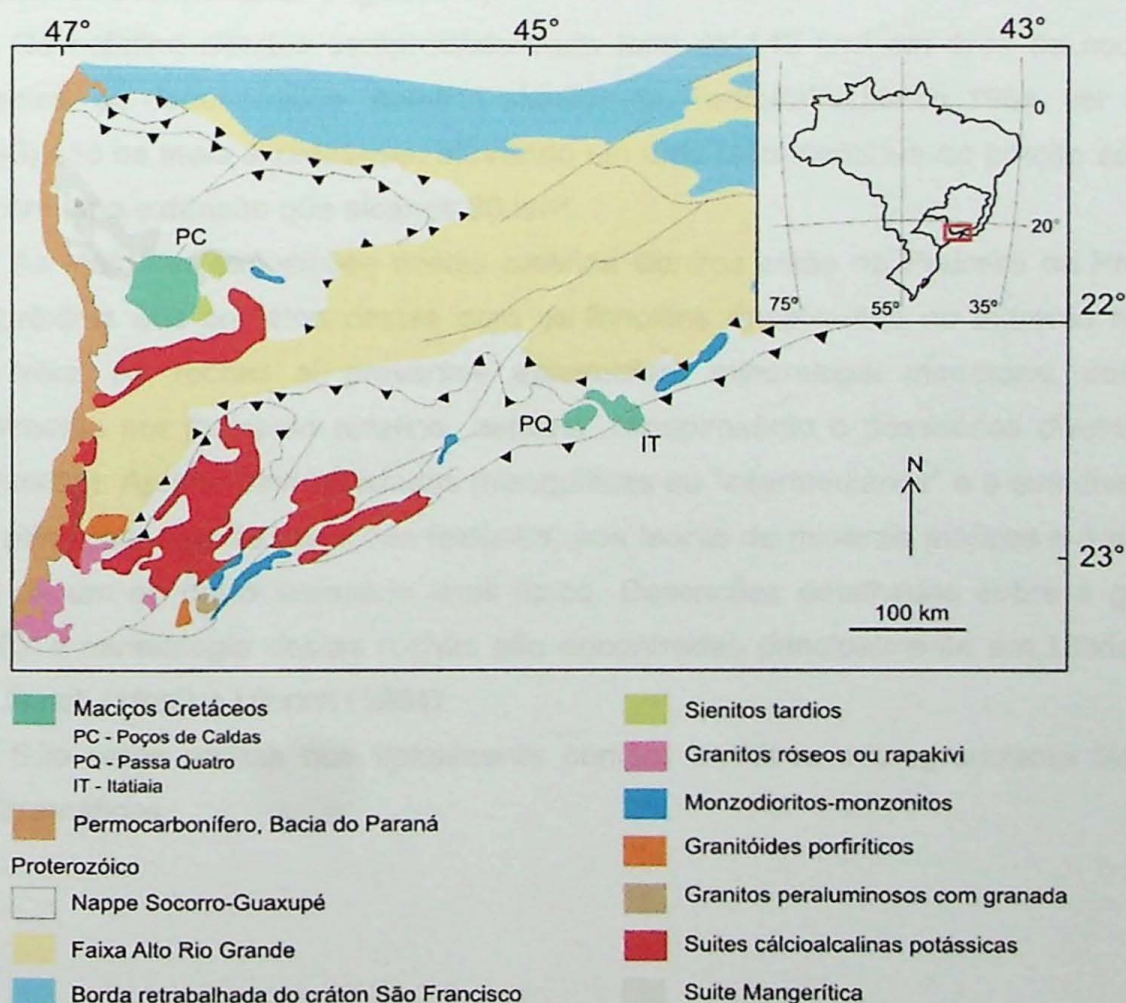


Figura 1-2: Mapa Geológico Regional (adaptado de Ulbrich *et al.* 2005).



### 1.3.2. O Maciço Alcalino Poços de Caldas

O Maciço Alcalino Poços de Caldas desperta a curiosidade dos cientistas desde o século XIX, quando Derby e Machado, em 1887 e 1888 respectivamente, descreveram diversas variedades petrográficas típicas da região. Entretanto, o primeiro mapa geológico foi apresentado por Ellert, Coutinho e Björnberg somente quase um século após, em 1959 (*apud* Ulbrich *et al.* 2002).

A literatura sobre o Maciço Alcalino Poços de Caldas é muito extensa (*e.g.* Ulbrich *et al.* 2005). Dentre os estudos mais recentes, merecem destaque os trabalhos de mapeamento realizados por geólogos da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e o da Nuclebrás. Além dos trabalhos de mapeamento, diversos trabalhos de cunho científico foram realizados por pesquisadores do Brasil e do mundo (*e.g.* Ulbrich & Ulbrich 1992, Schorscher & Shea 1992, Ulbrich *et al.* 2005).

O Maciço Alcalino Poços de Caldas localiza-se na região limítrofe entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais e é a maior ocorrência do gênero no Brasil com cerca de 800 km<sup>2</sup> de exposição. As rochas que afloram no maciço são predominantemente, em ordem de abundância, fonolitos, “tinguaítos” (micro nefelina sienitos) e nefelina sienitos diversos de afinidades miasquíticas, “intermediárias” e agpaíticas, rochas vulcanoclásticas e remanescentes sedimentares (Figura 1-3).

Os nefelina sienitos compreendem um total de 143 km<sup>2</sup> em área de ocorrência. Dentre estes, os denominados “nefelina sienitos da Pedreira” (Ulbrich 1984, ver também Figura 1-3) são os mais expressivos, aflorando em uma faixa contínua na porção central do maciço com uma extensão que alcança 80 km<sup>2</sup>.

As melhores exposições destes nefelina sienitos estão na Pedreira da Prefeitura, situada próxima aos contatos destes com os fonolitos encaixantes no extremo Norte da referida faixa. As rochas aí presentes apresentam mineralogia monótona, constituída essencialmente por feldspato alcalino, nefelina, clinopiroxênio e acessórios diversos (*e.g.* titanita, hainita). Apresentam afinidades miasquíticas ou “intermediárias” e a sua diversidade deve-se principalmente às variações texturais, aos teores de minerais máficos e à presença eventual de um ou outro acessório mais típico. Descrições detalhadas sobre a geologia, petrografia e mineralogia destas rochas são encontradas principalmente em Ulbrich *et al.* (1979), Ulbrich (1983) e Ulbrich (1984).

São estas rochas que tipicamente contêm enclaves microgranulares félsicos e máfico-ultramáficos.



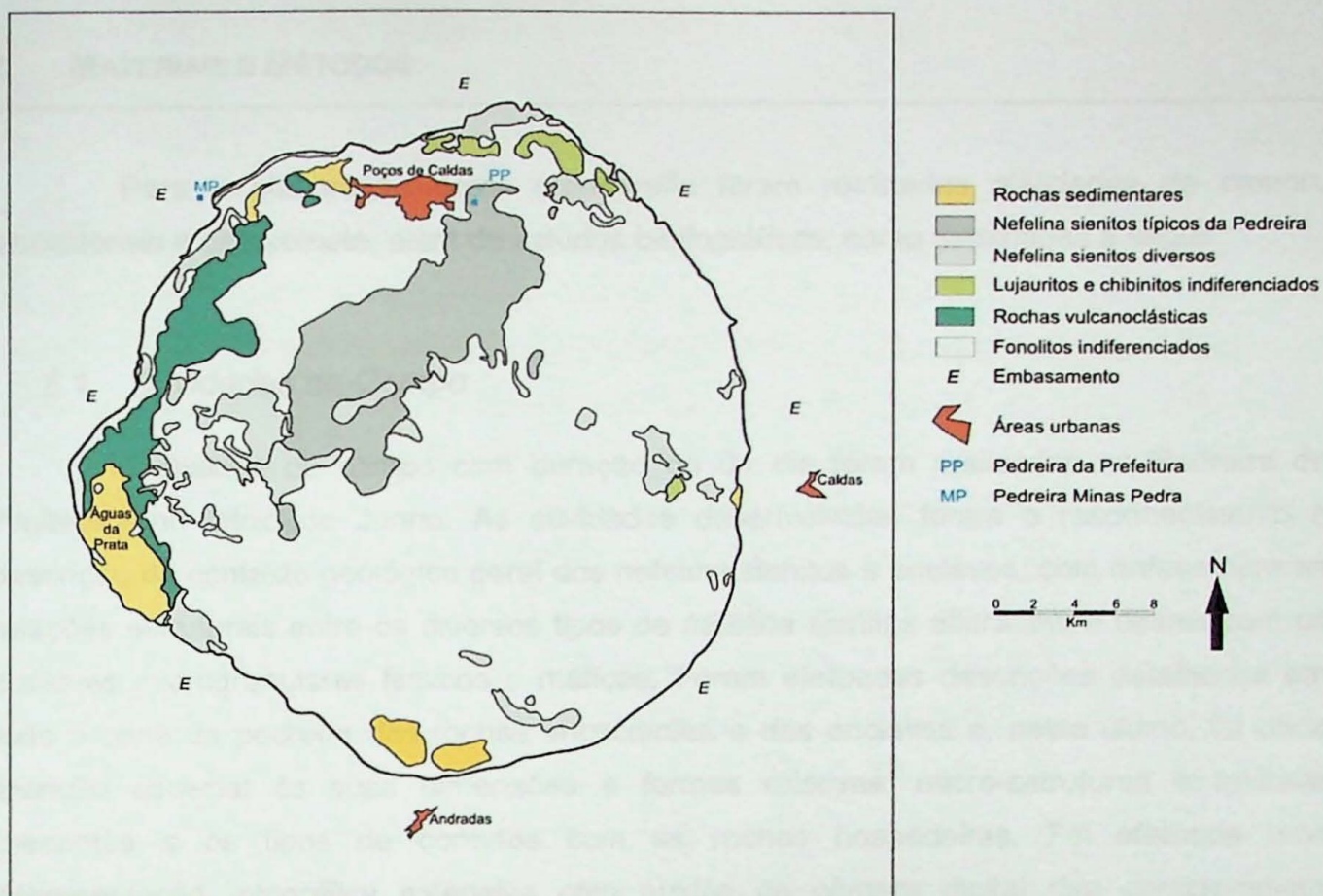


Figura 1-3: Localização da área de estudo no mapa geológico do Maciço Alcalino Poços de Caldas (adaptado de Ulbrich 1984).



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

---

Para a elaboração desta monografia foram realizadas atividades de campo, laboratoriais e de gabinete, além de estudos bibliográficos, como detalhadas a seguir.

### 2.1. *Atividades de Campo*

Trabalhos de campo com duração de 01 dia foram realizados na Pedreira da Prefeitura no início de Junho. As atividades desenvolvidas foram o reconhecimento e descrição do contexto geológico geral dos nefelina sienitos e enclaves, com ênfase para as relações estruturais entre os diversos tipos de nefelina sienitos aflorantes e destes com os enclaves microgranulares félsicos e máficos. Foram efetuadas descrições detalhadas em todo o corte da pedreira das rochas encaixantes e dos enclaves e, neste último, foi dada atenção especial às suas dimensões e formas relativas, micro-estruturas e texturas presentes e os tipos de contatos com as rochas hospedeiras. Foi efetuada uma documentação fotográfica extensiva com auxílio de câmera digital das características geológicas e estruturais e/ou texturais observadas na área da pedreira.

Durante estes trabalhos foram coletadas 25 amostras, distribuídas em 16 locais de amostragem, representativas das principais variedades de nefelina sienitos e dos enclaves microgranulares félsicos e máficos. A localização das amostras é apresentada na Prancha I. As amostras coletadas foram identificadas com o prefixo PPE 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 distingui-las (e.g. PPE-1A, PPE-1B).

### 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 de 03 amostras representativas dos enclaves máficos, da borda fonolítica dos enclaves e do sienito principal encaixante e das rochas hospedeiras, com o objetivo preparatório para a familiarização com a petrografia e mineralogia dos nefelina sienitos e enclaves.

A seguir foi efetuada a seleção de amostras representativas para estudos petrográficos e de química mineral mais detalhados. Dentre as amostras coletadas no campo, foram escolhidas 08, que incluem 04 enclaves máficos, 01 enclave félsico, 01 dique fonolítico e 02 nefelina sienitos mais típicos, para as quais foram obtidas 18 seções delgada-polidas. 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.

### *Petrografia*

As descrições petrográficas e estimativas modais obtidas visualmente das seções delgadas polidas mais típicas foram realizadas no Laboratório de Microscopia Petrográfica do Departamento de Mineralogia e Geotectônica (GMG) do Instituto de Geociências - USP. 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 e/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. Estas gerações foram caracterizadas pelo ângulo de extinção  $z^{\wedge}c$  ( $x^{\wedge}z$  no caso da egirina) medido em cortes paralelos a (010), de máxima birrefringência, e pelas respectivas fórmulas pleocróicas.

Na microscopia sob luz refletida foi dada ênfase especial na separação entre magnetita e ilmenita, os minerais opacos mais comuns nos enclaves.

Durante as etapas de descrição petrográfica, os trabalhos de M. Ulbrich (1983) e H. Ulbrich (1984) foram utilizados como bibliografia principal de suporte, uma vez que estes apresentam e discutem em detalhe dados petrográficos para parte significativa das amostras estudadas.

Posteriormente, para complementar as descrições petrográficas, foram feitas estimativas modais quantitativas utilizando-se o *charriot* acoplado à platina do microscópio *Leitz Wetzlar™*, modelo Ortholux e contador de pontos manual *Clay-Adams™*. Foram computados de 1500 a 3000 pontos por seção, com espaçamento e dimensões da malha adequados para cada tipo litológico (e.g. para os sienitos foram computados 1500 pontos com espaçamento de 1,0 mm e para os enclaves microgranulares máficos 3000 pontos com espaçamento de 0,1 mm). O controle da estatística dos resultados foi realizado com anotações dos resultados a cada 200 a 300 pontos.

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

As características mineralógicas, micro-estruturais 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 megapixels de resolução, acoplada ao microscópio petrográfico *Olympus™* BXP-50.

### *Química Mineral*

As análises das composições químicas de minerais e suas variações foram realizadas no Laboratório de Microsonda Eletrônica do Departamento de Mineralogia e Geotectônica do Instituto de Geociências da USP, com a microsonda *Jeol™* JXA-8600S, equipada com 1 espectrômetro de dispersão de energia (EDS), 5 espectrômetros de dispersão de comprimentos de onda (WDS), cada qual com dois cristais analisadores (STE/TAP, TAP/PET, PET/LiF, PET/LiF, PET/LiF), e sistema de automação da *Noran Instruments™* Voyager 3.6.1. As análises efetuadas incluíram imageamento de elétrons retro-espalhados (BSE) em modo composicional (BEI-Compo), análises químicas pontuais qualitativas com EDS e, finalmente, quantitativas com WDS dos cristais selecionados. As correções para os efeitos de matriz (absorção e número atômico e fluorescência secundária), bem como conversões para óxidos foram efetuadas automaticamente com o programa PROZA, disponível no sistema Noran.

Foram selecionadas seções delgadas polidas de seis amostras entre as descritas petrograficamente para estas análises, compreendendo quatro enclaves máficos e dois nefelina sienitos típicos. Estas seções foram previamente capeadas por uma fina película de carbono (ca. 250 nm) com evaporador *Edwards™* Auto 306. Cerca de oito grãos por seção foram devidamente imageados e analisados, dentre eles clinopiroxênios, opacos, titanita, nefelina e feldspato potássico. Foi dada ênfase ao estudo dos clinopiroxênios, particularmente para definir o seu marcado zonamento composicional.

As imagens eletrônicas BEI-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 micro-estruturas dos grãos (fraturas, alterações, etc.) e aquelas denotam claramente o seu zonamento 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 análises foram feitas nas zonas de núcleo, intermediária e borda dos grãos, visando definir o zonamento composicional presente.

As configurações analíticas empregadas para imagens BSE e análises EDS foram de 15 KeV para a voltagem de aceleração, 20 nA para a corrente e 1 µm de diâmetro para o feixe eletrônico. Nas análises quantitativas por WDS, o diâmetro do feixe eletrônico foi variável, entre 1 e 10 µm, no caso de feldspato alcalino e nefelina. 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 2-1.

Tabela 2-1: Padrões e tempo de contagem dos elementos químicos analisados por WDS.

| Linha           | Cristal | Padrões                        |                                |              |                      | T (s) |
|-----------------|---------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|----------------------|-------|
|                 |         | Piroxênio                      | Opacos                         | Titanita     | Feldspato e Nefelina |       |
| Si K $\alpha$   | TAP     | wollastonita                   | wollastonita                   | wollastonita | microclínio          | 5-20  |
| Ti K $\alpha$   | LiF     | rutilo                         | rutilo                         | rutilo       | rutilo               | 10-30 |
| Al K $\alpha$   | TAP     | hornblenda                     | anortita                       | anortita     | anortita             | 10-20 |
| Fe K $\alpha$   | LiF     | olivina                        | ilmenita                       | olivina      | olivina              | 5-20  |
| Cr K $\alpha$   | LiF     | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ---          | ---                  | 50    |
| Mn K $\alpha$   | LiF     | olivina                        | olivina                        | olivina      | olivina              | 20-30 |
| Mg K $\alpha$   | TAP     | diopsídio                      | diopsídio                      | diopsídio    | diopsídio            | 20-30 |
| Ca K $\alpha$   | PET     | wollastonita                   | wollastonita                   | wollastonita | anortita             | 10    |
| Na K $\alpha$ 1 | TAP     | albita                         | ---                            | albita       | albita               | 5-20  |
| K K $\alpha$    | PET     | microclínio                    | ---                            | ---          | microclínio          | 10    |
| Zn K $\alpha$   | LiF     | ZnO                            | ZnO                            | ---          | ---                  | 50    |
| Zr L $\alpha$   | PET     | zircão                         | ---                            | zircão       | ---                  | 40    |
| Ni K $\alpha$   | LiF     | ---                            | NiO                            | ---          | ---                  | 50    |
| Nb L $\alpha$   | PET     | ---                            | Nb metálico                    | Nb metálico  | ---                  | 40-50 |
| La L $\alpha$   | LiF     | ---                            | ---                            | ree3         | ---                  | 50    |
| Ce L $\alpha$   | LiF     | ---                            | ---                            | ree3         | ---                  | 40    |
| Nd L $\beta$ 1  | LiF     | ---                            | ---                            | ree2         | ---                  | 40    |
| Sm L $\beta$ 1  | LiF     | ---                            | ---                            | ree1         | ---                  | 40    |
| Gd L $\beta$ 1  | LiF     | ---                            | ---                            | ree17        | ---                  | 60    |
| Y L $\alpha$    | PET     | ---                            | ---                            | YAG          | ---                  | 40    |
| Ba L $\alpha$   | LiF     | ---                            | ---                            | ---          | barita               | 50    |
| Sr L $\alpha$   | PET     | ---                            | ---                            | ---          | SrAn                 | 50    |

### 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 BEI-Compo como as ópticas, foram analisadas e tratadas com *softwares* comerciais (CorelDRAW® *Graphics Suite* 12.0 e Adobe™ Photoshop™ 7.0) para ressaltar as características micro-estruturais, texturais e composicionais típicas.



O tratamento dos dados analíticos quantitativos de quimismo mineral (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 e titanita em 4 Si. Para o piroxênio e o opaco foi calculada a partição  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  segundo o método de Droop (1987), considerando a somatória de 4 cátions e 6 O e de 24 cátions e 32 O, respectivamente. A diagramação dos dados para análises dos vetores de substituição cristaloquímica foram efetuados com o programa Minpet® 2.02 (Richard 1997) e posteriormente tratados com *softwares* comerciais.

### 3. RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÕES

---

#### 3.1. *Os nefelina sienitos e os enclaves da Pedreira da Prefeitura*

A Pedreira da Prefeitura, atualmente desativada, situa-se a E da cidade de Poços de Caldas e representa a melhor exposição, da parte setentrional, dos denominados “nefelina sienitos da Pedreira” (Ulbrich 1984). Na sua frente atual estão expostas rochas frescas por uma extensão de aproximadamente 150 m (Prancha I e II). Os nefelina sienitos que aí afloram apresentam, em geral, estrutura maciça - mas localmente se observa alguma orientação de fluxo, salientada por cristais de feldspato potássico tabulares - textura inequigranular e são constituídos por feldspato potássico, nefelina e piroxênio. Este último aparece intersticial e geralmente associado a outros minerais máficos. O Índice de Cor das rochas predominantes raramente ultrapassa 12 %.

Estes nefelina sienitos podem ser reunidos em duas fácies petrográficas principais (Prancha I). A nordeste da pedreira afloram nefelina sienitos de granulações média a grossa ou grossa com tonalidades cinzentas claras enquanto que mais a sudoeste predominam nefelina sienitos de granulações fina a média ou média, com tonalidades cinzas mais escuras.

Os nefelina sienitos de granulações mais grossas apresentam em geral textura inequigranular e tipicamente foiaítica, mostrando cristais maiores (0,5 – 1,5 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 com tonalidades verde-escuras, formada por cristais em geral prismáticos, isolados, e outra com tonalidades verde-claras e tipicamente formando agregados fibrosos ou fibro-radiados intersticiais), titanita e hainita. A titanita aparece com hábito típico, baixa transparência com tons marrons, enquanto a hainita, em geral tipicamente intersticial, é



denunciada pela transparência e tonalidades em amarelo-ocre vivo. A presença de magnetita pode ser inferida com imã.

Esta fácies possui aspecto tipicamente “manchado”, com porções acinzentadas mais claras ou mais escuras. Estas manchas podem estar relacionadas à maior concentração de minerais máficos, na forma de glomérulos ou micro-enclaves com dimensões milimétricas (ver Foto A da Prancha II, F da Prancha III/ Anexo I); ou ainda, relacionadas à coloração do feldspato potássico, ora acinzentado, ora esbranquiçado.

Um dique de composição fonolítica e aspecto “aplítico”, microgranular, de contato brusco, irregular, ocorre na fácies grosseira (Foto A da Prancha I/ Anexo I). É interessante notar que fragmentos rompidos, angulosos ou sub-arredondados deste dique são englobados pela rocha hospedeira, sugerindo que a sua colocação se deu quando esta ainda tinha capacidade de movimentação, uma característica típica dos denominados diques sin-plutônicos.

Os nefelina sienitos de granulações mais finas são inequigranulares, localmente porfiríticos, com cristais maiores (até 0,8 cm) de feldspato alcalino tabular. A textura foiaítica está ausente. Macroscopicamente podem também ser reconhecidos feldspato alcalino, nefelina, duas gerações de piroxênio, os prismáticos e os fibro-radiados, hainita, titanita e magnetita. Embora não seja tão típico como no caso da variedade anterior, estas fácies também apresentam aspecto “manchado”, particularmente junto as zonas mais ricas em enclaves microgranulares máfico-ultramáficos.

Venulações e bolsões micropegmatíticos, constituídos principalmente por feldspato potássico tabular e egirina prismática a fibro-radiada, ocorrem com certa frequência neste nefelina sienito. Apresentam extensões centimétricas a decimétricas e espessuras milimétricas a centimétricas e são caracterizados pela forma irregular, sinuosa, indicando que a rocha encaixante ainda tinha capacidade de movimentação plástica (Prancha I, Foto C/ Anexo I). Localmente estas venulações apresentam cavidades miarolíticas preenchidas por minerais hidrotermais, especialmente zeólitas.

O contato entre as duas variedades principais de nefelina sienitos é brusco em detalhe, mas irregular em escala mesoscópica e por vezes de forma sinuosa. São comuns transições rápidas de uma fácies para a outra na zona de contato entre ambos. Fragmentos arredondados do sienito de granulação mais fina podem estar englobados pelo de granulação mais grossa. (Prancha I, Foto B e F/ Anexo I).

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



### 3.1.1. *Enclaves Microgranulares*

De forma geral, os enclaves microgranulares félsicos, fonolíticos, são mais abundantes do que os máficos e podem ser encontrados nas duas variedades de sienitos, porém são sempre mais comuns na fácies de granulação grossa (Prancha I, Foto D/ Anexo I). Os enclaves máfico-ultramáficos, por sua vez, são comuns em algumas zonas da fácies de granulação mais fina e relativamente raros na variedade mais grossa.

Os enclaves félsicos têm cor cinza esverdeada, formas arredondadas a ovaladas e apresentam dimensões desde centimétricas (mais comuns com ca. 4,0 cm) a decimétricas. A textura é equigranular a levemente inequigranular e a granulometria varia desde fina-média até muito fina ou mesmo afanítica. Nos espécimes com granulação mais desenvolvida podem ser observados feldspato potássico, nefelina e piroxênio.

Uma característica importante observada em alguns enclaves é uma marcada zonalidade, observando-se uma gradação de granulometria desde fina a muito fina no núcleo até média nas bordas, junto aos contatos com o nefelina sienito hospedeiro (ver também Ulbrich 1984).

Os enclaves máfico-ultramáficos são comparativamente menos comuns e ocorrem em geral nos nefelina sienitos mais finos. Estão distribuídos de forma bem irregular: existe uma concentração significativa nas zonas próximas aos contatos com os nefelina sienitos mais grossos, mas são ocasionalmente encontrados também ao longo de toda a frente da pedreira em que afloram os nefelina sienitos mais finos (Prancha II, Foto B, C, E e F/ Anexo I). Apresentam em geral coloração preto-esverdeada a verde-escura.

Macroscopicamente podem ser reconhecidos dois tipos mais contrastados, denominados por conveniência de Tipo I e Tipo II respectivamente.

O Tipo I, mais comum, apresenta caracteristicamente textura com aspecto “porfirítico” definida por macrocristais prismáticos de piroxênio, de tonalidades preto-amarronzadas e dimensões entre 0,2 a 1,0 cm, imersos em uma matriz escura fanerítica muito fina a afanítica (Prancha II, Foto B/ Anexo I). O Tipo II, de ocorrência bem mais restrita na pedreira, não contém macrocristais e a textura é tipicamente equigranular, com granulação fanerítica fina, sempre maior que a da matriz do Tipo I (Prancha II, Foto E/ Anexo I).

Ambos os tipos de enclaves apresentam dimensões variáveis, com diâmetros médios desde milimétricos até cerca de 5,0 cm, mais comumente em torno de 2,5 cm. As formas variam de angulosas a pouco arredondadas. Os enclaves hospedados no nefelina sienito de granulação mais grossa em geral apresentam formas mais arredondadas e tipicamente 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 (Prancha I, Foto E/ Anexo I), que resulta em um aspecto geral muito similar ao descrito em literatura para os denominados “enclave duplos”. Os enclaves



inseridos no nefelina sienito de granulação menor por sua vez, não apresentam bordas bem definidas ou estas são de pouca expressão, com espessuras milimétricas apenas (Prancha II, Foto B e C/ Anexo I).

Localmente, alguns enclaves apresentam-se disruptos e com finas venulações fonolíticas; os contatos com as encaixantes ora são retos, ora são mais curvilíneos, 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 (Prancha II, Foto F/ Anexo I).

### 3.2. Petrografia

Apresentam-se a seguir descrições mais pormenorizadas ao microscópio petrográfico para as duas fácies de nefelina sienitos diferenciadas e dos enclaves microgranulares félsicos e máfico-ultramáficos. Dados modais típicos, obtidos por contagem de grãos com *charriot*, são apresentados na Tabela 3-1.

#### 3.2.1. Nefelina sienitos de granulação médio-grossa a grossa

Ao microscópio petrográfico, a trama inequigranular foiaítica destas variedades fica muito bem caracterizada, observando-se a nefelina e os minerais máficos intersticiais aos cristais maiores tabulares de feldspato potássico orientados ao acaso. Os minerais máficos somam cerca de 12 % em volume modal e correspondem essencialmente a clinopiroxênio, acompanhado por quantidades menores hainita, titanita e magnetita. Zeólitas e cancrinita são típicos minerais secundários, de alteração.

O feldspato potássico, com dimensões médias até 1,5 cm, é o mineral félsico dominante. Apresenta hábito tabular a placóide idiomórfico a subidiomórfico e forma o arcabouço da textura foiaítica. Apresenta tipicamente geminação de Carlsbad e com frequência aparece com aspecto manchado ou turvo, dado possivelmente por alteração para argilo-minerais.

Nefelina é, em geral, mais límpida e forma agregados de grãos menores, em torno de 0,4 mm. É idiomórfica a subidiomórfica e aparece tipicamente com seções sub-hexagonais, quadráticas ou retangulares, sempre intersticiais ao feldspato potássico. Pode estar substituída parcial ou totalmente por cancrinita.

Clinopiroxênio é o mineral máfico típico destas rochas. Duas gerações texturais contrastadas, já parcialmente identificadas em amostras de mão, podem ser individualizadas.

A primeira geração é formada por cristais prismático subidiomórficos, com dimensões entre 0,3 e 2,8 mm, mais comumente em torno de 1,0 mm. Esta geração



apresenta zonamento composicional muito bem marcado, observando-se que os núcleos dos cristais apresentam tonalidades rosadas pálidas a incolores, com pleocroísmo apenas incipiente, que passam de forma ora mais abrupta, ora mais suave para bordas fortemente pleocróicas com X: verde-oliva, Y: verde-oliva levemente amarelado e Z: verde-oliva amarelo. Nos núcleos desta geração são encontradas abundantes inclusões diminutas, aciculares, em geral distribuídas de forma regular ao longo de planos cristalinos e formadas possivelmente por exsolução de rutilo (Prancha III, Foto B/ Anexo I). As bordas verde oliva apresentam-se tipicamente xenomórficas e intersticiais a nefelina, ou com inclusões desta, caracterizando seu aspecto poiquilítico (Prancha III, Foto B e D/ Anexo I). Nas zonas verde-oliva dos cristais maiores zonados é muito comum a presença de inclusões diminutas idiomórficas a subidiomórficas de magnetita, identificada sob luz refletida. Este clinopiroxênio aparece por vezes como cristais isolados, mas tipicamente constitui aglomerados de alguns cristais aos quais se associam titanita e magnetita (Prancha III, Foto C/ Anexo I).

A segunda geração, de cristalização tardia, apresenta características ópticas da egrina (ver Tabela 3-2) 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, que aparecem mais freqüentemente formando agregados fibrorradiados. Apresenta forte pleocroísmo, similar ao observado nas bordas dos cristais da primeira geração, mas com tons verde-oliva mais intensos. Estes agregados em geral ocupam interstícios formados pelos grandes cristais de feldspato potássico e também entre cristais de nefelina, indicando cristalização relativamente tardia (Prancha III, Foto A/ Anexo I). Aparecem também formando sobrecrecimentos nos cristais da primeira geração e na magnetita.

Entre os acessórios, a titanita (0,2 e 0,8 mm), subidiomórfica a idiomórfica apresenta pleocroísmo marcado (X: quase incolor a rosa pálido; Y: levemente róseo-amarelado; Z: rósea amarronzada). Aparece como cristais isolados ou associados ao clinopiroxênio da primeira geração e aos minerais opacos. Magnetita (0,08 e 0,6 mm) é o mineral opaco predominante na rocha. Subidiomórfica a xenomórfica, aparece em geral associada ao clinopiroxênio e à 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. Foi reconhecida pelo seu caráter incolor, relevo alto, e cores de interferência azuladas anômalas nos cortes de baixa birrefringência. É subidiomórfica a idiomórfica e forma cristais prismáticos que alcançam 1,2 mm, distribuídos intersticialmente aos minerais félsicos.







Tabela 3-1: Análises modais (% em volume), obtidas por contagem de grãos, de amostras típicas dos enclaves microgranulares e dos nefelina sienitos encaixantes da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas (tr = traços; FA = Feldspato Alcalino; Nef = Nefelina).

| Contexto<br><br>Mineral   |             | Enclaves microgranulares |         |         | Rocha hospedeira   |                  |
|---------------------------|-------------|--------------------------|---------|---------|--------------------|------------------|
|                           |             | Máficos                  |         | Félsico | NeS médio a grosso | NeS médio a fino |
|                           |             | Tipo I                   | Tipo II |         |                    |                  |
| Clinopiroxênio prismático | verde-oliva | 45-51                    | 62,4    | 11,2    | 5,7                | 7,1              |
|                           | róseo       | 11-8                     | ---     | ---     | tr                 | tr               |
|                           | incolor     | 1                        | ---     | ---     | tr                 | tr               |
| Clinopiroxênio fibroso    |             | ---                      | ---     | ---     | 3,8                | 9                |
| Feldspato potássico       |             | 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               | 21,9             |
| Razão FA/Nef              |             | ---                      | ---     | 1,9     | 1,9                | 2,2              |



### 3.2.2. *Nefelina sienitos de granulação fina a fina-média*

Esta variedade é muito semelhante do ponto de vista mineralógico aos nefelina sienitos de granulações mais grossas (ver Tabela 3-1). A diferença essencial está na granulometria, mais reduzida, e no arranjo textural, particularmente dos minerais félsicos. De fato, não se observa a típica textura foiaítica; o feldspato alcalino não constitui malhas e apresenta-se fortemente poiquilítico, contendo número elevado de inclusões de cristais de nefelina mais diminutos.

Nestas variedades, o feldspato potássico (0,4 a 2,5 mm, mais comumente em torno de 1,2 mm) apresenta hábito tabular a prismático e comparativamente é algo mais límpido e mais subidiomórfico, faltando cristais tipicamente idiomórficos. A geminação simples de Carlsbad é freqüente. O aspecto textural que mais se destaca é o mencionado caráter poiquilítico, dado por inclusões, em geral idiomórficas e límpidas de nefelina com dimensões da ordem de 0,08 mm (Prancha III, Foto E/ Anexo I).

A nefelina, subidiomórfica a idiomórfica, apresenta dimensões entre 0,02 e 0,2 mm (mais comumente em torno de 0,1 mm), e hábito típico. Aparece como cristais isolados ou em grupos de vários cristais. De dimensões mais diminutas, forma as inclusões no feldspato. Pode estar parcialmente alterada para cancrinita.

Clinopiroxênio também aparece formando duas gerações texturais distintas, com características ópticas e texturais similares às descritas para os nefelinas sienitos de granulações mais grossas. A primeira, xeno- a subidiomórfica, prismática, forma cristais com dimensões entre 0,12 e 2,4 mm (mais comumente em torno de 0,8 mm). Como no caso anterior apresenta zonamento bem marcado, com núcleos pouco pleocróicos e bordas mais ou menos irregulares e de espessuras variadas com pleocroísmo forte em tons de verde; estas bordas também apresentam localmente aspecto poiquilítico dado principalmente por inclusões diminutas de magnetita. A segunda é idiomórfica, constituída tipicamente por egrina, e forma cristais e/ou agregados fibro-radiados com dimensões em torno de 0,2 mm; ocorre sempre intersticialmente ou formando sobrecrecimentos.

Titanita (ca. 0.2 mm) é subidiomórfica a idiomórfica e apresenta pleocroísmo bem marcado como nas variedades de granulações mais grossas. Um aspecto digno de nota é que nestas variedades, os cristais de titanita parecem a miúdo poiquilíticos, contendo elevado número de inclusões subidiomórficas a idiomórficas, diminutas, especialmente de fases minerais incolores de difícil identificação ao microscópio (nefelina?, apatita?). A magnetita (0,04 - 0,6 mm, mais comumente em torno de 0,2 mm) é tipicamente xenomórfica, apresentando por vezes bordas corroídas. Associa-se ao clinopiroxênio, inclusa na zona verde-oliva da geração prismática, quando isolada pode estar também bordejada por egrina fibrorradiada.



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

Zeólitas e alguma cancrinita complementam, como minerais secundários, a mineralogia destas rochas.

### 3.2.3. *Enclaves microgranulares félsicos*

Ao microscópio petrográfico, os enclaves félsicos são muito similares, do ponto de vista mineralógico e textural, aos nefelina sienitos de granulações fina a fina-média descritos acima. A diferença mais marcante está na granulação fina a muito fina e na presença relativamente freqüente de pequenos glomérulos máficos de coloração esverdeada que se destacam mesmo no exame macroscópico. No caso dos enclaves zonados, a diferença essencial, entre os núcleos mais finos e as bordas algo mais grossas, está aparentemente apenas na granulação.

A textura é inequigranular (os feldspatos apresentando, em média, maiores dimensões) de granulação fina a muito fina. O caráter poiquilítico do feldspato potássico, dado por inclusões de nefelina, é também uma característica marcante destes enclaves.

O feldspato potássico (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. Contém abundantes inclusões (ca. 0,07 mm) de nefelina. 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, parcialmente corroídas.

Duas gerações de piroxênio são reconhecidas, a exemplo das variedades descritas anteriormente, com características ópticas e texturais muito similares. A primeira geração, composicionalmente zonada, apresenta dimensões entre 0,05 e 0,7 mm (mais comumente em torno de 0,2 mm); a geração tardia, forma agregados fibro-radiados com dimensões entre 0,02 e 0,1 mm (mais comumente em torno de 0,08 mm), de hábito fibrorradiado. Os glomérulos máficos são formados essencialmente pelo piroxênio de primeira geração, acompanhado de titanita e magnetita. Titanita subidiomórfica a idiomórfica (0,06 – 1,0 mm), magnetita xenomórfica (ca. 0,1 mm) e hainita xenomórfica (<0,4mm) apresenta característica muito similar à descrita anteriormente.



Tabela 3-2: Ângulo de extinção dos clinopiroxênios ( $x^{\wedge}c$  na variedade fibrosa,  $z^{\wedge}c$  nas demais variedades) de enclaves microgranulares e rochas hospedeiras da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.

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



#### 3.2.4. Enclaves microgranulares máfico-ultramáficos

As descrições petrográficas microscópicas dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos revelaram que os espécimes amostrados não alcançam teores médios superiores a 80% (em volume) de minerais máficos (ver Tabela 3-1). Porém devido a heterogeneidades o Índice de Cor varia muito, denotando valores entre composições máficas e ultramáficas.

Os enclaves máfico-ultramáficos de Tipo I são constituídos principalmente por clinopiroxênio, feldspato potássico, nefelina, minerais opacos e titanita; como minerais acessórios aparecem apatita, flogopita, algum carbonato e hainita (ver Tabela 3-1).

Ao microscópio petrográfico estes enclaves apresentam textura inequigranular de aspecto “porfirítico” definido pela presença de macrocristais de piroxênio que atingem ca. 1,0 cm em uma matriz fina a muito fina, heterogênea, contendo micro-venulações e ou bolsões irregulares com diâmetros que alcançam 1,0 mm (Prancha IV, Foto A/ Anexo I). Nestas regiões se concentram, preferencialmente, feldspato potássico e nefelina, inclusões aciculares de apatita são abundantes e pode ocorrer a hainita. Em outras regiões aparecem concentrações de minerais opacos diminutos, que chegam a constituir 15 % em volume. Os macrocristais encontram-se, em geral, distribuídos regularmente nos enclaves; em alguns deles nota-se uma tendência de orientação nas zonas mais próximas ao contato com o sienito hospedeiro, acompanhando em geral o desenho do contato.

O clinopiroxênio é o principal mineral presente nos enclaves analisados. Três gerações de clinopiroxênio podem ser opticamente distintas: variedades com tonalidades rosadas, levemente pleocróicas e variedades incolores aparecem nos macrocristais, variedades em tons de verde oliva predominam na matriz dos enclaves (Prancha IV, Foto C/ Anexo I e ver também Tabela 3-2), ocorrendo também como bordas nos macrocristais. Não aparecem piroxênios egirínicos fibro-radiados nos enclaves.

Os macrocristais de clinopiroxênio com tonalidades rosadas são os mais comuns. São subidiomórficos a idiomórficos, prismáticos, com geminações simples ou lamelares, e apresentam dimensões entre 0,6 mm e 1,0 cm (em geral em torno de 1,2 mm). O pleocroísmo é fraco, mas distinto, com X: róseo-pálido, levemente amarelado, Y: róseo pálido, Z: róseo pálido, acastanhado. Apresentam fino zonamento composicional nas zonas intermediárias ou externas dos cristais, que acompanham faces de crescimento (Prancha IV, Foto E/ Anexo I) e, com frequência contêm inclusões aciculares de rutilo, possivelmente geradas por exsolução, que por vezes se concentram em zonas que acompanham os contornos cristalinos do grão, sempre mais comuns nas regiões intermediária ou externa deste. Esta geração pode apresentar localmente extinção setorial e anômala, em tonalidades de azul *jeans* (Prancha IV, Foto E/ Anexo I), e forte dispersão dos eixos ópticos observada em figuras de interferência, características das “titano-augitas”. Inclusões de minerais opacos, especialmente magnetita, são relativamente comuns. A geração incolor,



sem extinção anômala, é menos comum. Aparece como raros cristais isolados ou formando zonas de núcleo mais ou menos irregulares, com contatos bruscos, nos macrocristais de "titano-augita" (Prancha IV, Foto C/ Anexo I).

Uma característica típica de ambos os macrocristais rosados e incolores é presença de texturas de corrosão marginal e substituição por uma geração posterior de piroxênio verde-oliva pleocróico (X: verde-oliva pálido, Y: verde-oliva levemente amarelado e Z: verde-oliva amarelado), similar ao piroxênio predominante na matriz dos enclaves (ver a seguir). Estas texturas são sempre melhor marcadas quando estes cristais estão na borda do enclave, junto aos contatos com o sienito hospedeiro (Prancha IV, Foto F/ Anexo I). Estas bordas de piroxênio verde, com contornos xenomórficos, apresentam espessuras variáveis entre 0,04 e 0,4 mm e geralmente são caracterizadas pela presença de elevado número de inclusões diminutas de opacos (principalmente magnetita) e titanita. São muito semelhantes às bordas descritas para os piroxênios de primeira geração dos nefelina sienitos.

O clinopiroxênio verde-oliva, que substitui parcialmente os macrocristais, é o piroxênio típico na matriz dos enclaves, em que aparece xeno- a subidiomórfico, raras vezes idiomórfico, com dimensões entre 0,001 e 0,5 mm e de hábito prismático. Possui pleocroísmo bem marcado (X: verde-oliva pálido, Y: verde-oliva amarelado, Z: verde-oliva amarelo a amarelo esverdeado), e apresenta zonamento composicional leve gradando de tons mais claros para mais intensos de verde-oliva, do centro para a borda respectivamente. Quando em contato com o sienito encaixante, apresenta tons verde-oliva mais escuros, mostra zonamento mais pronunciado e uma maior tendência ao idiomorfismo (Prancha IV, Foto D/ Anexo I). Associa-se com magnetita e titanita, que também aparecem como inclusões comuns e, por vezes, sobrecresce magnetita.

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

Titanita ocorre xeno- a idiomórfica, de granulometria entre 0,02 e 0,2 mm, e hábito navicular. Possui pleocroísmo bem marcado, semelhante ao descrito para os sienitos. Quando idiomórfica pode apresentar-se poiquilítica, com inclusões abundantes de minerais félsicos. Às vezes aparece como bordas de substituição em magnetita. A magnetita (0,02 e 0,6 mm) é subidiomórfica a xenomórfica. Associa-se ao piroxênio verde, dispersos na matriz, inclusos nas bordas verdes dos megacristais, e à titanita, bordejados por esta. Flogopita é mais rara, aparece geralmente xenomórfica, associada à magnetita, com distribuição irregular. Apresenta pleocroísmo normal em tons de laranja a amarelo alaranjado. Apatita, além de inclusa nos félsicos como acículas, ocorre também como



cristais prismáticos dispersos, associados ao piroxênio. É rica em inclusões fluídas, geralmente orientadas paralelamente ao eixo cristalográfico  $c$ .

Uma característica interessante de alguns destes enclaves é a presença de pseudomorfos de macrocristais de piroxênio constituídos por uma associação mineralógica peculiar, mostrando clinopiroxênio verde-pálido, flogopita, carbonato, magnetita e zeólitas, distribuídos em um arranjo zonal, contendo por sua vez clinopiroxênio rosado idiomórfico (Prancha IV, Foto G/ Anexo I).

As bordas mais finas e mais escuras, observadas em alguns destes enclaves (e.g. Prancha II, Foto F/ Anexo I), além da granulometria menor, apresentam maior abundância relativa de clinopiroxênio verde e minerais opacos.

Os enclaves máfico-ultramáficos de Tipo II, ao contrário dos anteriores, são muito homogêneos. São tipicamente equigranulares com granulação fina, entre 0,2 e 0,7 mm (em geral ao redor de 0,4 mm). A mineralogia é caracterizada por clinopiroxênio e feldspato potássico como minerais essenciais, distribuídos regularmente, e apatita, magnetita, titanita e flogopita como principais fases acessórias. Uma característica interessante é o fato de não possuírem nefelina, como nos enclaves Tipo I. Apenas uma geração de clinopiroxênio, com tonalidades verde-oliva, está presente. Os minerais essenciais definem uma textura em “mosaico”, mostrando contatos inter-grãos ora lineares, ora curvilineares ou em cúspides suaves ou mesmo suturados, sugerindo fenômenos de recristalização (Prancha IV, Foto B/ Anexo I).

O clinopiroxênio é xenomórfico a subidiomórfico a apresenta pleocroísmo com X: verde-pálido, Y: verde-pálido levemente amarronzado e Z: verde-pálido amarelado, similar ao descrito para o piroxênio verde dos enclaves de Tipo I. Apresenta leve zoneamento, as bordas mostrando em geral tonalidades mais escuras, mas alguns cristais que ocorrem junto ao contato com o sienito hospedeiro mostram zoneamento mais marcado (Prancha IV, Foto H/ Anexo I). Em geral aparece límpido ou com algumas inclusões de titanita, flogopita e magnetita, mais comuns nas bordas dos cristais.

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

Nas proximidades dos contatos entre o enclave e a encaixante, observa-se uma zona de granulação mais fina, com maior concentração de pequenos grãos xenomórficos (em torno de 0,01 mm) do clinopiroxênio verde (Prancha IV, Foto H/ Anexo I), que lembra em parte a matriz dos enclaves de Tipo I.



### 3.3. *Quimismo Mineral*

Neste item serão apresentados e discutidos os dados obtidos a partir das análises por microsonda eletrônica dos principais minerais máficos (piroxênio, titanita e opacos) e dos félsicos (nefelina e feldspato alcalino) das diferentes fácies dos nefelina sienitos e dos dois tipos de enclaves microgranulares máficos. A simbologia utilizada foi padronizada, como mostra a Tabela 3-3, para todos os diagramas apresentados a seguir.

Tabela 3-3: Simbologia adotada para os diagramas das amostras analisadas no item 3.3.

| Símbolo                                                                             | Amostra | Litologia                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------|
|    | PPE-8A  | Nefelina sienito médio-grosso a grosso |
|    | PPE-6b  | Nefelina sienito médio-fino a fino     |
|    | PPE-7Aa | Enclave Tipo I                         |
|   | PPE-1Bg | Enclave Tipo I                         |
|  | PC-19   | Enclave Tipo I                         |
|  | PPE-5Bb | Enclave Tipo II                        |

#### 3.3.1. *Piroxênio*

O piroxênio é um dos minerais máficos mais importantes e comuns em rochas ígneas. Sua estrutura é formada por cadeias simples de tetraedros de  $\text{SiO}_4$ , 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,  $\text{Fe}^{2+}$ , Mn, Li, Ca e Na), o M1 compreende cátions de coordenação octaédrica regular (como Al,  $\text{Fe}^{3+}$ , Ti, Cr, V, Zr, Sc, Zn, Mg,  $\text{Fe}^{2+}$  e Mn) e T compreende cátions de coordenação tetraédrica (Si, Al e  $\text{Fe}^{3+}$ ). 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 ou sódicas, o que permite que sejam plotados no diagrama Q-J (ver Figura 3-1) e posteriormente classificados no diagrama Quad ou no Jd-WF-Eg. Os resultados analíticos representativos destes piroxênios estão apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3/ Anexo II.



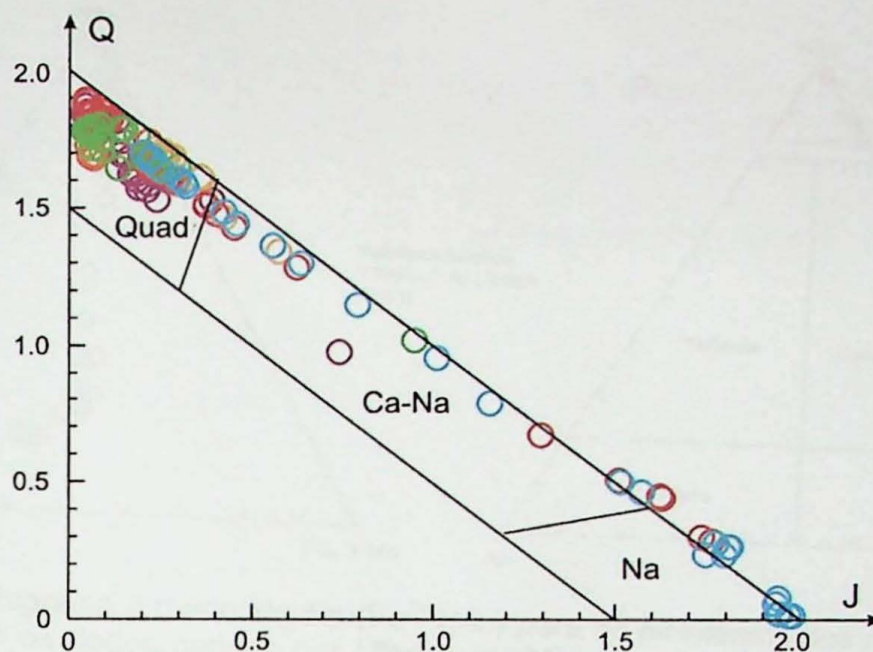


Figura 3-1: Diagrama Q-J ( $Q = Ca + Mg + Fe^{2+}$  e  $J = 2Na$ ) para clinopiroxênios dos nefelina sienitos e enclaves da Pedreira da Prefeitura, classificando-os em variedades Quad, cálcico-sódicas e sódicas.

### *Nefelina Sienitos*

Os nefelina sienitos possuem duas gerações texturais distintas de piroxênios, uma prismática, outra fibrosa, ambas verdes (ver item 3.2). 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. Estes dados evidenciam a evolução da cristalização dos piroxênios destas rochas, de diopsídio (mais incolor), egirina-augita, até egirinas quase puras (verde-forte). Dados semelhantes a estes foram obtidos por Ulbrich (1983) em sua Tese de Doutorado, porém como se observa na Figura 3-2 a autora não obteve composições tão extremas em Mg e Na.



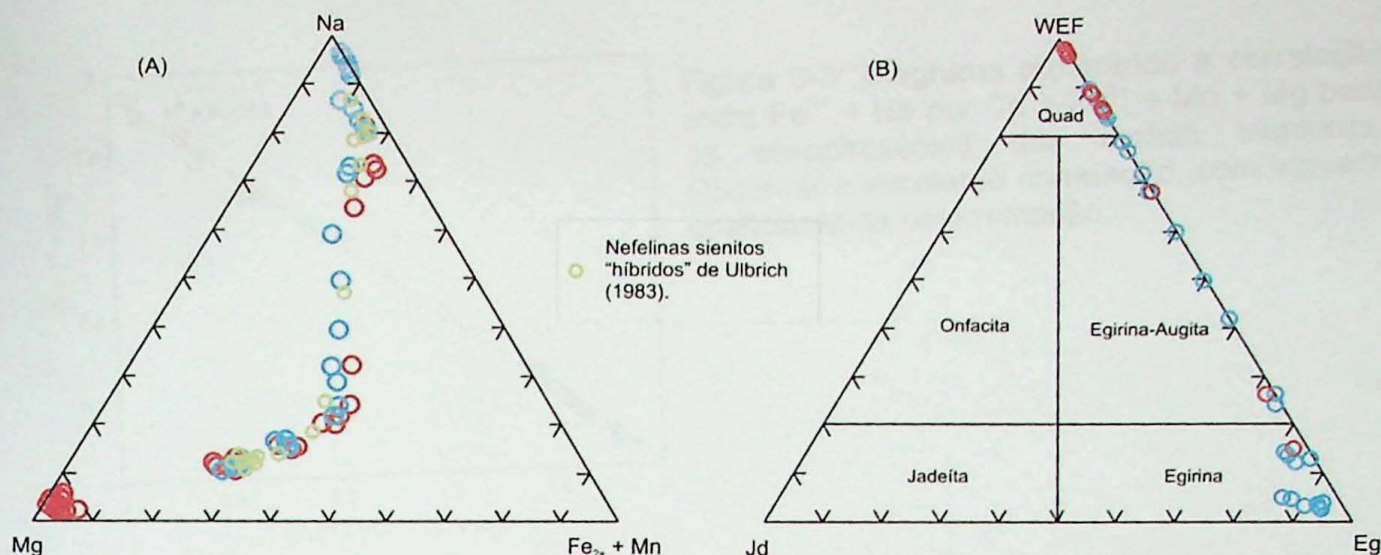


Figura 3-2: (A) Diagrama ternário Mg-Na-(Fe<sup>2+</sup>+Mn) para os piroxênios dos nefelina sienitos, comparados com os dados obtidos por Ulbrich (1983) para os nefelina sienitos "híbridos" (nomenclatura dada pela autora para o conjunto de rochas a qual pertence os sienitos aqui estudados). (B) Composição catiônica dos piroxênios dos nefelina sienitos através do diagrama ternário WEF-Jd-Eg.

Os extremos magnesianos, no diagrama da Figura 3-2, são correspondentes aos núcleos rosados/incolores dos piroxênios prismáticos, e classificados como diopsídios. Estes núcleos de coloração mais fraca apresentam índice mg# [ $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ ] em torno de 0,7 e pode chegar a 1,0 no caso dos mais incolores. Os termos mais egrínicos, da borda do piroxênio prismático e do fibroso, têm 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.

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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3,4-0,7%), com o conseqüente aumento de Na<sub>2</sub>O (0,3-11,7%), Fe<sub>3</sub>O<sub>2</sub><sup>c</sup> (calculado, 3,6-24,1%) e ZrO<sub>2</sub> (0-0,9%). O Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 TiO<sub>2</sub> e o ZrO<sub>2</sub> têm sua maior concentração nas bordas destes cristais, zona de maior pleocroísmo.

De uma maneira geral o piroxênio da fácies mais grosseira 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<sup>2+</sup>, Mn e Mg (M2) por Fe<sup>3+</sup> (M1) e Na (M2), com correlação quase perfeita (ver Figura 3-3).

A cor verde-forte destes piroxênios provavelmente está associada ao alto teor de Fe<sup>3+</sup>.



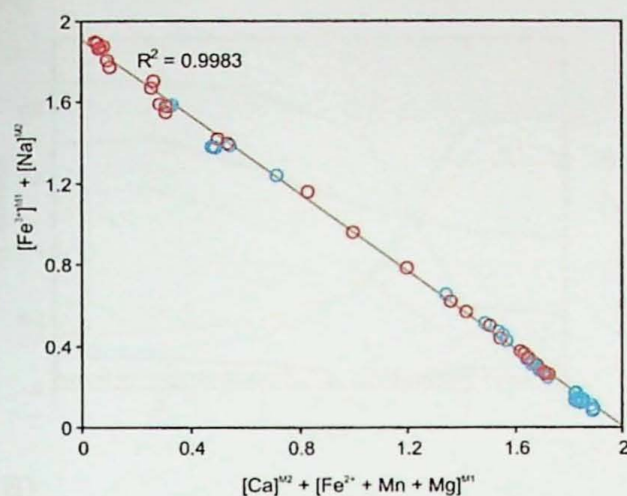
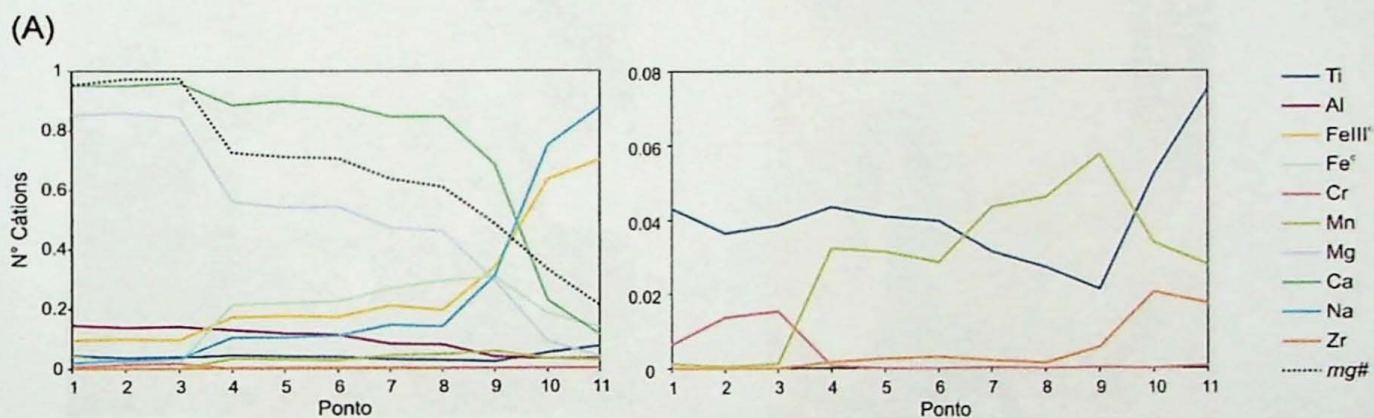
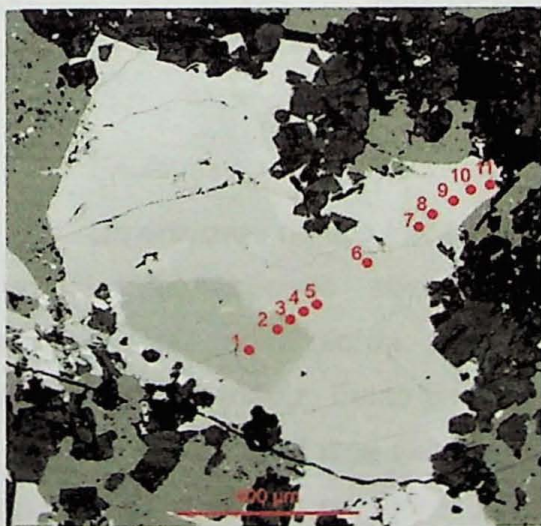


Figura 3-3: Diagrama mostrando a correlação entre  $Fe^{3+} + Na$  por  $Ca + Fe^{2+} + Mn + Mg$  para os clinopiroxênios das rochas sieníticas. Observar a excelente correlação, com elevado coeficiente de determinação.



(B)



(C)

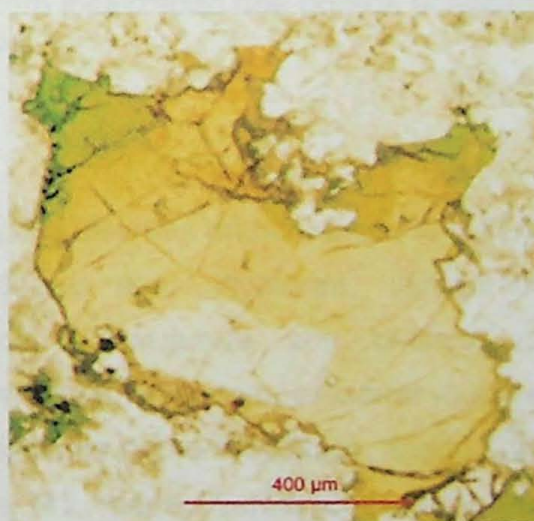


Figura 3-4: (A) Diagramas mostrando a variação de número de cátions por cela unitária (cpfu) por ponto do perfil núcleo-borda do clinopiroxênio da amostra PPE-6b, nefelina sienito médio-fino a fino. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados no cristal. (C) Fotomicrografia, com luz plano-polarizada.



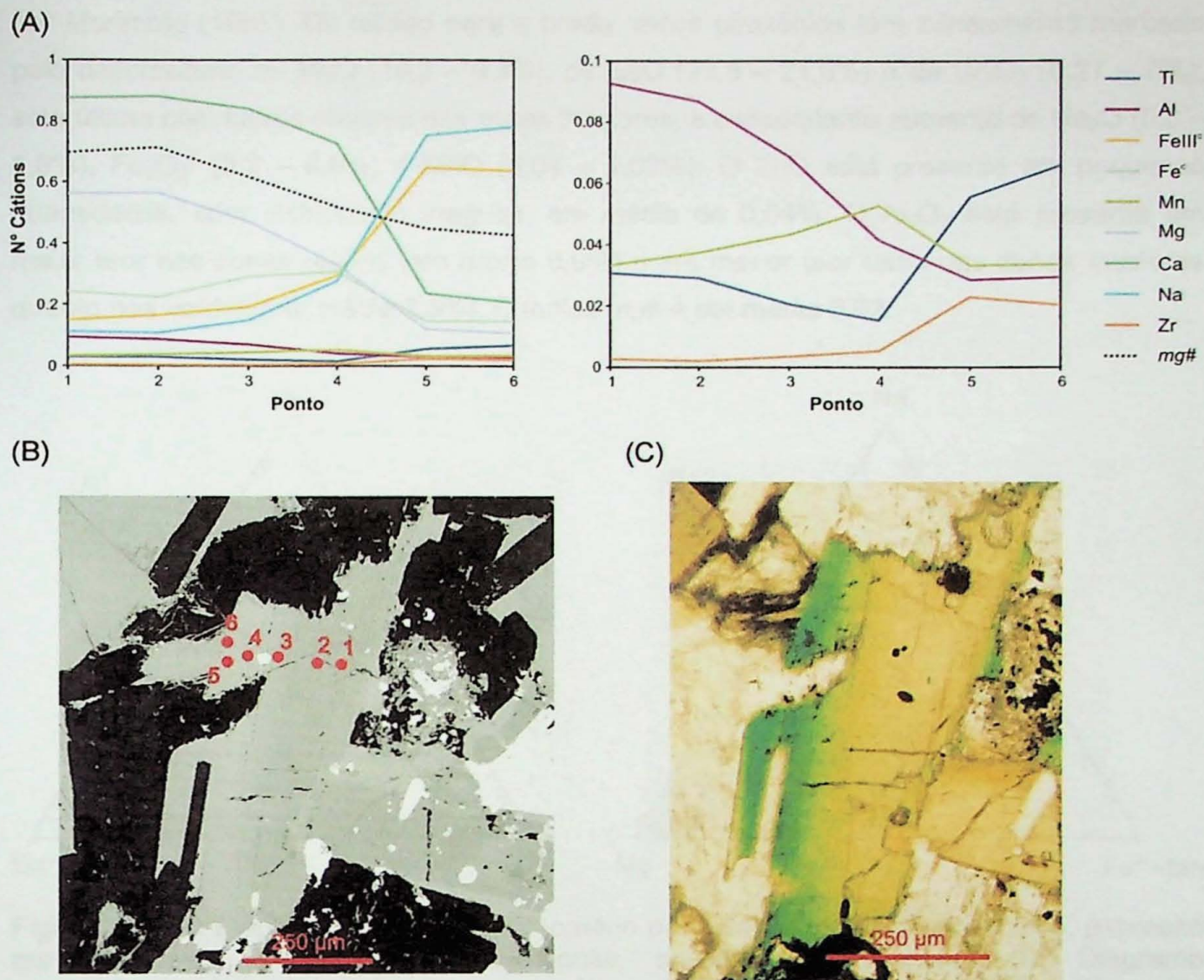


Figura 3-5: (A) Diagramas mostrando a variação de número de cátions por cela unitária (cpfu) por ponto do perfil núcleo-borda do clinopiroxênio da amostra PPE-8A, nefelina sienito médio-grosso a grosso. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados no cristal. (C) Fotomicrografia, com luz plano-polarizada.

#### *Enclaves tipo I*

Os enclaves de tipo I possuem duas gerações distintas de piroxênios (ver item 3.2), 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 zonamento composicional mais restrito em relação aos dos nefelina sienitos, e são classificados como diopsídios, tendo Ca e Mg como principais cátions presentes nos sítios M2 e M1, respectivamente. Nota-se também que as bordas destes piroxênios possuem teores muito inferiores de Na em relação aos da rocha encaixante.

Os macrocristais de piroxênio, principalmente os róseos, são caracterizados por possuírem alto teor de  $\text{TiO}_2$ , o qual pode chegar a 4,2% (em peso) e em média possuem 2,6%. Esta característica os dão o nome de “diopsídios com Ti”, nomenclatura esta proposta



por Morimoto (1988). Do núcleo para a borda, estes piroxênios têm zoneamento marcado pelo descréscimo de MgO (16,3 – 9,3%), de CaO (23,8 – 21,0%) e de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (0,27 – 0%), este último com teores maiores nas zonas incolores, e conseqüente aumento de  $\text{Na}_2\text{O}$  (0,3 – 1,8%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3^c$  (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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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.

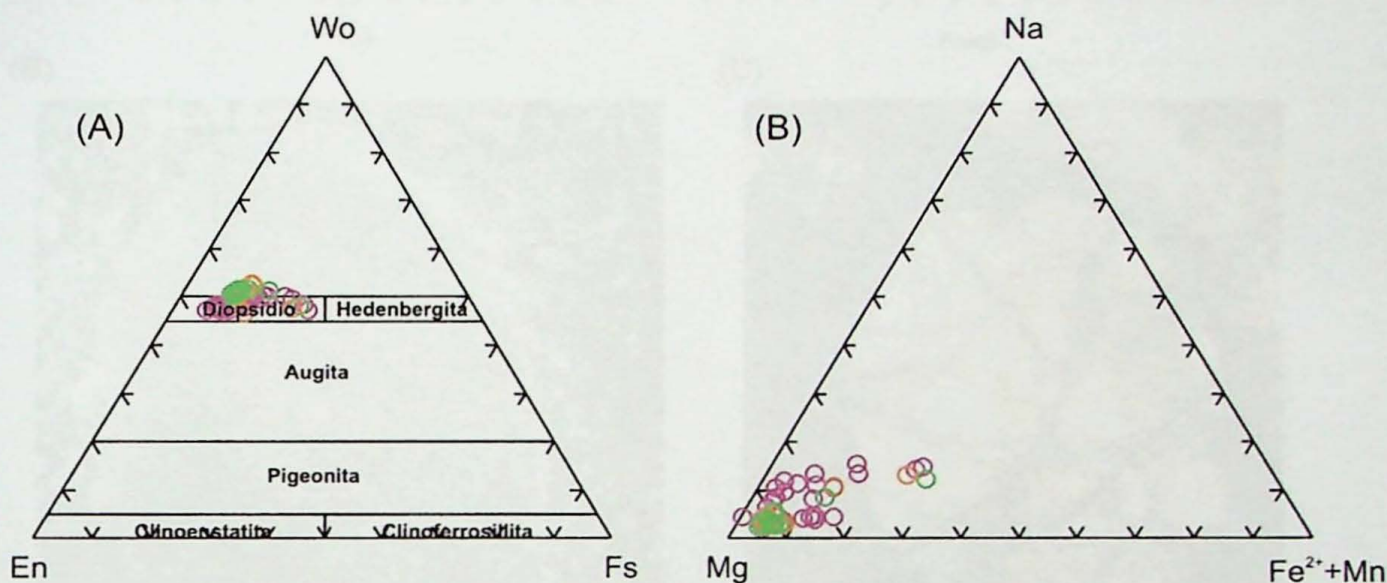


Figura 3-6: (A) Diagrama composicional ternário para classificação de piroxênios, expresso por moléculas de Wo-En-Fs (wollastonita, enstatita e ferrossilita). (B) Diagrama composicional ternário, expresso pelos cátions Na-Mg-(Fe<sup>2+</sup>+Mn) por cela unitária dos macrocristais de piroxênio dos enclaves Tipo I.

Na Figura 3-7 observa-se que o Ti, juntamente com o Al, estão em maior quantidade somente na zona rósea do cristal, enquanto na zona incolor e na verde estão em menor quantidade.



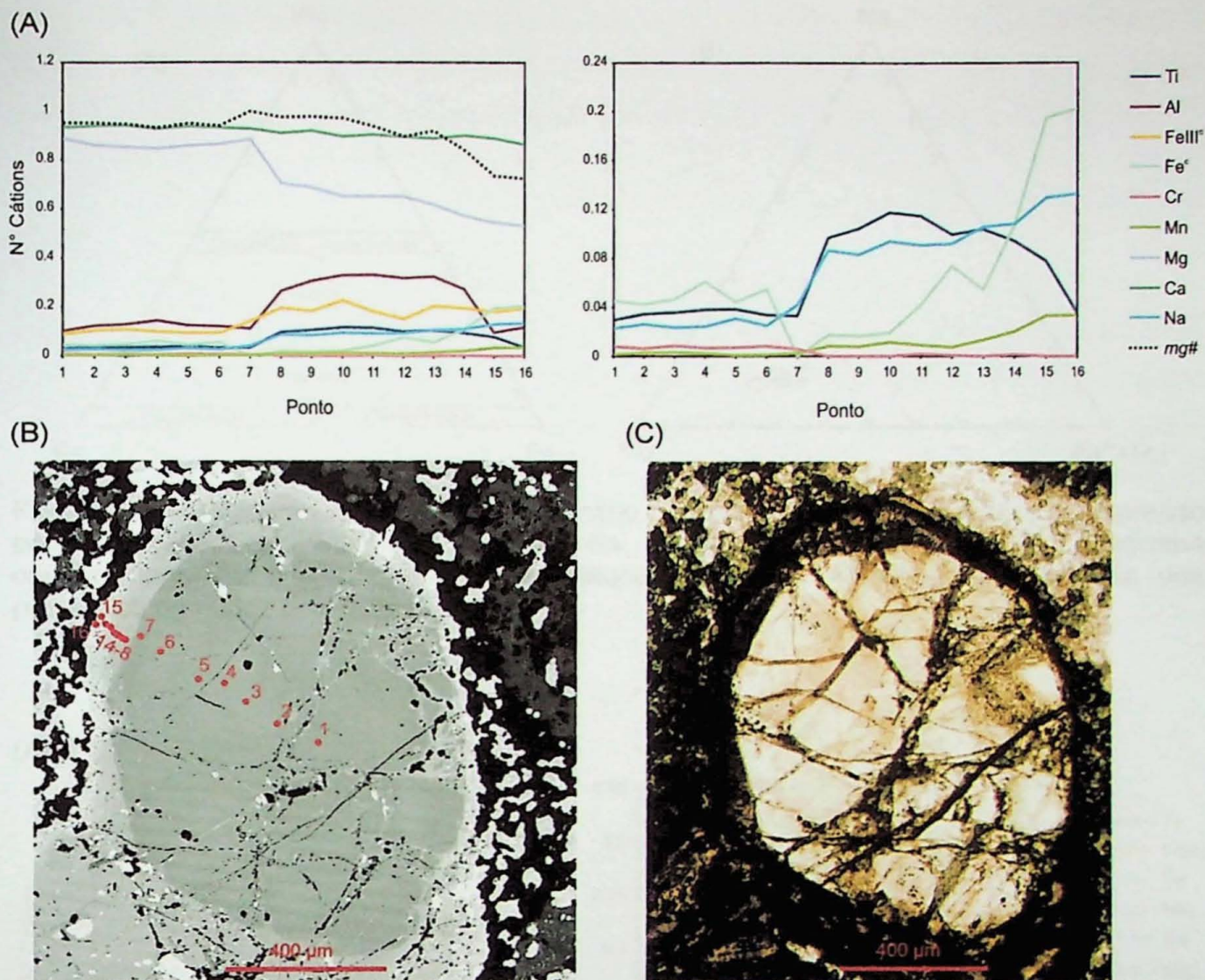


Figura 3-7: (A) Diagramas mostrando a variação de número de c.p.f.u. por ponto do perfil núcleo-borda do macrocristal de clinopiroxênio da amostra PC-19, enclave Tipo I. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados no cristal. (C) Fotomicrografia, com luz plano-polarizada.

Assim como os macrocristais, os piroxênios da matriz são classificados como diopsídios, gradando para augitas (Figura 3-8) e seu zoneamento é muito sutil. Estes piroxênios possuem composição semelhante à zona verde da borda dos macrocristais e possuem teores menores de  $\text{TiO}_2$  (1,3% em peso, em média) comparados aos macrocristais. A amostra PC-19 mostrou possuir piroxênios mais Na e Mg do que as outras.



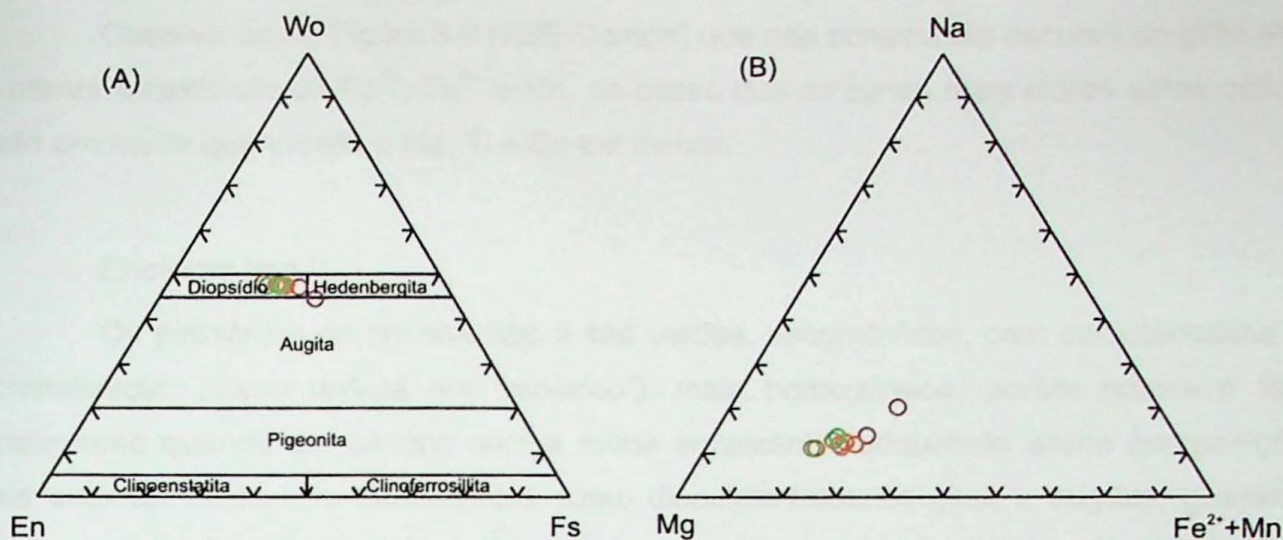


Figura 3-8: (A) Diagrama composicional ternário para classificação de piroxênios, expresso por moléculas de Wo-En-Fs (wollastonita, enstatita e ferrossilita). (B) Diagrama composicional ternário, expresso pelos cátions Na-Mg-(Fe<sup>2+</sup>+Mn) por cela unitária dos piroxênios da matriz do enclave Tipo I.

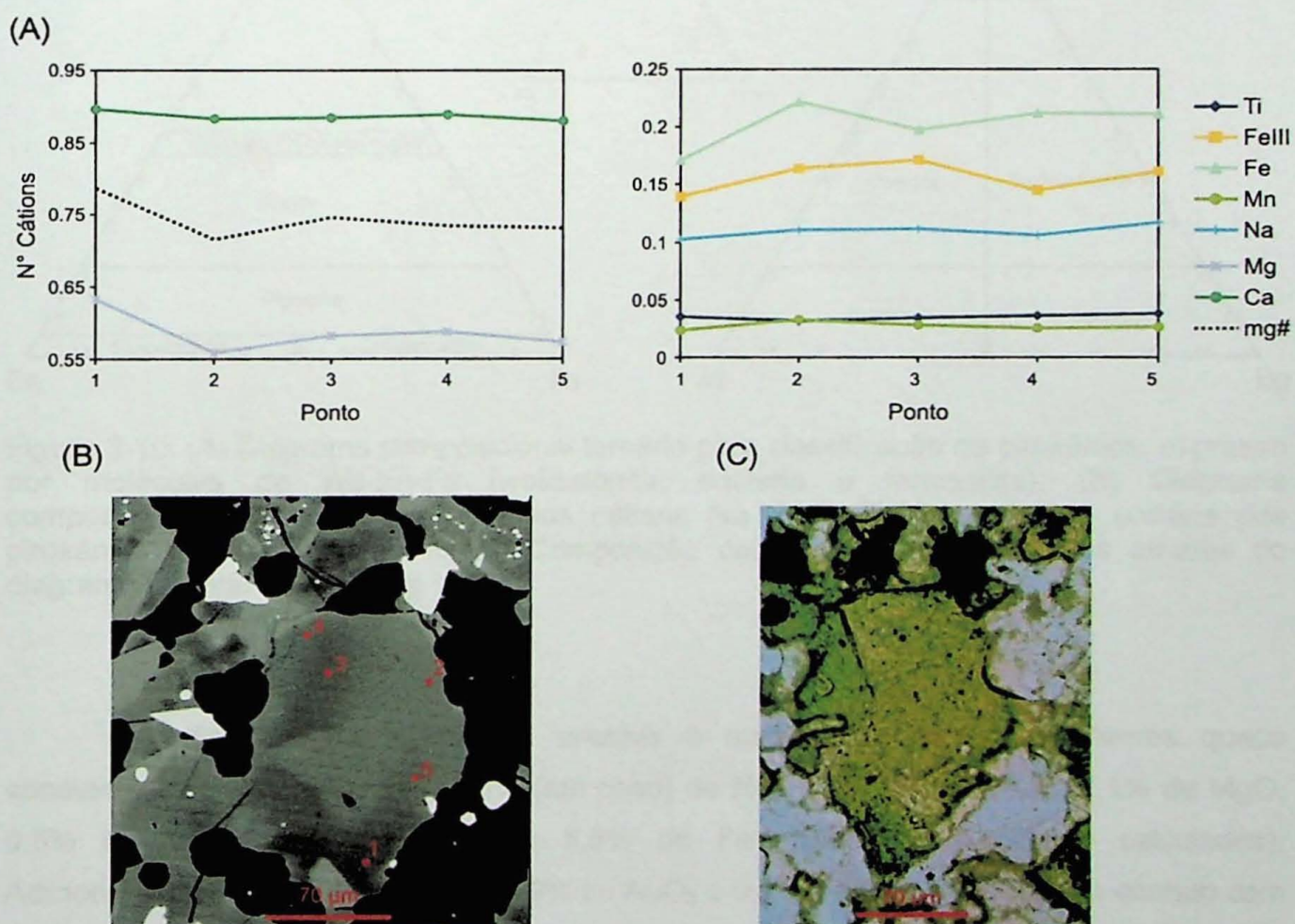


Figura 3-9: (A) Diagramas mostrando a variação de número de c.p.f.u. por ponto do clinopiroxênio da matriz da amostra PPE-1Bg, enclave Tipo I. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados no cristal. (C) Fotomicrografia, com luz plano-polarizada.



Observa-se na Figura 3-9 (BSE-Compo) que nas zonas mais escuras do grão têm-se menor quantidade de  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  e Mn, ao passo que as zonas mais claras estes cátions estão em maior quantidade e Mg, Ti e Ca em menor.

### Enclaves tipo II

Os piroxênios do enclave tipo II 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 composições mais sódicas. Estes são classificados como diopsídio-hedenbergitas e augitas, gradando para egrina-augitas, nas bordas quando em contato com a rocha encaixante (Figura 3-10).

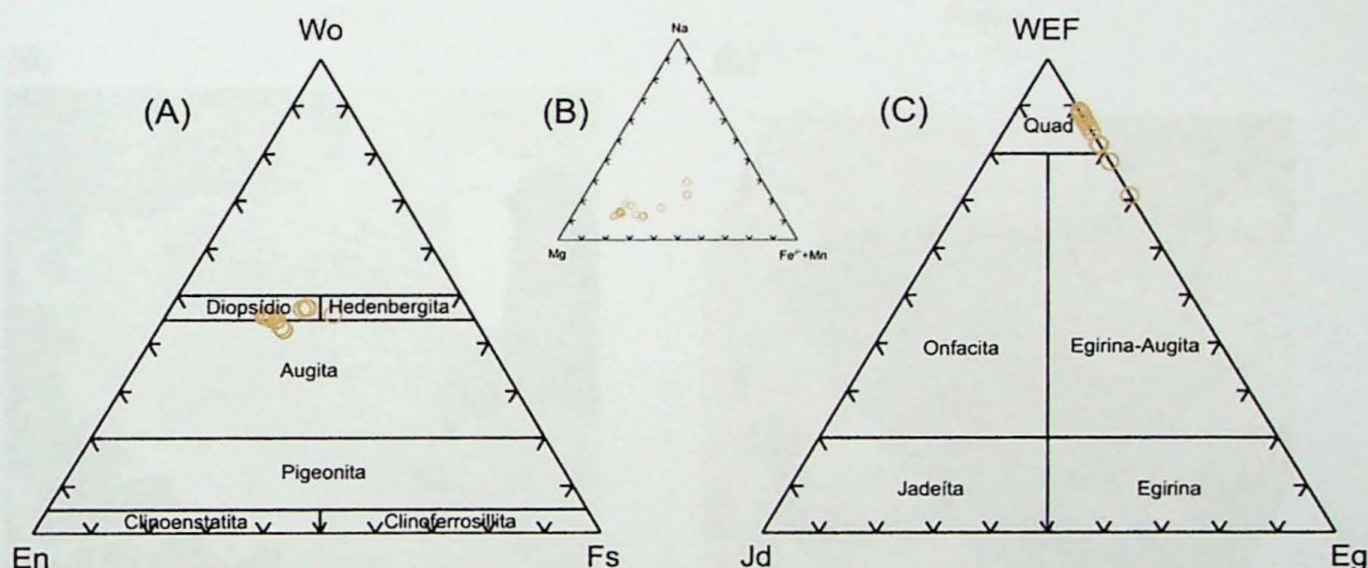


Figura 3-10: (A) Diagrama composicional ternário para classificação de piroxênios, expresso por moléculas de Wo-En-Fs (wollastonita, enstatita e ferrossilita). (B) Diagrama composicional ternário, expresso pelos cátions Na-Mg-( $\text{Fe}^{2+} + \text{Mn}$ ) por célula unitária dos piroxênios do enclave Tipo II. (C) Composição catiônica destes piroxênios através do diagrama ternário WEF-Jd-Eg.

O diopsídio do interior do enclave é mais homogêneo, com teores quase constantes. Possui, em média, 1,8% (em peso) de  $\text{Na}_2\text{O}$ , 21,2% de  $\text{CaO}$ , 12,1% de  $\text{MgO}$ , 0,5% de  $\text{MnO}$ , 5,3% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e 5,6% de  $\text{FeO}$  (estes dois últimos calculados). Adicionalmente possui 1% de  $\text{TiO}_2$ , 0,9% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 0,1% de  $\text{ZrO}_2$ . 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  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (10,1%),  $\text{FeO}$  (10,2%),  $\text{MnO}$  (1,7%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (3,8%) e  $\text{ZrO}_2$  (0,3%) e mais baixos os de  $\text{TiO}_2$  (0,7%),  $\text{MgO}$  (5,3%) e  $\text{CaO}$  (16,8%). Com uma mudança gradacional destes teores.



O índice *mg#* é, em média, de 0,8 para os diopsídios comuns do interior do enclave e 0,5 para o da borda com a rocha encaixante.

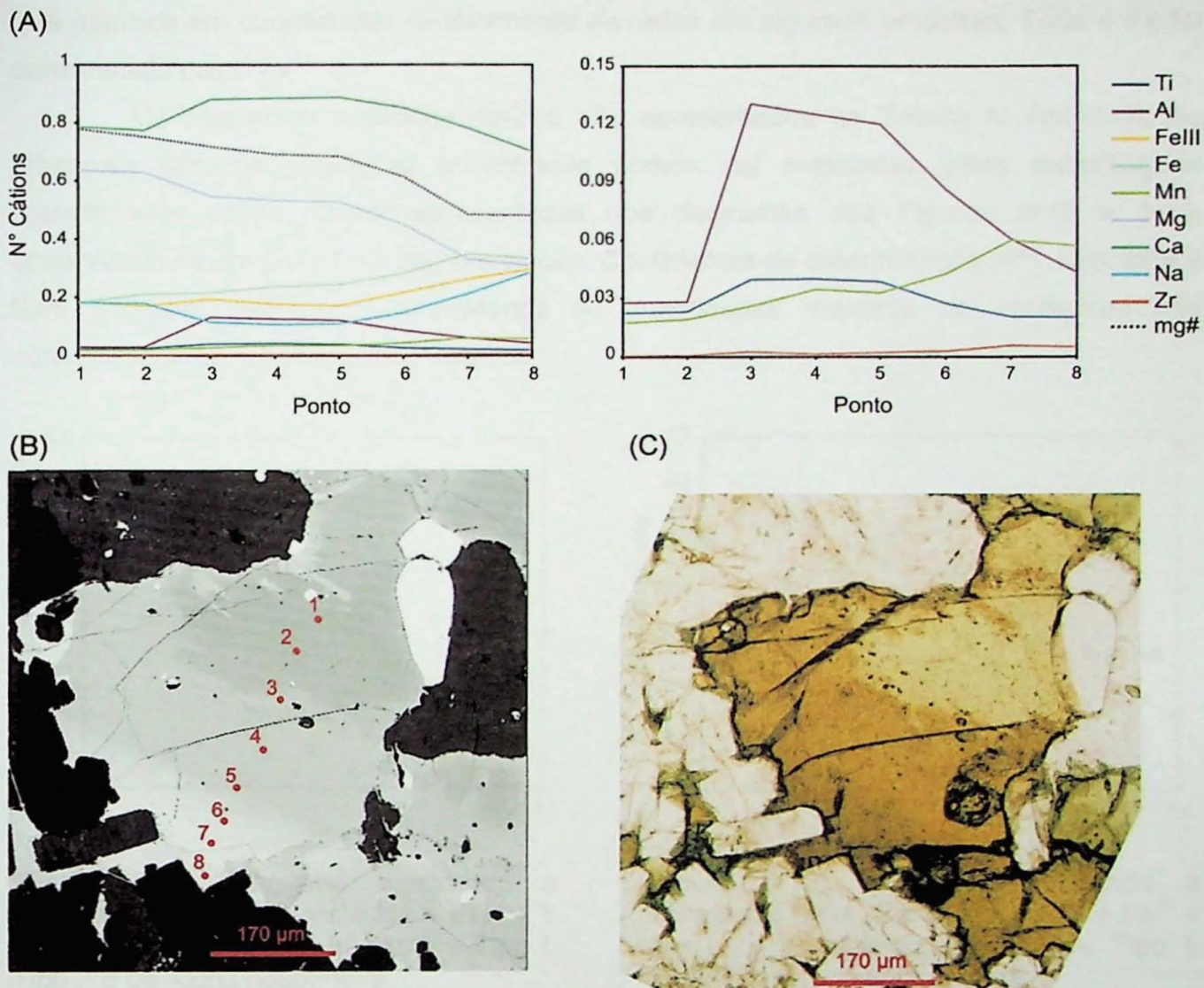


Figura 3-11: (A) Diagramas mostrando a variação de número de c.p.f.u. (cpfu) por ponto do perfil núcleo-borda do clinopiroxênio da borda do enclave Tipo II, amostra PPE-5Bb. (B) Imagem BSE-Compo com localização dos pontos analisados no cristal. (C) Fotomicrografia, com luz plano-polarizada.

### 3.3.2. Titanita

Titanita é um mineral de relativa importância, pois está presente nos sienitos e é abundante nos enclaves tipo I como parte da matriz, no entanto sua presença é rara nos enclaves tipo II.

Tem como fórmula geral:  $\text{CaTi}[\text{SiO}_4](\text{O}, \text{OH}, \text{F})$ , onde o Ca pode ser substituído por Na, terras raras, Mn,  $\text{Sr}^*$  e  $\text{Ba}^*$ ; o Ti pode ser substituído por Al,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , Mg, Nb,  $\text{Ta}^*$ ,  $\text{V}^*$  e  $\text{Cr}^*$ ; e o O pode ter um quinto de seu conteúdo substituído por (OH,  $\text{F}^*$ ). Estas



substituições se dão pelo fato da estrutura da titanita conter tetraedros independentes de silício-oxigênio, com grupos de  $[\text{CaO}_7]$  e  $[\text{TiO}_6]$  (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 Fe foi considerado como  $\text{Fe}^{3+}$ .

Os resultados analíticos obtidos são apresentados na Tabela 4/ Anexo II. As principais variações químicas encontradas podem ser explicadas pelas substituições mencionadas acima, como representadas nos diagramas das Figuras 3-12 e 3-13, observando-se em geral uma boa correlação. Coeficientes de determinação ( $R^2$ ), inferiores a 0,95 sugerem, entretanto, a presença de quantidades menores de elementos não considerados na rotina analítica utilizada.

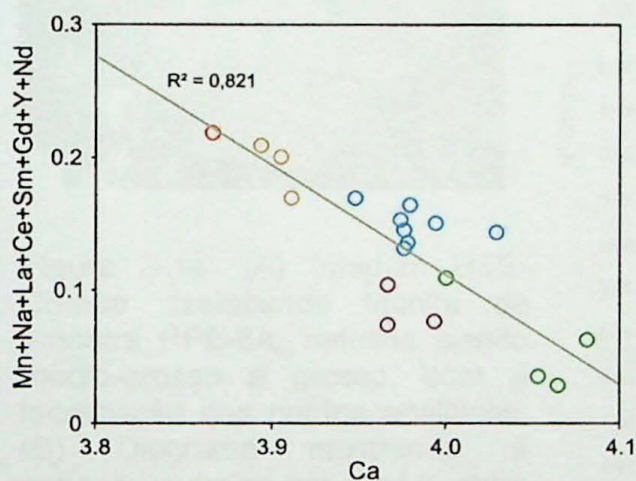


Figura 3-12: Diagrama mostrando a correlação entre Ca e Mn + Na + ETR + Y + Nd para as titanitas do enclave Tipo I, Tipo II e da rocha hospedeira.

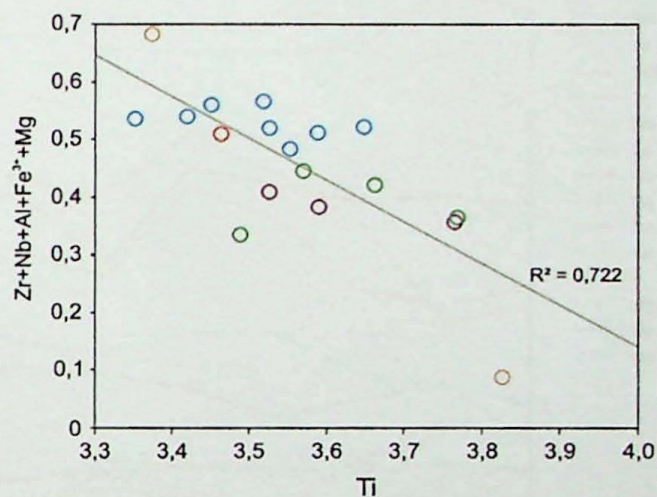


Figura 3-13: Diagrama mostrando a correlação entre Ti e Zr + Nb + Al +  $\text{Fe}^{3+}$  + Mg para as titanitas do enclave Tipo I, Tipo II e da rocha hospedeira.

### *Nefelina Sienitos*

A titanita destas rochas é idiomórfica, de hábito típico "navicular", com pleocroísmo forte do róseo pálido amarelado ao róseo amarronzado, e possui notável zoneamento concêntrico, de núcleo com tonalidades mais claras para borda mais escuras, com finas intercalações destes tons, visto nas imagens BSE-Compo (ver Figura 3-14). As zonas mais claras possuem maior teor de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (1,2%, em média), enquanto estes teores são mais baixos nas zonas mais escuras (0,8% de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ).

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  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ , chegando a teores de 1,5% em peso na amostra PPE-8A.  $\text{La}_2\text{O}_3$  e  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  têm maior concentração nas bordas do cristal, porém não ultrapassam 0,4% e 0,25%, respectivamente.  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  e



$\text{Nd}_2\text{O}_3$  têm sua distribuição de certa forma homogênea, e estão presentes com média de 1,03%, 0,14% e 0,57%, respectivamente.

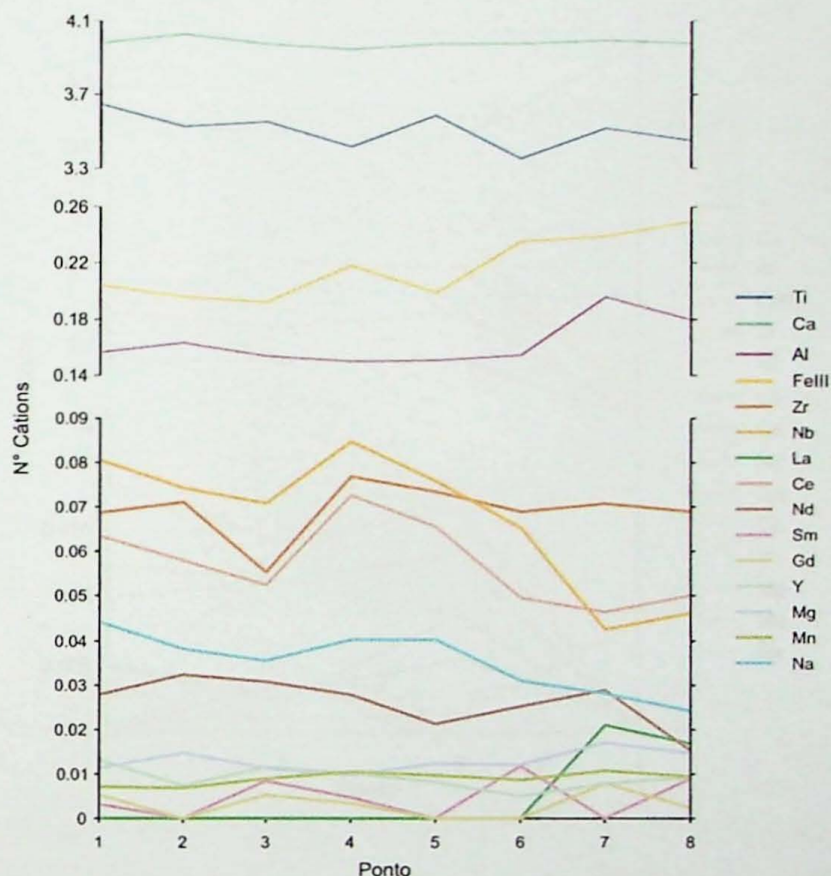
$\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{MnO}$  possuem teores muito baixos (ambos 0,1% em peso, em média) e o teor de  $\text{MgO}$  beira o limite de detecção (0,04% em média).

(A)



Figura 3-14: (A) Imagem BSE-Compo destacando titanita da amostra PPE-8A, nefelina sienito médio-grosso a grosso, com a localização dos pontos analíticos. (B) Diagrama mostrando a variação química em c.p.f.u. entre os pontos analisados.

(B)



### *Enclave Tipo I*

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, porém com uma fina intercalação entre tons claros e escuros (ver Figura 3-15). Este zonamento maior é marcado pelo decréscimo, da borda para o núcleo, dos teores de  $\text{ZrO}_2$  (1,0 – 0,13% em peso),  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (0,79 – 0,37%),  $\text{La}_2\text{O}_3$  (0,24 – 0,02%),  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (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.

Excepcionalmente na amostra PPE-1Bg o teor de ETR chega a 2,3%, isso se dá pelo conteúdo relativamente alto de  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  (0,5%),  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (1,03%) e  $\text{La}_2\text{O}_3$  (0,4%).



e óxidos de ETR (0,5%). Em sua borda, a quantidade de Al, ETR,  $\text{Fe}^{3+}$ , Zr e Nb decresce bruscamente. Este decréscimo é compensado pelo aumento de Ti, como se pode observar na Figura 3-13.

O MgO e MnO possuem teores muito baixos, em média de 0,06 e 0,05% (em peso), respectivamente.

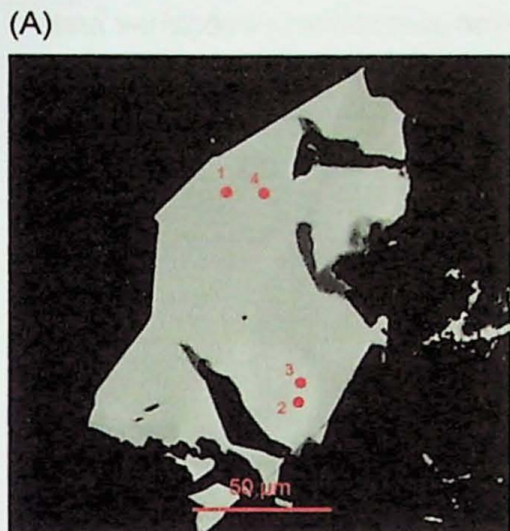
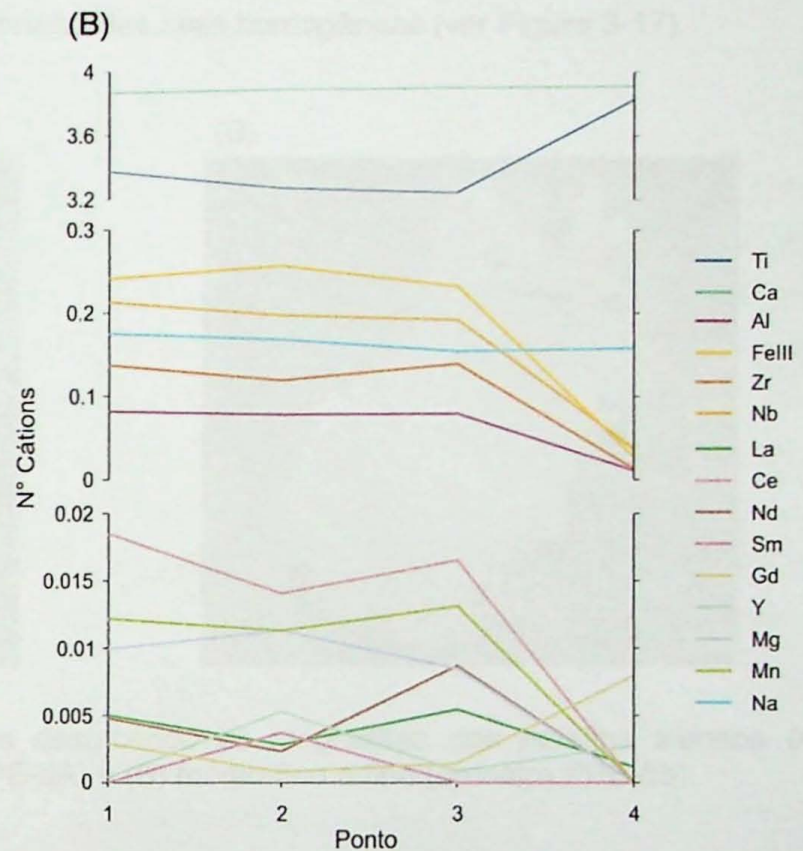


Figura 3-16: (A) Imagem BSE-Compo destacando titanita da amostra PPE-5Bb, enclave Tipo II, com a localização dos pontos analíticos. (B) Diagrama mostrando a variação química em c.p.f.u. entre os pontos analisados.



### 3.3.3. Minerais Opacos

Os minerais opacos presentes nas amostras analisadas são classificados como membros da solução-sólida magnetita-ulvoespínélio, do grupo dos espinélios. A característica desta solução-sólida é o enriquecimento em  $\text{TiO}_2$  e o empobrecimento em  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , da magnetita para o ulvoespínélio. Os membros desta solução-sólida podem ter seu  $\text{Fe}^{3+}$  total ou parcialmente substituídos por Cr e V e por pequenas quantidades de Al, ao passo que o  $\text{Fe}^{2+}$  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 5/ Anexo II.



### 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 3-17).

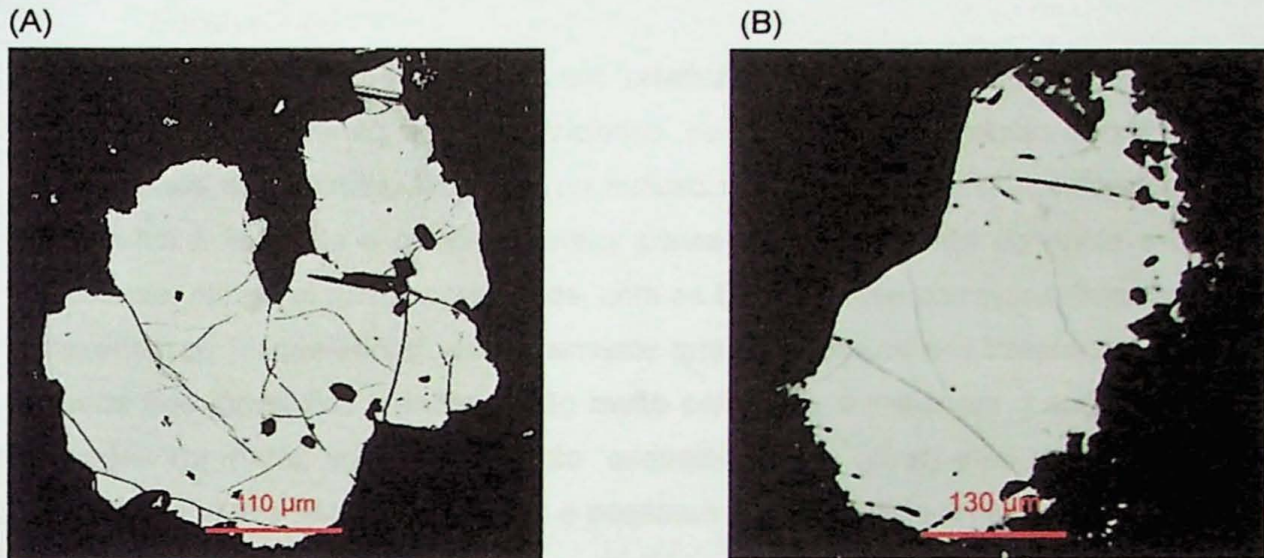


Figura 3-17: Imagens BSE-Compo destacando as magnetitas dos nefelina sienitos (A) médio-grosso a grosso (amostra PPE-8A) e (B) médio-fino a fino (amostra PPE-6b).

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  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,22% em peso) e  $\text{MnO}$  (4,3%) do que os inclusos no piroxênio verde prismático ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,16\%$  e  $\text{MnO} = 2,7\%$ ).

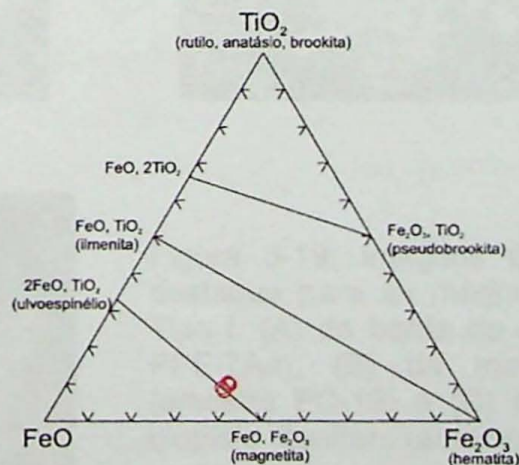


Figura 3-18: Diagrama ternário composicional dos minerais opacos dos nefelina sienitos, expresso em moléculas de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .



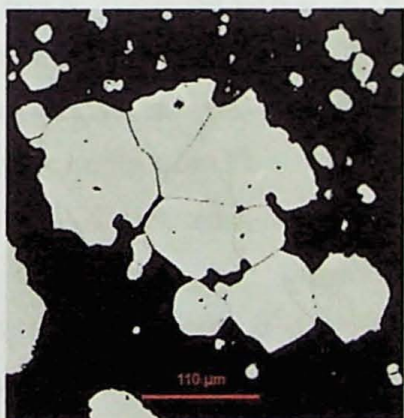
O conteúdo de Ti varia pouco nestes cristais, e não passa de 2,1 c.p.f.u.. Com o aumento de Ti há uma conseqüente diminuição de  $\text{Fe}^{3+}$ , correspondente à solução-sólida magnetita-ulvoespínélio anteriormente citada (ver Figura 3-18). A quantidade de Mn tem relação inversamente proporcional à de  $\text{Fe}^{2+}$ .

As composições destes grãos variam entre 68,3 e 73,5 (% em peso) de  $\text{FeO}$ , 13,4 e 16,4% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e 6,7 e 8% de  $\text{TiO}_2$ . Adicionalmente estas titanomagnetitas possuem, em média, 0,2% de  $\text{ZnO}$ , 0,05% de  $\text{CaO}$  e 0,06% de  $\text{MgO}$ .

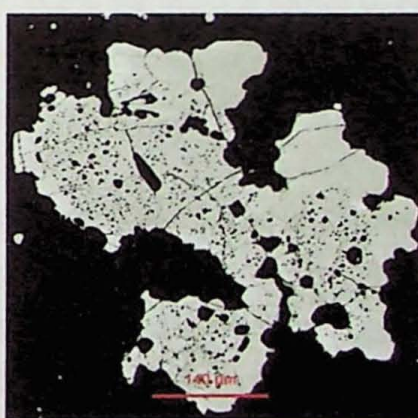
#### *Enclave Tipo I*

Os enclaves Tipo I possuem relativa abundância de minerais opacos. Estes minerais freqüentemente estão associados ao diopsídio da matriz, à borda verde dos macrocristais de diopsídio titanífero ou incluso 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 nos diopsídios titaníferos 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 3-19.

(A)



(B)



(C)



Figura 3-19: Imagens BSE-Compo com destaque para as magnetitas do enclave Tipo I. (A) da borda do enclave (amostra PPE-7Aa), (B) da matriz do enclave (amostra PC-19) e (C) opaco incluso no diopísio titanífero (amostra PPE-1Bg).



Neste tipo de enclave têm-se desde magnetitas com pouco Ti até titanomagnetitas, com ampla variação dos termos Ti e  $\text{Fe}^{3+}$ , diferentemente dos nefelina sienitos como se observa na Figura 3-20.

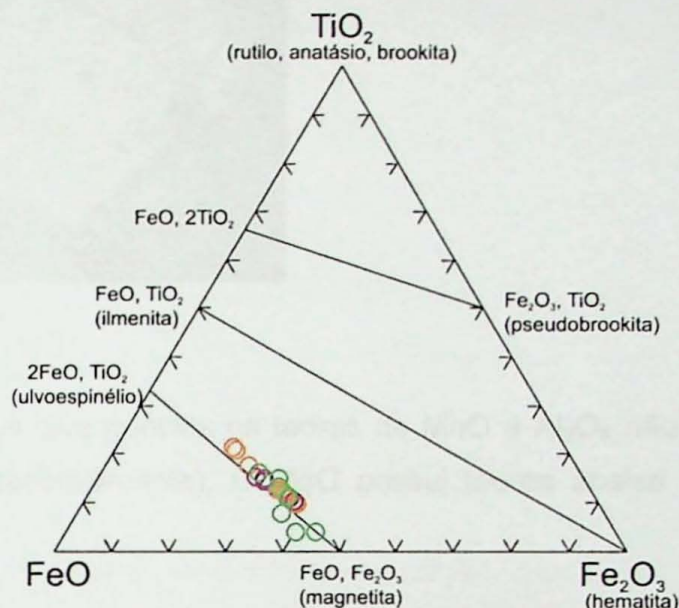


Figura 3-20: Diagrama ternário composicional dos minerais opacos dos enclaves tipo I, expresso em moléculas de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Os cristais associados à matriz do enclave são quimicamente semelhantes aos da borda dos macrocristais de dipsídio e da borda dos enclaves, e possuem, em média, 0,3% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 0,2% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 3,1% de  $\text{MnO}$ , 0,2% de  $\text{MgO}$  e ainda 0,3% de  $\text{ZnO}$ . Como óxidos constituintes, têm-se em média 11,5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 71,4% de  $\text{FeO}$  e 8,5% de  $\text{TiO}_2$ , composição tal que, plotada no diagrama ternário molecular  $\text{TiO}_2$ - $\text{FeO}$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , cai no campo da magnetita com Ti.

Os opacos inclusos nos diopsídios titaníferos 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  $\text{TiO}_2$  e não possuir  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (como na amostra PPE-1Bg). Outro caráter distintivo é o teor mais baixo de  $\text{MnO}$  (2,2% em média) e mais elevado de  $\text{MgO}$  (0,7% em média), que pode chegar a 1,8% no caso dos grãos com teores ínfimos de ou sem  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

### *Enclaves tipo II*

Minerais opacos neste enclave são muito escassos e ocorrem associados à titanita e flogopita. São subidiomórficos, porém apresentam-se muito fraturados. Nas imagens BSE-Compo denotam tons muito diferenciados de cinza, indicando um forte zoneamento setorial (ver Figura 3-21).



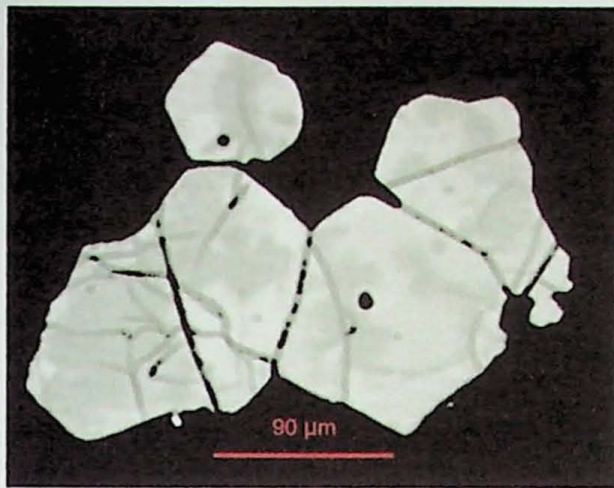


Figura 3-21: Imagem BSE-Compo com destaque para a magnetita do enclave Tipo II (amostra PPE-5Bb).

Apesar destas divergências os teores de  $\text{MnO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  não variam muito (2,3% e 0,14% em média, respectivamente). O  $\text{MgO}$  possui teores abaixo do limite de detecção nestes cristais.

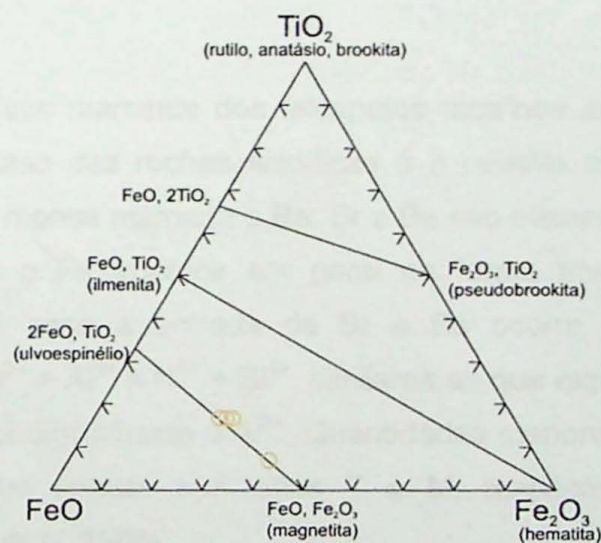


Figura 3-22: Diagrama ternário composicional dos minerais opacos dos enclaves tipo II, expresso em moléculas de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Entre as zonas claras e escuras das imagens há uma variação do teor de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ , maior nas zonas mais claras e de Si e Al, maior nas zonas mais escuras, além da presença de Ni em maiores quantidades nas zonas mais claras.

#### 3.3.4. 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 3-23. Observa-se que seu intervalo composicional se dá muito próximo ou exatamente ao longo do eixo Ab-Or (albita-ortoclásio) e possui teores



muito próximo ou exatamente ao longo do eixo Ab-Or (albita-ortoclásio) e possui teores muito maiores de Or (65 – 90%) do que de Ab (10 – 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).

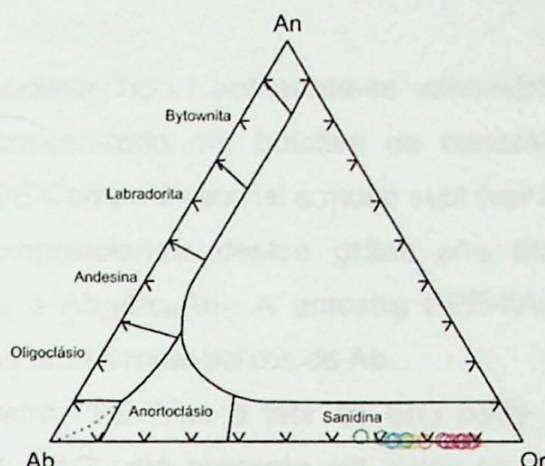


Figura 3-23: Diagrama composicional ternário, expresso por moléculas de Ab-Na-Or, dos feldspatos analisados.

Uma característica marcante dos feldspatos alcalinos 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 o 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  $\text{Fe}^{3+}$  substitui diretamente o  $\text{Al}^{3+}$ . 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).

#### *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 3-23, 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  $\text{Ab}_{28}\text{Or}_{72}$ , e o mais fino  $\text{Ab}_{20}\text{Or}_{80}$ .

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 sienitos mais grossos (0,07%, em média) do que nos finos (0,1%, em média).



Os feldspatos dos sienitos possuem teores relativamente altos de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 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  $\text{Fe}^{3+}$ , Sr e Ba está presente nas zonas mais claras (ver Figura 3-24).

#### *Enclave Tipo I*

O feldspato do enclave Tipo I apresenta-se xenomórfico de aspecto muito sujo, associado à nefelina e concentrado em bolsões de minerais félsicos. O zoneamento observado nas imagens BSE-Compo é setorial e muito sutil (ver Figura 3-24).

Os intervalos composicionais destes grãos são mais amplos e variam sua composição entre  $\text{Ab}_{10}\text{Or}_{90}$  e  $\text{Ab}_{33}\text{Or}_{66}\text{An}_1$ . A amostra PPE-7Aa foi a que mostrou teores mais elevados e a PC-19 os teores mais baixos de Ab.

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  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  deste enclave é semelhante ao dos sienitos, variando entre 0,4 e 0,7% (com média de 0,5%).

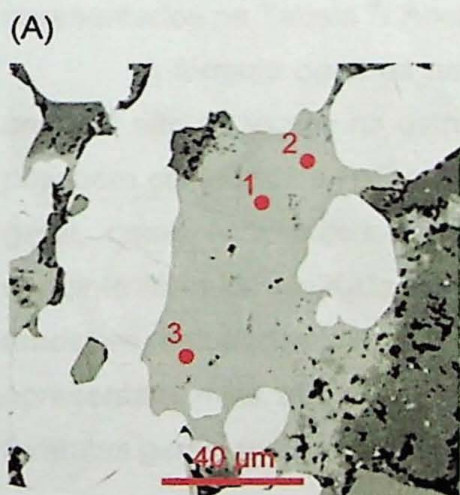
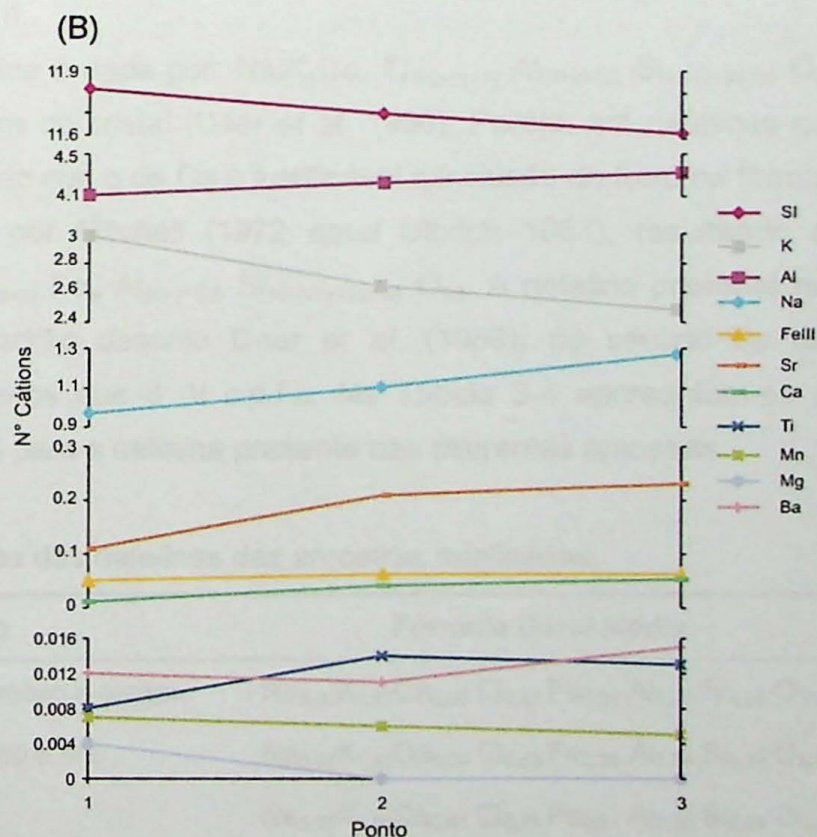


Figura 3-24: (A) Imagem BSE-Compo destacando feldspato alcalino da amostra PPE-7Aa, enclave tipo I, com a localização dos pontos analíticos. (B) Diagrama mostrando a variação química em c.p.f.u. entre os pontos analisados.



#### *Enclave Tipo II*

Os enclaves Tipo II possuem a característica de possuírem somente feldspato alcalino como mineral félsico constituinte. Este feldspato é xenomórfico e freqüentemente



possui textura em "mosaico" como feição de recristalização, 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  $Ab_{28}Or_{74}$ . O SrO está presente em teor médio de 0,3% (em peso), com pouca variação. Os teores de BaO nestes enclaves varia entre 0,2 e 0,8%, onde as maiores concentração estão 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%).

O MnO, óxido relativamente raro nos feldspatos alcalinos (Deer *et al.* 1966), está presente em teor mais elevado nos enclaves Tipo I, 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%.

### 3.3.5. Nefelina

Foram obtidos dados analíticos para cristais de nefelina presentes nas duas fácies de nefelina sienitos e nos enclaves de tipo I. O mineral félsico essencial dos enclaves de tipo II é o feldspato alcalino, não sendo detectada nefelina. Os resultados analíticos obtidos são apresentados na Tabela 7/ Anexo II.

A fórmula geral da nefelina é dada por:  $Na_xK_yCa_z \square_{8-(x+y+z)} Al_{(x+y+2z)} Si_{16-(x+y+2z)} O_{32}$ , onde  $\square$  são os vazios na estrutura do cristal (Deer *et al.* 1966). Porém, em nefelinas que possuem 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:  $Na_xK_yCa_z \square_{8-(x+y+z)} Fe_w Al_{(x+y+2z)} Si_{16-(x+y+2z+w)} O_{32}$ . 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 c.p.f.u. Na Tabela 3-4 apresentam-se as formulas gerais médias calculadas para a nefelina presente nas diferentes amostras.

Tabela 3-4: Fórmulas gerais médias das nefelinas das amostras analisadas.

| Amostra | Litotipo                               | Fórmula Geral Média                                                              |
|---------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| PPE-8A  | Nefelina sienito médio-grosso a grosso | $Na_{5,86}K_{1,97}Ca_{0,00} \square_{0,17} Fe_{0,01} Al_{7,83} Si_{8,16} O_{32}$ |
| PPE-6b  | Nefelina sienito médio-fino a fino     | $Na_{5,97}K_{1,41}Ca_{0,00} \square_{0,63} Fe_{0,24} Al_{7,38} Si_{8,38} O_{32}$ |
| PPE-1Bg | Enclave Tipo I                         | $Na_{5,78}K_{1,36}Ca_{0,01} \square_{0,71} Fe_{0,21} Al_{7,16} Si_{8,58} O_{32}$ |
| PPE-7Aa | Enclave Tipo I                         | $Na_{5,76}K_{1,34}Ca_{0,01} \square_{0,88} Fe_{0,20} Al_{7,12} Si_{8,68} O_{32}$ |
| PC-19   | Enclave Tipo I                         | $Na_{5,83}K_{1,57}Ca_{0,00} \square_{0,60} Fe_{0,28} Al_{7,40} Si_{8,32} O_{32}$ |



### *Nefelina Sienitos*

Os nefelina sienitos possuem duas gerações texturais distintas de nefelinas, uma presente em ambas fácies, idiomórfica a subidiomórfica, límpida, porém pode estar alterada para cancrinita, associada ao feldspato, a outra presente somente nos sienitos mais finos, subidiomórfica, inclusa no feldspato alcalino e 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 zonamentos significativos (ver Figura 3-25).

As nefelinas do nefelina sienito mais fino distinguem-se das do mais grosso por possuir teores de K e Al mais baixos e os de Si e espaços vazios mais altos. O teor de  $\text{Fe}^{3+}$  é considerado alto no sienito fino (média de 0,23 c.p.f.u.), apresentando-se mais elevado sempre nas bordas dos cristais, enquanto que o sienito mais grosso possui quantidades ínfimas de  $\text{Fe}^{3+}$ , menores que o limite de detecção. Pequenas quantidades de Ba e Sr entram na estrutura destas nefelinas, particularmente nas bordas e nas do sienito mais fino.

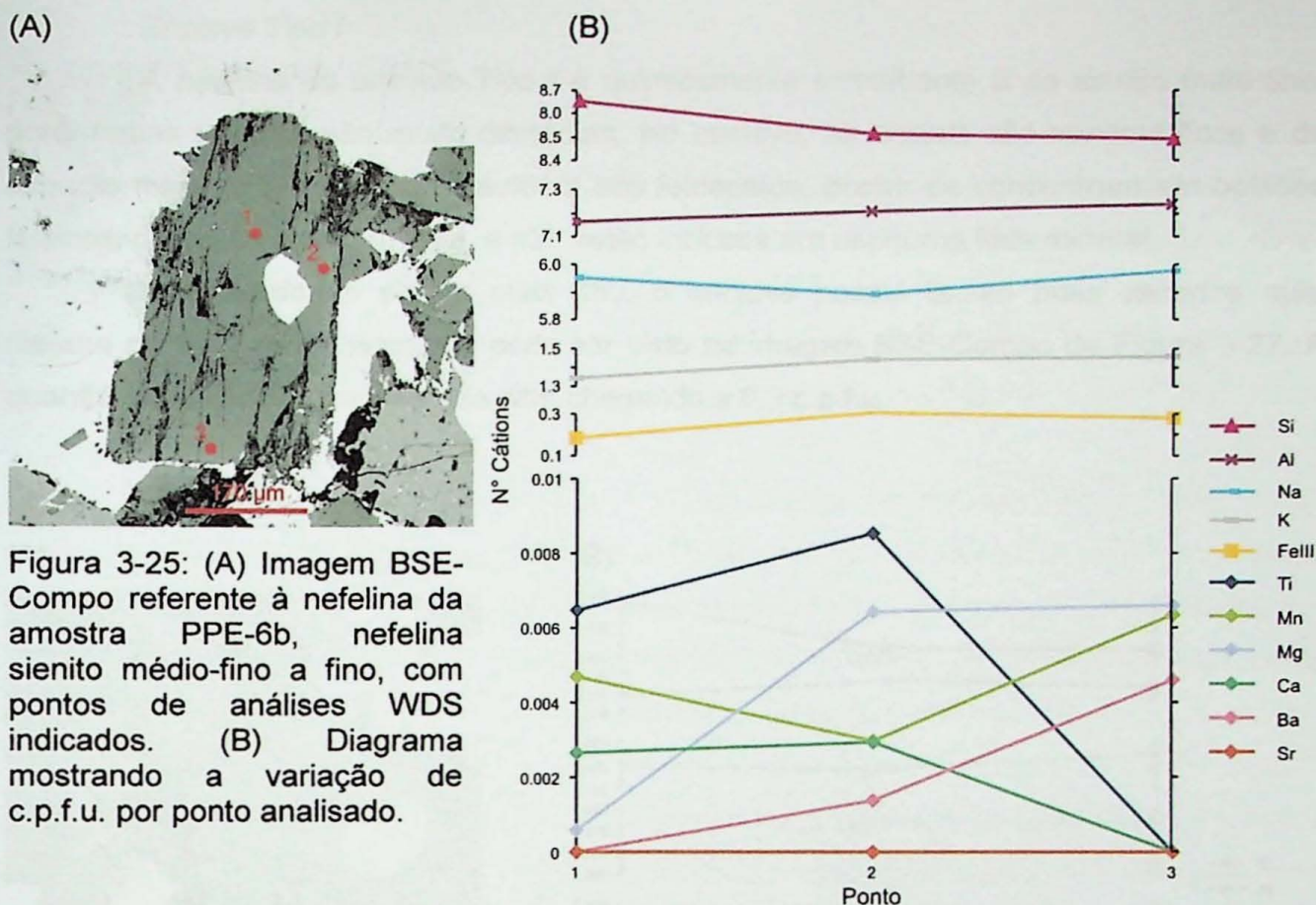
Com relação as diferentes características texturais da nefelina dos sienitos mais finos, temos que os grãos menores, inclusos no feldspato e piroxênio, têm maior conteúdo de Na e menor de K do que os grãos idiomórficos maiores, estes últimos semelhantes a dos enclaves tipo I.

A nefelina do enclave tipo I e do nefelina sienito mais fino é semelhante 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  $\text{Fe}^{3+}$  é considerado alto (média de 0,23 c.p.f.u.) tanto no sienito fino quanto no enclave tipo I, apresentando-se mais elevado sempre nas bordas dos cristais, enquanto que no sienito mais grosso possui teores abaixo do limite de detecção.



Figura 3-25. Composição das nefelinas. Os dados são apresentados em termos de Na, K e Al.





O excesso de sílica nos cristais analisados pode chegar a quase 10%, resultado este semelhante ao observado por Ulbrich (1983) para os nefelina sienitos “híbridos” em sua tese de doutoramento. No diagrama Ne-Qz-Ks (nefelina, sílica e kalsilita) indicado na Figura 3-26, é possível observar que os excessos de sílica nos nefelinas sienitos e nos enclaves são semelhantes.

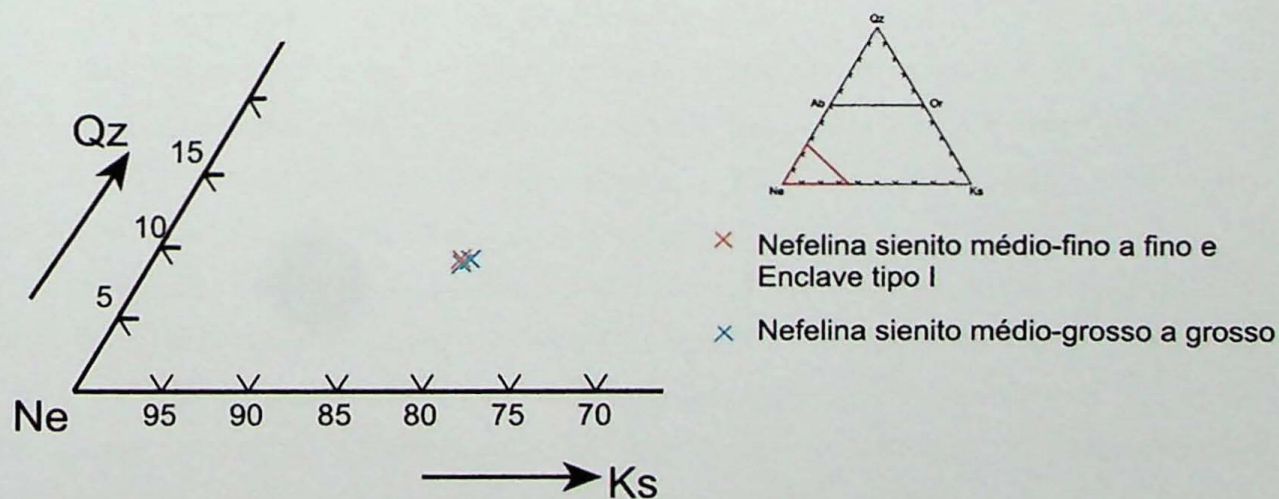


Figura 3-26: Composição das nefelinas, expressa em termos das moléculas de Ne, Qz e Ks.



### Enclave Tipo I

A nefelina do enclave Tipo I é quimicamente semelhante à do sienito mais fino, porém suas texturas são muito diferentes. No enclave, os cristais são xenomórficos e de aspecto mais sujo, associados também aos feldspatos, porém se concentram em bolsões félsicos, descritos anteriormente, e não estão inclusos em nenhuma fase mineral.

Comparado ao sienito mais fino, o enclave possui teores mais variados num mesmo cristal, este zoneamento pode ser visto na imagem BSE-Compo da Figura 3-27. A quantidade de  $\text{Fe}^{3+}$  é considerada alta, chegando a 0,3 c.p.f.u.

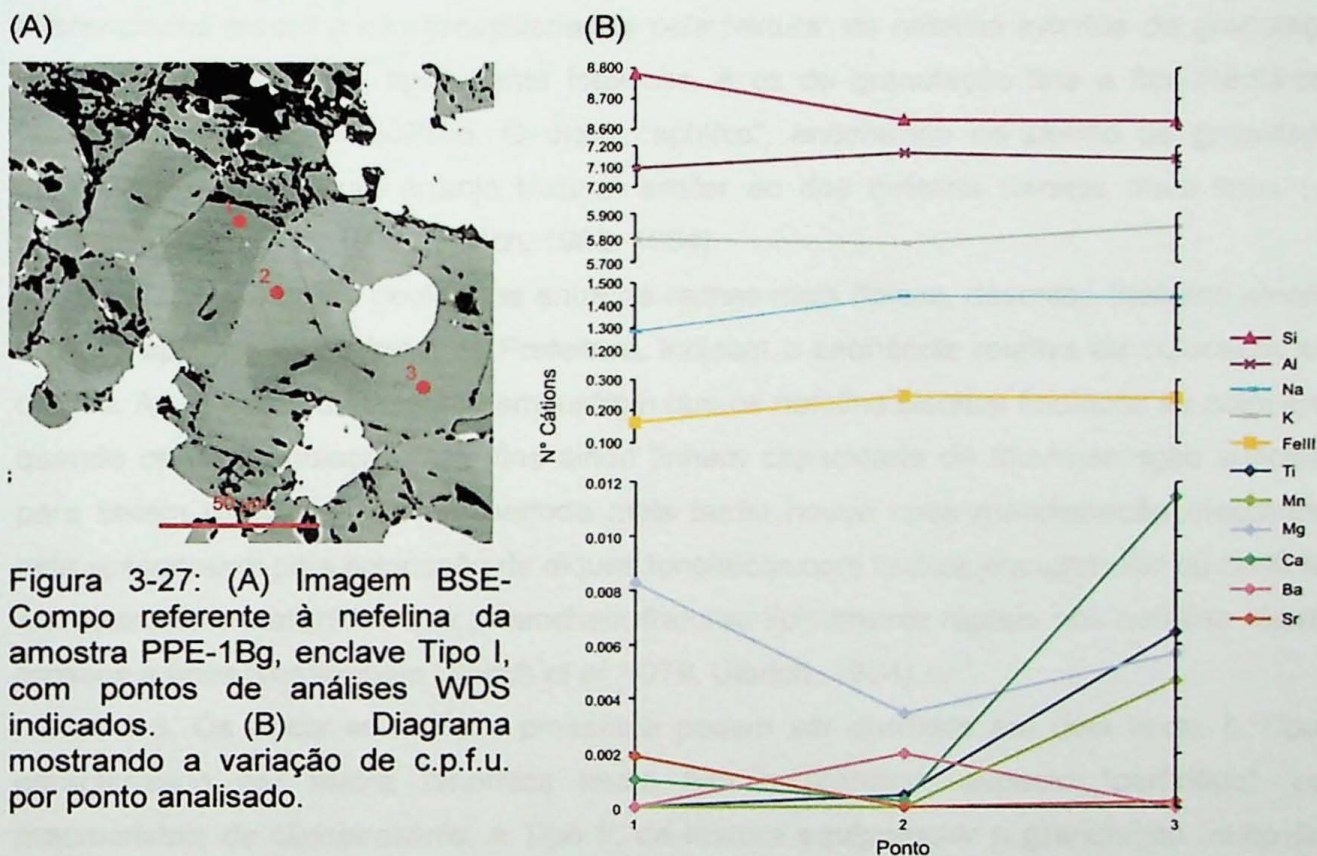


Figura 3-27: (A) Imagem BSE-Compo referente à nefelina da amostra PPE-1Bg, enclave Tipo I, com pontos de análises WDS indicados. (B) Diagrama mostrando a variação de c.p.f.u. por ponto analisado.



#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

Os resultados obtidos no projeto esclareceram alguns aspectos geológicos, petrográficos e químicos das rochas e enclaves estudados. Estes aspectos serão detalhados e discutidos a seguir.

##### *Caracterização geológica e petrográfica dos enclaves e da rocha hospedeira.*

1. Os nefelina sienitos mais típicos, aflorantes na Pedreira da Prefeitura, são diferenciados macro e microscopicamente pela textura: os nefelina sienitos de granulação médio-grossa a grossa, tipicamente foiaíticos, e os de granulação fina a fina-média com feldspato potássico poiquilítico. O dique "aplítico", encontrado no sienito de granulação grosseira, apresenta um arranjo textural similar ao dos nefelina sienitos mais finos (ver também Ulbrich *et al.* 1979, Ulbrich, 1983, 1984).

2. 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 porfírica em matriz fina a afanítica que preenchem fraturas tipicamente rúpteis nos nefelina sienitos grossos e finos (ver também Ulbrich *et al.* 1979, Ulbrich, 1984).

3. Os enclaves máficos presentes podem ser divididos em dois tipos: o Tipo I, caracterizado por matriz fanerítica muito fina a afanítica, aspecto "porfírico", com macrocristais de clinopiroxênio; e Tipo II, de textura equigranular e granulação muito fina. Ambos, mas particularmente o Tipo II, apresentam-se bem transformados, aparentemente recristalizados. Estes enclaves ocorrem concentrados na zona de contato entre as diferentes fácies de nefelina sienito e são mais característicos dos nefelina sienitos finos.

4. Os enclaves félsicos são mineralógica e texturalmente similares ao nefelina sienitos fino a fino-médio, porém com granulometria muito fina.

5. As relações entre os enclaves máficos e os sienitos hospedeiros suportam a hipótese de coexistência de magmas distintos. Feições como bordas afaníticas mais escuras e porções rompidas nos enclaves, glomérulos máficos com clinopiroxênio "titano-diopsídico" nos sienitos, similaridade entre os macrocristais de clinopiroxênio dos enclaves de Tipo I com os encontrados nos nefelina sienitos, sugerem também uma origem híbrida para estes sienitos (ver também Ulbrich 1983). É interessante notar, entretanto, que parte



significativa dos enclaves apresenta bordas lineares e angulosas, talvez relacionadas ao contraste de viscosidade entre o magma dos enclaves e o sienítico.

#### *Caracterização do quimismo mineral dos enclaves máfico-ultramáficos e da rocha hospedeira*

1. O piroxênio, principal mineral máfico das amostras estudadas, está presente em muitas fases. Nos nefelina sienitos, os cristais verdes, poiquilíticos, são egirina-augitas, os róseos/incolores são diopsídios e suas bordas verdes egirina-augitas, ou egirinas no caso dos sienitos mais grossos, e os cristais fibrosos, de cristalização tardia, correspondem a egirinas. No enclave Tipo I, os cristais verdes da matriz são diopsídios a augitas e os macrocristais são "titano-diopsídios". No enclave Tipo II, os cristais em contato com a encaixante possuem zonamento de diopsídios a egirina-augitas, e os cristais do interior do enclave são diopsídio-hedenbergitas a augitas.

2. No nefelina sienito mais fino, o piroxênio possui teores mais extremos de Mg, indicando valores de *mg#* relativamente sempre maiores do que o mais grosso, que possui teores mais extremos de Na em seus piroxênios. O índice *mg#* do piroxênio dos enclaves Tipo I e Tipo II é semelhante ao do núcleo róseo/incolor do piroxênio do sienito mais fino, em torno de 0,9.

3. Os minerais/fases opacos presentes nas amostras estudadas são membros da solução-sólida magnetita-ulvoespínio. As magnetitas dos enclaves possuem maior teor de Ti e menor de  $\text{Fe}^{2+}$  do que a dos sienitos.

4. A nefelina destes enclaves possui assinatura química semelhante à do sienito mais fino, com maior conteúdo de  $\text{Fe}^{3+}$  e menor de K em relação ao sienito mais grosso. O feldspato dos enclaves mostra maior variação composicional ( $\text{Ab}_{10-33}\text{Or}_{72-80}$ ), em seu extremo sódico é semelhante ao do sienito mais grosso e em seu extremo potássico, com teores de  $\text{SrO}$ , em média, de 1,7% (em peso), é semelhante ao mais fino.

5. As características químicas dos minerais dos enclaves Tipo I e II assemelham-se às dos nefelina sienito fino e médio-fino.

Estes aspectos químicos mostram que os enclaves máfico-ultramáficos estão intimamente relacionados ao nefelina sienito mais fino, e se diferem do sienito mais grosso, sugerindo coexistência de dois magmas distintos: um sienítico (correspondente ao corpo de granulação mais fina), outro ultramáfico (correspondente aos enclaves máfico-ultramáficos) que interagiram e formaram o sienito mais fino e, como estrutura de mistura parcial, os enclaves máfico-ultramáficos.



## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- 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.
- ALVES, A. D. 2003. *Rochas vulcanoclásticas do Complexo Alcalino de Poços de Caldas - MG/SP*. Tese de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 106p.
- DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. 1966. *An introduction to the rock forming minerals*. Longmans, Green and Co., Ltd. London. 558pp.
- 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  $Fe^{3+}$  in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analysis, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, **51**: 431-437.
- 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.
- 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, 302p.
- MACKENZIE, W.S.; DONALDSON, C.H.; GUILFORD, C. 1995. *Atlas of igneous rocks and their textures*. Harlow, Longman. 148p.
- MORIMOTO, N. 1988. Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, **39**(1): 55-76.



- NIXON, P. H. 1987. *Mantle Xenoliths*. Chichester, New York, Wiley-Interscience pub. 644p.
- PLÁ CID, J.P.; NARDI, L.V.S.; STABEL, L.Z.; CONCEIÇÃO, R.V.; BALZARETTI, 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.
- 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.
- 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. Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- 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.; 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, 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, M.N.C. 1983. Aspectos mineralógicos e petrológicos de nefelina sienitos do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 369p.



São Paulo, 7 de Novembro de 2006.

Bruna P. Ricardi

Bruna Passarelli Ricardi

De acordo,

p/ Silvio Roberto Farias Vlach



## **Anexo I**

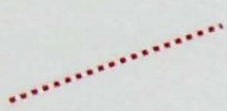
Fotografias representativas microscópicas dos enclaves microgranulares e rocha hospedeira, e macroscópicas destes e das principais estruturas da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas.



## PRANCHA I



**Prancha I:** Foto panorâmica da frente da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas, com a localização das amostras coletadas e destaque para algumas entre as principais feições texturais e estruturais dos nefelina sienitos.



Zona de contato entre as duas fácies de nefelina sienito. O mais grosso fica à esquerda da Pedreira, o mais fino à direita.

• **PPE-1**

Localização e identificação dos pontos de amostragem.

**Foto A:** Dique “aplítico” de composição fonolítica, intrusivo no nefelina sienito mais grosso. *Bloco rolado.*

**Foto B:** Relações de contato entre os nefelina sienitos médio-grossos a grossos e finos a fino-médios, observar porções da fácies fina como enclaves na fácies grosseira. *In situ.*

**Foto C:** Venulações e/ou bolsões pegmatóides, de forma sinuosa dentro do nefelina sienito mais fino. *In situ.*

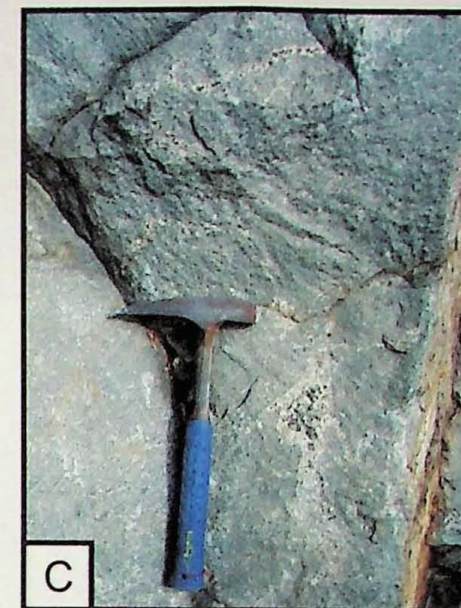
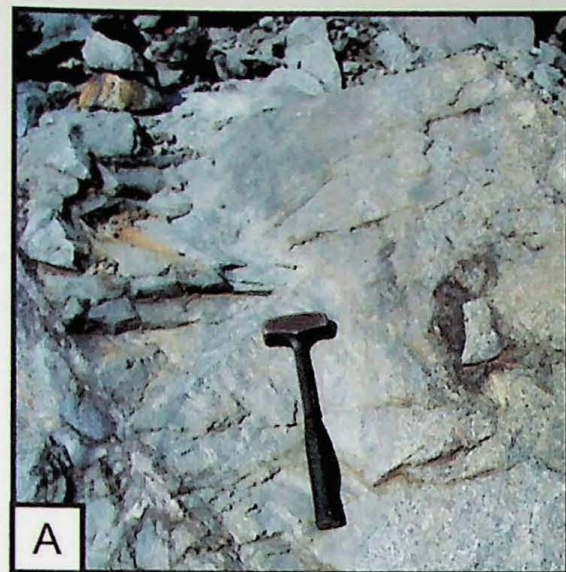
**Foto D:** Enclaves microgranulares félsicos de composição fonolítica dentro no nefelina sienito de granulação mais grossa. Notar a forma arredondada. *In situ.*

**Foto E:** Enclave microgranular máfico, de forma ovalar e arestas algo angulosas. Bordejado por nefelina sienito muito fino de forma arredondada. Inserido no nefelina sienito mais fino, na zona de contato com a fácies grosseira. *In situ.*

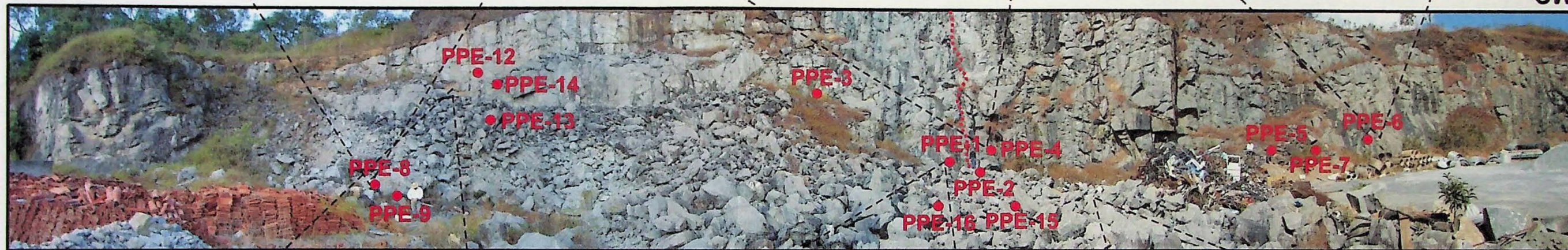
**Foto F:** Detalhe do contato entre as duas fácies de nefelina sienitos. Observar que o contato é brusco, porém irregular, e comumente possui bolsões micro-pegmatíticos associados. *Bloco rolado.*



Prancha I



NE



SW

0 5 10m









**Prancha II:** Foto panorâmica da frente da Pedreira da Prefeitura. Destaque para os principais tipos de enclaves, suas feições características e o contexto no qual estão inseridos.

**Foto A:** Amostra PPE-1B. A escala gráfica corresponde a 1,0 cm. Enclave microgranular máfico, de faces angulosas e aspecto "porfirítico", bordejado por nefelina sienito muito fino, de forma arredondada. Inserido na zona de contato entre as diferentes fácies de nefelina sienito. Observar o aspecto "manchado" da encaixante, caracterizado pelo aumento da granulometria e/ou coloração do feldspato. Amostrado *in situ*.

**Foto B:** Enclave microgranular máfico com macrocristais de piroxênio, dando aspecto "porfirítico", e bordas angulosas. Bordejado por nefelina sienito muito fino. Inserido na fácies de granulação mais fina. Em bloco rolado.

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

**Foto D:** Enclave microgranular félsico, de forma e bordas arredondadas. Inserido no nefelina sienito mais grosso. *In situ*.

**Foto E:** Amostra PPE-5B. A escala gráfica corresponde a 1,0 cm. Enclave microgranular máfico, sem megacristais e equigranular. Possui formas arredondadas, ovalares. Inserido no nefelina sienito de granulação fina. Amostrado em bloco rolado.

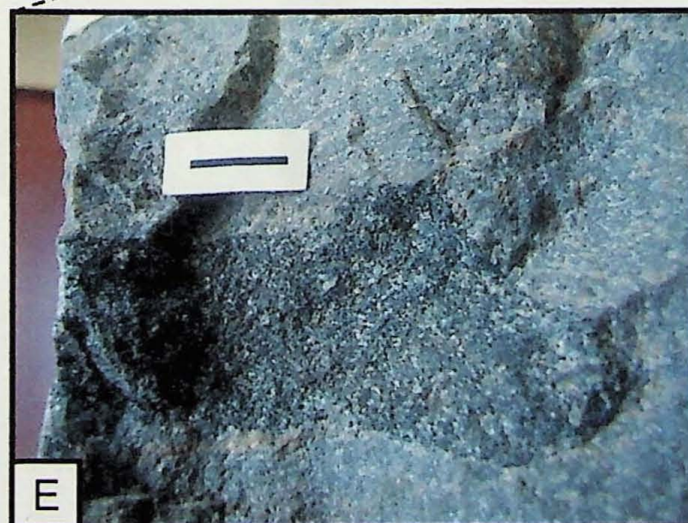


Prancha II



NE

SW





# Prancha III

Prancha III: Fotomicrografias ilustrativas de algumas das principais características mineralógicas e texturais das nefelinas da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas (ver também descrições no item 3.2).

Foto A: Lâmina PPE-4A. Luz plano-polarizada. Cristais da feldspato potássico tabular (mas arredados, de aspecto "arborescente") formando interstícios preenchidos por clinopiroxênio verde-oliva fibroso de geração tardia. Nota-se o proeminente interstício também a nefelina (cristais menores, mais "limpidez").

Foto B: Lâmina PPE-6B. Luz plano-polarizada. Cristais subidiomórficos de clinopiroxênio verde-oliva com núcleo irregular de aspecto conchoidal, de tonalidade rosada. As manchas mais amareladas do piroxênio rosado em suas bordas, mais externas, correspondem à exsolução de rutila. Nota-se o aspecto polilítico da borda verde-oliva, com inclusões de nefelina e magnetita.

Foto C: Lâmina PPE-1B. Luz plano-polarizada. Aglomerado de minerais máficos, com clinopiroxênio (verde prismático), feldspato (rosado amarelado a rosado pálido) e magnetita (opaca). Nota-se a magnetita comumente encontrada inclusa no clinopiroxênio verde-oliva e feldspato, esta em contato com as bordas do piroxênio.

Foto D: Lâmina PPE-1B. Luz plano-polarizada. Cristais idiomórficos de clinopiroxênio verde-oliva com núcleo de piroxênio incolor. Nota-se os contornos cristais xenomórficos e o aspecto polilítico nas bordas do cristal. As inclusões na borda são de nefelina subidiomórfica, com arestas parcialmente corroídas.

Foto E: Lâmina PPE-4A. Polarizadores cruzados. Textura polilítica típica dos nefelinas, com inclusões de nefelina (pequenos grãos subidiomórficos), feldspato potássico (cristais, com geminação simples de Calhadinha) e inclusões de magnetita (pequenos grãos subidiomórficos).

Foto F: Lâmina PPE-6B. Luz plano-polarizada. Glomérulo de minerais máficos em nefelina, com inclusões de magnetita (opaca). É composto por clinopiroxênio (verde-oliva) de granulação menor, rosado com borda verde-oliva, maior magnetita (opaca), nefelina e feldspato (incolor). Nota-se este glomérulo possui um aspecto muito similar ao observado em enclaves microgranulares máfico-ultramáficas do tipo I, como megacristais rosados de borda verde-oliva, acúmulo de opacos e clinopiroxênio verde-oliva xenomórfico abundante.



### Prancha III

**Prancha III:** Fotomicrografias ilustrativas de algumas das principais características mineralógicas e texturais dos nefelina sienitos da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas (ver também descrições no item 3.2).

**Foto A:** Lâmina PPE-4Aa. Luz plano-polarizada. Cristais de feldspato potássico tabular (mais alterados, de aspecto "sujo") formando interstícios preenchidos por clinopiroxênio verde-oliva fibroso de geração tardia. Notar que o piroxênio é intersticial também à nefelina (cristais menores, mais "límpida").

**Foto B:** Lâmina PPE-6b. Luz plano-polarizada. Cristal subidiomórfico de clinopiroxênio verde-oliva com núcleo irregular, de aspecto corroído, de tonalidade rosada. As manchas mais amarronzadas do piroxênio róseo, em suas porções mais externas, correspondem à exsolução de rutilo. Notar o aspecto poiquilítico da borda verde-oliva, com inclusões de nefelina e magnetita.

**Foto C:** Lâmina PPE-1Ba. Luz plano-polarizada. Aglomerado de minerais máficos, com clinopiroxênio (verde, prismático), titanita (rósea amarelada a rósea pálida) e magnetita (opaca). Notar que a magnetita comumente encontra-se inclusa no clinopiroxênio verde-oliva e titanita está em contato com as bordas do piroxênio.

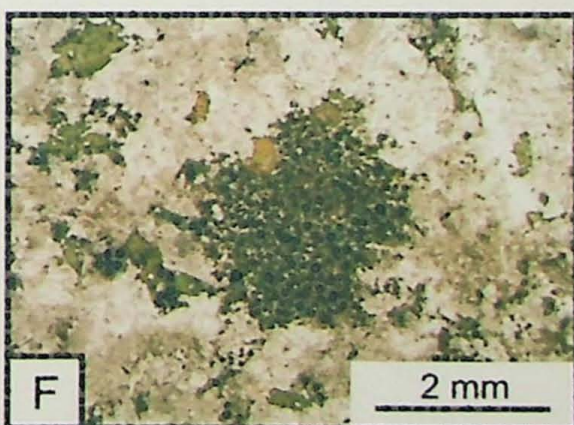
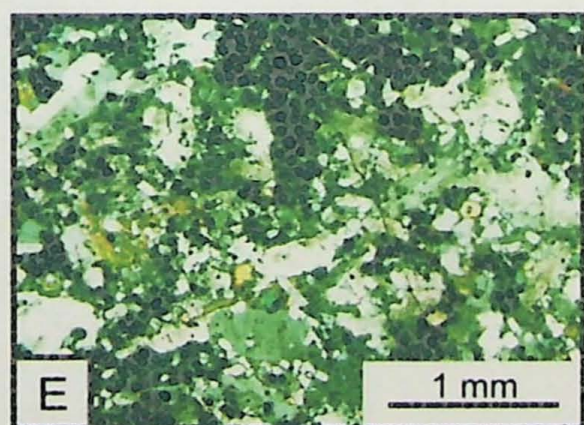
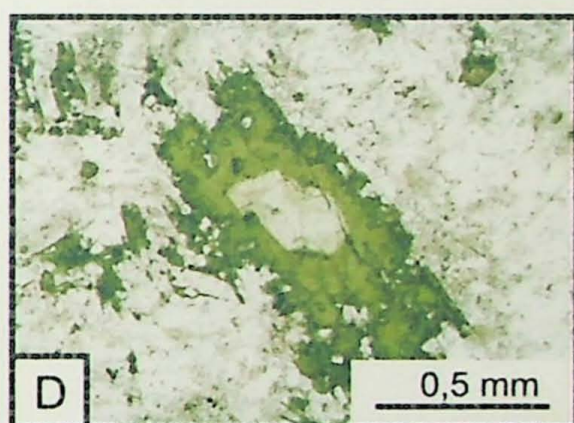
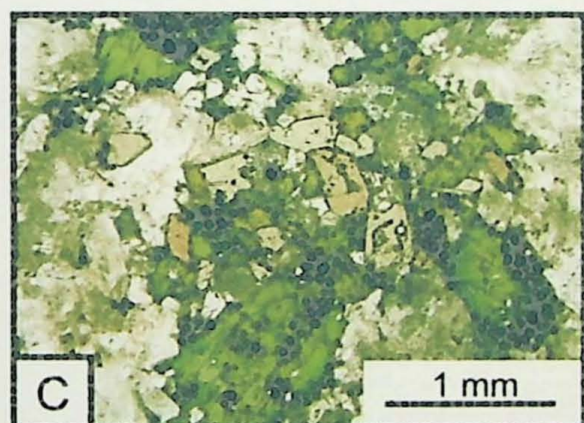
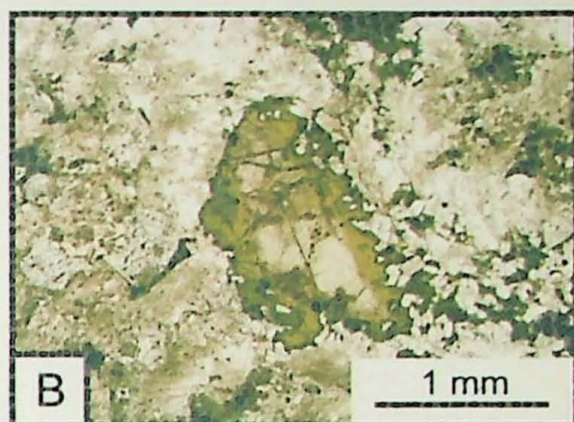
**Foto D:** Lâmina PPE-1Ba. Luz plano-polarizada. Cristal idiomórfico de clinopiroxênio verde-oliva com núcleo de piroxênio incolor. Notar os contornos cristalinos xenomórficos e o aspecto poiquítico nas bordas do cristal. As inclusões na borda são de nefelina subidiomórfica, com arestas parcialmente corroídas.

**Foto E:** Lâmina PPE-4Aa. Polarizadores cruzados. Textura poiquilítica típica dos nefelina sienitos de granulação mais fina. Grãos maiores ripiformes a tabulares de feldspato potássico (cinzentos, com geminação simples de Carlsbad) ricos em diminutas inclusões de nefelina (pequenos grãos subidiomórficos).

**Foto F:** Lâmina PPE-6b. Luz plano-polarizada. Glomérulo de minerais máficos em nefelina sienito de granulação fina-média. É composto por clinopiroxênio (verde-oliva, de granulação menor, róseo com borda verde-oliva, maior, magnetita (opaca), nefelina e feldspato (incolores). Notar que este glomérulo possui um aspecto muito similar ao observado em enclaves microgranulares máfico-ultramáficos de tipo I, como megacristais róseos de borda verde-oliva, acúmulo de opacos e clinopiroxênio verde-oliva xenomórfico abundante.



Prancha III





**Prancha IV:** Fotomicrografias ilustrativas de algumas das principais características mineralógicas e texturais dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficas da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas (ver também descrições no item 3.2).

## Prancha IV

**Foto A:** Lâmina PC-18 (colóquio de luz polarizada). Enclave do Tipo I com macrocristais idiomórficos de clinopiroxênio rosado. Apresenta heterogeneidades como acúmulo de minerais físisos em bordas (incolores) e acúmulo de opacos (denunciado pelas manchas de cor preto-esverdeada). Nota-se também que os opacos se concentram mais nas proximidades dos macrocristais rosados de clinopiroxênio.

**Foto B:** Lâmina PPE-5B (Luz plano-polarizada). Enclave do Tipo II, lamético fino, equigranular. Nota-se como os clinopiroxênios da borda do enclave adquirem tons mais intensos de verde-oliva.

**Foto C:** Luz plano-polarizada. Enclave do Tipo I. Macrocristais de clinopiroxênio rosado e incolor em matriz com direção verde-oliva. Observar cristal maior com núcleo irregular de aspecto corroído, incolor e ao lado clinopiroxênio incolor com uma fina borda rosada.

**Foto D:** Luz plano-polarizada. Enclave do Tipo I. Borda do enclave com a nefelina sintética da granulação fina a média. A porção do enclave no canto inferior da foto corresponde a uma parte rosada do enclave.

**Foto E:** Polarizadores cruzados. Enclave do Tipo I. Macrocristais idiomórficos de tipo-anguita, apresentando geminação simples, extinção anômala (azul, verde) e zoneamento composicional acompanhando as faces de crescimento.

**Foto F:** Luz plano-polarizada. Enclave do Tipo I. No centro da foto, macrocristal de clinopiroxênio rosado na borda do enclave, com exsolução de rutílio, inclusões de magnetita e núcleo mais claro. Apresenta-se fortemente corroído e com bordas de clinopiroxênio verde-oliva.

**Foto G:** Luz plano-polarizada. Enclave do Tipo I. Pseudomorfismo de provável clinopiroxênio com acúmulo de opacos e clinopiroxênio verde-oliva em sua borda, marcado pela cor verde-oliva mais intensa e manchas pretas.

**Foto H:** Luz plano-polarizada. Enclave do Tipo II. Cristais de clinopiroxênio verde-oliva levemente zonados e apatita (relievo mais alto, incolor e prismático). Intercrescimento é eles tem-se um aglomerado de clinopiroxênio verde de granulação fina (finos xenomórficos).



**Prancha IV:** Fotomicrografias ilustrativas de algumas das principais características mineralógicas e texturais dos enclaves microgranulares máfico-ultramáficos da Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas (ver também descrições no item 3.2).

**Foto A:** Lâmina PC-19 (coleção do orientador). Luz plano-polarizada. Enclave do Tipo I, com macrocristais prismáticos de clinopiroxênio róseo. Apresenta heterogeneidades como acúmulo de minerais félsicos em bolsões (incolores) e acúmulo de opacos (denunciado pelas manchas de cor preto-esverdeada). Notar, também, que os opacos se contram mais nas proximidades dos macrocristais róseos de clinopiroxênio.

**Foto B:** Lâmina PPE-5Bb. Luz plano-polarizada. Enclave do Tipo II, fanerítico fino, equigranular. Notar como os clinopiroxênios da borda do enclave adquirem tons mais intensos de verde-oliva.

**Foto C:** Luz plano-polarizada. Enclave do Tipo I. Macrocristais de clinopiroxênio róseo e incolor em matriz com piroxênio verde-oliva. Observar cristal maior com núcleo irregular de aspecto corroído, incolor e ao lado clinopiroxênio incolor com uma fina borda rosada.

**Foto D:** Luz plano-polarizada. Enclave do Tipo I. Borda do enclave com o nefelina sienito de granulação fina a média. A porção do enclave no canto inferior da foto corresponde à uma parte rompida do enclave.

**Foto E:** Polarizadores cruzados. Enclave do Tipo I. Macrocristais idiomórficos de "titano-augita", apresentando geminação simples, extinção anômala (azul *jeans*) e zoneamento composicional acompanhando as faces de crescimento.

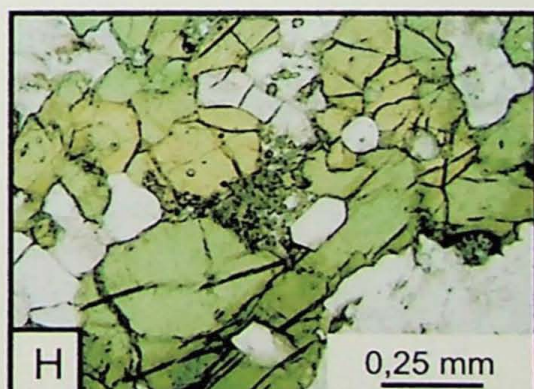
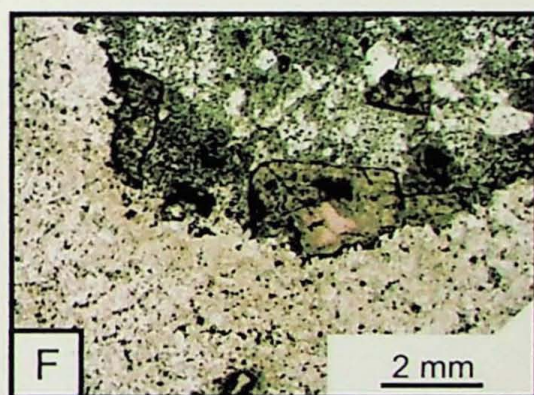
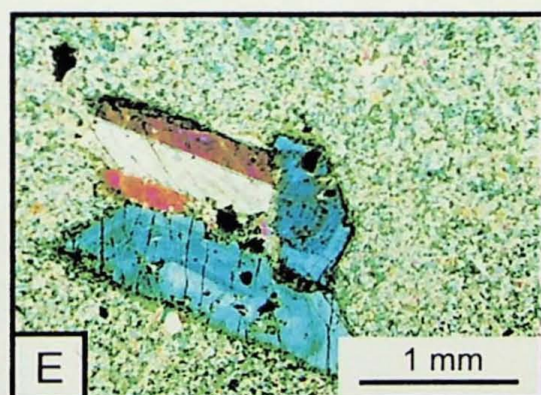
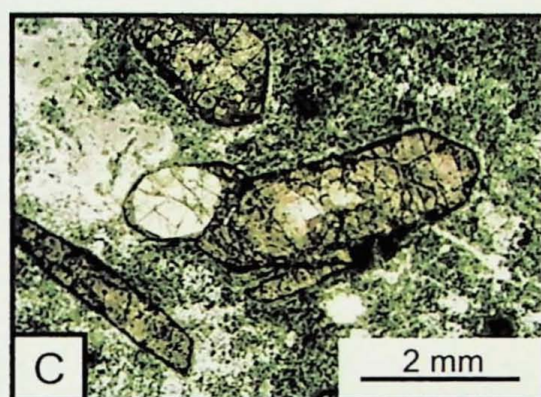
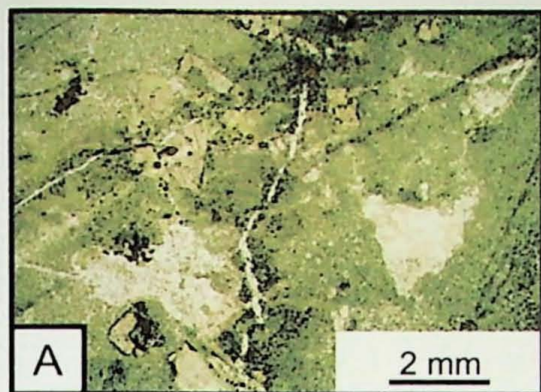
**Foto F:** Luz plano-polarizada. Enclave do Tipo I. No centro da foto. macrocristal de clinopiroxênio róseo na borda do enclave, com exsolução de rutilo, inclusões de magnetita e núcleo mais claro. Apresenta-se fortemente corroído e com bordas de clinopiroxênio verde-oliva.

**Foto G:** Luz plano-polarizada. Enclave do Tipo I. Pseudomorfo de provável clinopiroxênio com acúmulo de opacos e clinopiroxênio verde-oliva em sua borda, marcado pela cor verde-oliva mais intensa e manchas pretas.

**Foto H:** Luz plano-polarizada. Enclave do Tipo II. Cristais de clinopiroxênio verde-oliva levemente zonados e apatita (relevo mais alto, incolor e prismática). Intersticialmente à eles, tem-se um agregado de clinopiroxênio verde, de granulometria mais fina, xenomórfico.



Prancha IV





## 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.

### Abreviações utilizadas neste anexo:

#### Pontos

- identificação do ponto: número;
- para localização dos pontos: B – borda do grão, Z – zona intermediária entre borda e núcleo, N – núcleo do grão;
- para tonalidade na imagem BSE-Compo: esc – zonas escuras, cl – zonas claras.

#### Óxidos

- Fe (total) indicado como FeO após o total de óxidos.
- < l.d. – valores abaixo do limite de detecção do aparelho analítico.
- na – não analisado.

#### Cátions

Soma Cát. – Soma dos cátions por fórmula unitária.

Para o piroxênio:

- T – indica os cátions de coordenação tetraédrica;
- M1 – indica os cátions de coordenação octaédrica regular, presentes no sítio M1;
- M2 – indica os cátions de coordenação octaédrica distorcida, presentes no sítio M2.

Para o feldspato:

- Z – Somatória de Si, Al e Fe<sup>3+</sup>;
- X – Somatória de Ti, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ba e Sr.

#### Moléculas

Para o piroxênio: Q – Ca + Mg + Fe<sup>2+</sup> e J – 2Na, Wo – wollastonita, En – enstatita, Fs – ferrossilita, WEF – Wo-En-Fs, Jd – Jadeíta, Ae – egrina.

Para o feldspato: Ab – albita, An – anortita, Or – ortoclásio.

Para a nefelina: Qz – SiO<sub>2</sub>, Ne – nefelina, Ks – kalsilita.



**Tabela 1: Análises químicas representativas de piroxênios dos  
Nefelina sienitos da Pedreira da Prefeitura.**

| Amostra                                                     | Nefelina Sienito médio-fino a fino                    |           |           |           |           | Nefelina Sienito médio-grosso a grosso |          |          |         |         |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------------------|----------|----------|---------|---------|
|                                                             | PPE-6b                                                |           |           |           |           | PPE-8A                                 |          |          |         |         |
|                                                             | Piroxênio prismático com núcleo incolor e borda verde |           |           |           |           | Piroxênio prismático zonado            |          |          | fibroso | fibrosa |
|                                                             | 7                                                     |           |           |           |           | 10                                     |          |          | Z       | Z       |
| Descrição                                                   | 1 - N esc                                             | 3 - N esc | 5 - Z esc | p7 - B cl | 10 - B cl | 1 - N esc                              | 3 - Z cl | 6 - B cl |         |         |
| Cristal                                                     |                                                       |           |           |           |           |                                        |          |          |         |         |
| Ponto                                                       |                                                       |           |           |           |           |                                        |          |          |         |         |
| Óxidos (% em peso)                                          |                                                       |           |           |           |           |                                        |          |          |         |         |
| SiO <sub>2</sub>                                            | 50,62                                                 | 48,84     | 50,48     | 48,59     | 50,34     | 49,86                                  | 50,37    | 50,76    | 51,30   | 51,89   |
| TiO <sub>2</sub>                                            | 1,57                                                  | 1,43      | 1,40      | 1,52      | 1,77      | 1,06                                   | 0,72     | 2,26     | 2,76    | 3,33    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 3,41                                                  | 2,65      | 3,26      | 2,88      | 0,70      | 2,06                                   | 1,53     | 0,65     | 0,76    | 0,76    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 3,55                                                  | 6,12      | 3,51      | 5,99      | 21,58     | 5,16                                   | 6,70     | 21,83    | 23,98   | 22,36   |
| FeO                                                         | 1,36                                                  | 6,94      | 0,67      | 6,67      | 5,64      | 7,62                                   | 9,18     | 4,48     | 4,35    | 4,48    |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 0,22                                                  | < l.d.    | 0,53      | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.                                 | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.  | < l.d.  |
| MnO                                                         | 0,04                                                  | 0,97      | 0,04      | 1,00      | 1,02      | 1,03                                   | 1,34     | 1,02     | 0,88    | 1,17    |
| MgO                                                         | 15,69                                                 | 9,54      | 15,43     | 9,83      | 1,57      | 9,89                                   | 8,29     | 1,89     | 0,72    | 0,67    |
| CaO                                                         | 24,37                                                 | 22,01     | 24,39     | 21,64     | 5,46      | 21,37                                  | 20,55    | 4,99     | 2,33    | 2,00    |
| Na <sub>2</sub> O                                           | 0,27                                                  | 1,43      | 0,47      | 1,41      | 9,90      | 1,50                                   | 2,00     | 10,37    | 11,79   | 12,07   |
| K <sub>2</sub> O                                            | < l.d.                                                | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.                                 | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.  | < l.d.  |
| ZnO                                                         | < l.d.                                                | < l.d.    | < l.d.    | 0,06      | < l.d.    | 0,01                                   | < l.d.   | 0,01     | 0,06    | 0,06    |
| ZrO <sub>2</sub>                                            | < l.d.                                                | 0,14      | < l.d.    | 0,09      | 1,08      | 0,14                                   | 0,19     | 1,07     | 0,71    | 0,73    |
| Total                                                       | 101,14                                                | 100,09    | 100,17    | 99,70     | 99,11     | 99,71                                  | 100,91   | 99,33    | 99,63   | 99,51   |
| FeO                                                         | 4,56                                                  | 12,45     | 3,83      | 12,06     | 25,06     | 12,26                                  | 15,21    | 24,12    | 25,92   | 24,59   |
| Fórmula Estrutural (Base em 4 cátions totais e 6 oxigênios) |                                                       |           |           |           |           |                                        |          |          |         |         |
| TSi                                                         | 1,843                                                 | 1,864     | 1,852     | 1,857     | 1,980     | 1,904                                  | 1,922    | 1,981    | 1,990   | 2,008   |
| TAL                                                         | 0,146                                                 | 0,119     | 0,141     | 0,130     | 0,020     | 0,093                                  | 0,069    | 0,019    | 0,010   | 0,000   |
| TFe <sup>3+</sup>                                           | 0,011                                                 | 0,017     | 0,008     | 0,013     | 0,000     | 0,004                                  | 0,009    | 0,000    | 0,000   | 0,000   |
| M1Al                                                        | 0,000                                                 | 0,000     | 0,000     | 0,000     | 0,013     | 0,000                                  | 0,000    | 0,010    | 0,025   | 0,035   |
| M1Ti                                                        | 0,043                                                 | 0,041     | 0,039     | 0,044     | 0,052     | 0,030                                  | 0,021    | 0,066    | 0,080   | 0,097   |
| M1Fe <sup>3+</sup>                                          | 0,086                                                 | 0,158     | 0,089     | 0,159     | 0,638     | 0,144                                  | 0,183    | 0,640    | 0,699   | 0,650   |
| M1Fe <sup>2+</sup>                                          | 0,013                                                 | 0,221     | 0,014     | 0,213     | 0,186     | 0,243                                  | 0,293    | 0,146    | 0,141   | 0,145   |
| M1Cr                                                        | 0,006                                                 | 0,000     | 0,015     | 0,001     | 0,000     | 0,000                                  | 0,000    | 0,000    | 0,000   | 0,000   |
| M1Mg                                                        | 0,851                                                 | 0,543     | 0,843     | 0,560     | 0,092     | 0,563                                  | 0,472    | 0,110    | 0,042   | 0,039   |
| M1Ni                                                        | 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   |
| M2Fe <sup>2+</sup>                                          | 0,028                                                 | 0,000     | 0,007     | 0,000     | 0,000     | 0,000                                  | 0,000    | 0,000    | 0,000   | 0,000   |
| M2Mn                                                        | 0,001                                                 | 0,031     | 0,001     | 0,032     | 0,034     | 0,033                                  | 0,043    | 0,034    | 0,029   | 0,038   |
| M2Ca                                                        | 0,951                                                 | 0,900     | 0,958     | 0,886     | 0,230     | 0,874                                  | 0,840    | 0,209    | 0,097   | 0,083   |
| M2Na                                                        | 0,019                                                 | 0,106     | 0,033     | 0,104     | 0,755     | 0,111                                  | 0,148    | 0,784    | 0,887   | 0,906   |
| M2K                                                         | 0,001                                                 | 0,000     | 0,000     | 0,000     | 0,000     | 0,001                                  | 0,000    | 0,000    | 0,000   | 0,000   |
| Soma Cát.                                                   | 3,999                                                 | 4,000     | 4,000     | 4,000     | 4,000     | 3,999                                  | 4,000    | 4,000    | 4,000   | 4,000   |
| mg#                                                         | 0,954                                                 | 0,976     | 0,710     | 0,638     | 0,332     | 0,698                                  | 0,617    | 0,429    | 0,227   | 0,211   |
| Na                                                          | 2,083                                                 | 11,765    | 3,675     | 11,441    | 70,759    | 11,684                                 | 15,481   | 72,998   | 80,710  | 80,319  |
| Mg                                                          | 93,311                                                | 60,266    | 93,875    | 61,606    | 8,622     | 59,263                                 | 49,372   | 10,242   | 3,822   | 3,457   |
| Fe <sup>2+</sup> +Mn                                        | 4,605                                                 | 27,969    | 2,450     | 26,953    | 20,619    | 29,053                                 | 35,146   | 16,760   | 15,469  | 16,223  |
| Moléculas                                                   |                                                       |           |           |           |           |                                        |          |          |         |         |
| Q                                                           | 1,843                                                 | 1,664     | 1,823     | 1,660     | 0,508     | 1,680                                  | 1,605    | 0,465    | 0,279   | 0,266   |
| J                                                           | 0,039                                                 | 0,211     | 0,067     | 0,209     | 1,510     | 0,221                                  | 0,296    | 1,569    | 1,774   | 1,812   |
| Wo                                                          | 48,949                                                | 48,095    | 49,903    | 47,536    | 19,492    | 46,951                                 | 45,659   | 18,314   | 9,596   | 8,676   |
| En                                                          | 43,847                                                | 29,002    | 43,917    | 30,063    | 7,821     | 30,236                                 | 25,632   | 9,650    | 4,122   | 4,064   |
| Fs                                                          | 7,204                                                 | 22,902    | 6,180     | 22,401    | 72,687    | 22,813                                 | 28,709   | 72,037   | 86,282  | 87,260  |
| WEF                                                         | 97,946                                                | 88,923    | 96,478    | 89,012    | 26,404    | 88,561                                 | 84,764   | 24,113   | 14,800  | 14,406  |
| Jd                                                          | 0,000                                                 | 0,000     | 0,000     | 0,000     | 1,416     | 0,000                                  | 0,000    | 1,197    | 2,927   | 4,333   |
| Ae                                                          | 2,054                                                 | 11,077    | 3,522     | 10,988    | 72,180    | 11,439                                 | 15,236   | 74,691   | 82,272  | 81,261  |



**Tabela 2:** Análises químicas quantitativas representativas de piroxênio do enclave Tipo I.

| Amostra                                                     | Enclave Tipo I                                                     |           |           |           |           |                                                 |           |           |           |           |          |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
|                                                             | PC-19                                                              |           |           |           |           |                                                 |           |           |           |           |          |
|                                                             | Macrocrystal de piroxênio com núcleo incolor e borda rósea a verde |           |           |           |           | macrocrystal de piroxênio róseo com borda verde |           |           |           |           |          |
|                                                             | Cristal                                                            | 1         |           |           |           |                                                 | 3         |           |           |           |          |
| Ponto                                                       | 1 - N esc                                                          | 4 - N esc | 6 - Z esc | 10 - B cl | 17 - B cl | 1 - N esc                                       | 2 - N esc | 3 - N esc | 4 - Z esc | 5 - Z esc | 6 - B cl |
| Óxidos (% em peso)                                          |                                                                    |           |           |           |           |                                                 |           |           |           |           |          |
| SiO <sub>2</sub>                                            | 51,46                                                              | 50,32     | 51,04     | 44,05     | 50,60     | 48,68                                           | 48,87     | 47,44     | 48,18     | 48,03     | 53,24    |
| TiO <sub>2</sub>                                            | 1,08                                                               | 1,37      | 1,23      | 4,17      | 0,62      | 2,49                                            | 2,52      | 2,94      | 2,58      | 2,39      | 0,74     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 2,36                                                               | 3,31      | 2,82      | 7,47      | 1,05      | 4,54                                            | 4,25      | 5,70      | 4,29      | 4,69      | 1,82     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 3,17                                                               | 3,63      | 3,37      | 8,00      | 7,71      | 3,51                                            | 3,83      | 3,30      | 3,84      | 5,73      | 2,95     |
| FeO                                                         | 1,47                                                               | 1,98      | 1,79      | 0,60      | 8,16      | 3,64                                            | 3,62      | 4,51      | 3,42      | 0,97      | 1,05     |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 0,27                                                               | 0,23      | 0,28      | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.                                          | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.    | 0,62     |
| MnO                                                         | 0,04                                                               | 0,07      | 0,04      | 0,35      | 1,29      | 0,18                                            | 0,14      | 0,10      | 0,13      | 0,17      | 0,11     |
| MgO                                                         | 16,27                                                              | 15,49     | 15,88     | 11,70     | 8,13      | 13,58                                           | 13,61     | 12,87     | 13,70     | 13,45     | 16,43    |
| CaO                                                         | 23,81                                                              | 23,55     | 23,75     | 22,30     | 19,43     | 23,61                                           | 23,36     | 22,87     | 22,92     | 23,19     | 23,12    |
| Na <sub>2</sub> O                                           | 0,32                                                               | 0,34      | 0,35      | 1,29      | 2,63      | 0,48                                            | 0,60      | 0,55      | 0,56      | 1,01      | 0,91     |
| K <sub>2</sub> O                                            | < l.d.                                                             | < l.d.    | < l.d.    | 0,03      | 0,03      | < l.d.                                          | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.    | 0,02      | < l.d.   |
| ZnO                                                         | < l.d.                                                             | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.    | 0,08      | < l.d.                                          | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.   |
| ZrO <sub>2</sub>                                            | < l.d.                                                             | < l.d.    | 0,08      | 0,07      | 0,22      | 0,07                                            | 0,09      | 0,05      | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.   |
| Total                                                       | 100,26                                                             | 100,29    | 100,62    | 100,02    | 99,97     | 100,77                                          | 100,92    | 100,32    | 99,68     | 99,72     | 100,98   |
| FeO                                                         | 4,33                                                               | 5,24      | 4,82      | 7,80      | 15,10     | 6,79                                            | 7,07      | 7,48      | 6,88      | 6,13      | 3,70     |
| Fórmula Estrutural (Base em 4 cátions totais e 6 oxigênios) |                                                                    |           |           |           |           |                                                 |           |           |           |           |          |
| TSi                                                         | 1,883                                                              | 1,849     | 1,867     | 1,652     | 1,944     | 1,800                                           | 1,805     | 1,766     | 1,799     | 1,787     | 1,925    |
| TAL                                                         | 0,102                                                              | 0,143     | 0,121     | 0,330     | 0,048     | 0,198                                           | 0,185     | 0,234     | 0,189     | 0,206     | 0,075    |
| TFe <sup>3+</sup>                                           | 0,015                                                              | 0,007     | 0,012     | 0,018     | 0,008     | 0,003                                           | 0,010     | 0,000     | 0,012     | 0,007     | 0,000    |
| M1Al                                                        | 0,000                                                              | 0,000     | 0,000     | 0,000     | 0,000     | 0,000                                           | 0,000     | 0,016     | 0,000     | 0,000     | 0,002    |
| M1Ti                                                        | 0,030                                                              | 0,038     | 0,034     | 0,118     | 0,018     | 0,069                                           | 0,070     | 0,082     | 0,072     | 0,067     | 0,020    |
| M1Fe <sup>3+</sup>                                          | 0,072                                                              | 0,093     | 0,081     | 0,207     | 0,215     | 0,095                                           | 0,097     | 0,092     | 0,096     | 0,153     | 0,080    |
| M1Fe <sup>2+</sup>                                          | 0,003                                                              | 0,014     | 0,012     | 0,019     | 0,262     | 0,087                                           | 0,084     | 0,096     | 0,069     | 0,030     | 0,000    |
| M1Cr                                                        | 0,008                                                              | 0,007     | 0,008     | 0,000     | 0,000     | 0,000                                           | 0,000     | 0,000     | 0,000     | 0,001     | 0,018    |
| M1Mg                                                        | 0,888                                                              | 0,848     | 0,866     | 0,654     | 0,465     | 0,749                                           | 0,749     | 0,714     | 0,762     | 0,746     | 0,880    |
| M1Ni                                                        | 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     | 0,005    |
| M2Fe <sup>2+</sup>                                          | 0,042                                                              | 0,046     | 0,043     | 0,000     | 0,000     | 0,025                                           | 0,028     | 0,045     | 0,038     | 0,000     | 0,032    |
| M2Mn                                                        | 0,001                                                              | 0,002     | 0,001     | 0,011     | 0,042     | 0,006                                           | 0,004     | 0,003     | 0,004     | 0,005     | 0,003    |
| M2Ca                                                        | 0,934                                                              | 0,927     | 0,931     | 0,896     | 0,800     | 0,935                                           | 0,925     | 0,912     | 0,917     | 0,925     | 0,896    |
| M2Na                                                        | 0,023                                                              | 0,024     | 0,025     | 0,094     | 0,196     | 0,034                                           | 0,043     | 0,039     | 0,041     | 0,073     | 0,064    |
| M2K                                                         | 0,000                                                              | 0,000     | 0,000     | 0,001     | 0,001     | 0,000                                           | 0,000     | 0,000     | 0,000     | 0,001     | 0,001    |
| Soma Cát.                                                   | 4,000                                                              | 4,000     | 4,000     | 3,999     | 3,999     | 4,000                                           | 4,000     | 4,000     | 4,000     | 3,999     | 3,999    |
| mg#                                                         | 0,952                                                              | 0,933     | 0,941     | 0,972     | 0,941     | 0,869                                           | 0,870     | 0,836     | 0,877     | 0,961     | 0,966    |
| Na                                                          | 2,403                                                              | 2,570     | 2,640     | 12,082    | 20,311    | 3,774                                           | 4,736     | 4,348     | 4,486     | 8,548     | 6,504    |
| Mg                                                          | 92,790                                                             | 90,792    | 91,447    | 84,062    | 48,187    | 83,130                                          | 82,489    | 79,599    | 83,370    | 87,354    | 89,939   |
| Fe <sup>2+</sup> +Mn                                        | 4,807                                                              | 6,638     | 5,913     | 3,856     | 31,503    | 13,097                                          | 12,775    | 16,054    | 12,144    | 4,098     | 3,557    |
| Moléculas                                                   |                                                                    |           |           |           |           |                                                 |           |           |           |           |          |
| O                                                           | 1,867                                                              | 1,836     | 1,851     | 1,569     | 1,528     | 1,796                                           | 1,786     | 1,767     | 1,786     | 1,701     | 1,813    |
| J                                                           | 0,045                                                              | 0,048     | 0,050     | 0,188     | 0,392     | 0,068                                           | 0,085     | 0,079     | 0,082     | 0,145     | 0,128    |
| Wo                                                          | 47,763                                                             | 47,829    | 47,849    | 49,635    | 44,630    | 49,231                                          | 48,750    | 48,980    | 48,305    | 49,545    | 47,232   |
| En                                                          | 45,408                                                             | 43,759    | 44,511    | 36,212    | 25,965    | 39,415                                          | 39,505    | 38,341    | 40,165    | 39,964    | 46,702   |
| Fs                                                          | 6,829                                                              | 8,412     | 7,640     | 14,154    | 29,404    | 11,354                                          | 11,745    | 12,679    | 11,531    | 10,491    | 6,065    |
| WEF                                                         | 97,633                                                             | 97,447    | 97,375    | 89,373    | 80,035    | 96,351                                          | 95,448    | 95,729    | 95,644    | 92,159    | 93,436   |
| Jd                                                          | 0,000                                                              | 0,000     | 0,000     | 0,000     | 0,000     | 0,000                                           | 0,000     | 0,625     | 0,000     | 0,000     | 0,155    |
| Ae                                                          | 2,367                                                              | 2,553     | 2,625     | 10,627    | 19,965    | 3,649                                           | 4,552     | 3,645     | 4,356     | 7,841     | 6,409    |



**Tabela 2 (continuação): Análises químicas quantitativas  
representativas de piroxênio do enclave Tipo I.**

| Amostra<br>Descrição<br>Cristal<br>Ponto                    | Enclave Tipo I                     |           |          |          |          |                     |           |           |                     |          |           |          |          |  |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|---------------------|-----------|-----------|---------------------|----------|-----------|----------|----------|--|
|                                                             | PPE-7Aa                            |           |          |          |          | PPE-7Aa             |           |           | PPE-18g             |          |           |          |          |  |
|                                                             | macrocristal róseo com borda verde |           |          |          |          | Piroxênio da matriz |           |           | Piroxênio da matriz |          |           |          |          |  |
|                                                             | 3                                  |           |          |          |          | 4                   |           |           | 4                   |          |           |          |          |  |
|                                                             | 1 - N esc                          | 2 - N esc | 3 - N cl | 4 - B cl | 5 - B cl | 1 - B cl            | 2 - B esc | 3 - N esc | 1 - B esc           | 2 - B cl | 3 - N esc | 4 - B cl | 5 - B cl |  |
| Óxidos (% em peso)                                          |                                    |           |          |          |          |                     |           |           |                     |          |           |          |          |  |
| SiO <sub>2</sub>                                            | 47,18                              | 47,43     | 44,93    | 44,78    | 49,64    | 49,91               | 49,69     | 49,26     | 49,46               | 48,93    | 48,90     | 49,63    | 49,18    |  |
| TiO <sub>2</sub>                                            | 2,49                               | 3,14      | 3,67     | 3,42     | 1,46     | 1,52                | 1,41      | 1,55      | 1,24                | 1,10     | 1,19      | 1,28     | 1,31     |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 5,48                               | 5,16      | 7,27     | 7,26     | 2,48     | 2,65                | 2,63      | 2,82      | 2,29                | 2,39     | 2,25      | 2,26     | 2,30     |  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 4,86                               | 5,02      | 6,04     | 6,02     | 4,73     | 6,37                | 6,37      | 5,98      | 4,84                | 5,65     | 5,92      | 5,07     | 5,59     |  |
| FeO                                                         | 1,15                               | 0,92      | 1,09     | 2,77     | 7,27     | 5,96                | 5,82      | 5,04      | 5,34                | 6,88     | 6,13      | 6,66     | 6,57     |  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 0,30                               | < l.d.    | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.              | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.              | < l.d.   | < l.d.    | < l.d.   | < l.d.   |  |
| MnO                                                         | < l.d.                             | 0,11      | 0,10     | 0,38     | 0,83     | 0,75                | 0,89      | 0,70      | 0,74                | 1,00     | 0,87      | 0,79     | 0,81     |  |
| MgO                                                         | 14,19                              | 13,90     | 12,72    | 10,99    | 9,81     | 10,46               | 10,11     | 11,15     | 11,10               | 9,74     | 10,16     | 10,36    | 10,03    |  |
| CaO                                                         | 24,13                              | 24,91     | 24,46    | 23,19    | 21,71    | 22,09               | 21,73     | 22,05     | 21,86               | 21,41    | 21,46     | 21,79    | 21,41    |  |
| Na <sub>2</sub> O                                           | 0,28                               | 0,38      | 0,40     | 0,91     | 1,56     | 1,60                | 1,70      | 1,40      | 1,38                | 1,48     | 1,49      | 1,43     | 1,58     |  |
| K <sub>2</sub> O                                            | < l.d.                             | 0,02      | < l.d.   | < l.d.   | 0,03     | < l.d.              | 0,08      | < l.d.    | < l.d.              | < l.d.   | 0,04      | < l.d.   | < l.d.   |  |
| ZnO                                                         | < l.d.                             | 0,06      | < l.d.   | < l.d.   | 0,06     | < l.d.              | 0,06      | 0,09      | < l.d.              | < l.d.   | < l.d.    | 0,07     | 0,05     |  |
| ZrO <sub>2</sub>                                            | < l.d.                             | 0,10      | 0,11     | 0,10     | 0,19     | 0,19                | 0,11      | 0,21      | 0,11                | 0,16     | 0,20      | 0,15     | 0,13     |  |
| Total                                                       | 100,10                             | 101,17    | 100,82   | 99,87    | 99,75    | 101,56              | 100,59    | 100,23    | 98,39               | 98,82    | 98,63     | 99,53    | 98,99    |  |
| FeO                                                         | 5,52                               | 5,43      | 6,52     | 8,19     | 11,52    | 11,69               | 11,55     | 10,42     | 9,69                | 11,97    | 11,46     | 11,22    | 11,60    |  |
| Fórmula Estrutural (Base em 4 cátions totais e 6 oxigênios) |                                    |           |          |          |          |                     |           |           |                     |          |           |          |          |  |
| TSi                                                         | 1,749                              | 1,745     | 1,668    | 1,689    | 1,892    | 1,866               | 1,875     | 1,859     | 1,893               | 1,886    | 1,884     | 1,892    | 1,867    |  |
| TAL                                                         | 0,239                              | 0,223     | 0,318    | 0,311    | 0,108    | 0,117               | 0,117     | 0,125     | 0,103               | 0,108    | 0,102     | 0,102    | 0,104    |  |
| TFe <sup>3+</sup>                                           | 0,012                              | 0,031     | 0,014    | 0,000    | 0,000    | 0,017               | 0,008     | 0,016     | 0,003               | 0,006    | 0,014     | 0,006    | 0,009    |  |
| M1Al                                                        | 0,000                              | 0,000     | 0,000    | 0,011    | 0,004    | 0,000               | 0,000     | 0,000     | 0,000               | 0,000    | 0,000     | 0,000    | 0,000    |  |
| M1Ti                                                        | 0,069                              | 0,087     | 0,103    | 0,097    | 0,042    | 0,043               | 0,040     | 0,044     | 0,036               | 0,032    | 0,034     | 0,037    | 0,038    |  |
| M1Fe <sup>3+</sup>                                          | 0,124                              | 0,108     | 0,154    | 0,171    | 0,135    | 0,162               | 0,172     | 0,154     | 0,136               | 0,158    | 0,157     | 0,139    | 0,153    |  |
| M1Fe <sup>2+</sup>                                          | 0,014                              | 0,028     | 0,034    | 0,087    | 0,232    | 0,186               | 0,184     | 0,159     | 0,171               | 0,222    | 0,198     | 0,212    | 0,211    |  |
| M1Cr                                                        | 0,009                              | 0,001     | 0,000    | 0,001    | 0,000    | 0,000               | 0,000     | 0,000     | 0,000               | 0,001    | 0,000     | 0,001    | 0,000    |  |
| M1Mg                                                        | 0,784                              | 0,763     | 0,704    | 0,618    | 0,557    | 0,583               | 0,569     | 0,627     | 0,634               | 0,560    | 0,583     | 0,589    | 0,574    |  |
| 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    |  |
| 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    |  |
| M2Fe <sup>2+</sup>                                          | 0,021                              | 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                                                        | 0,000                              | 0,003     | 0,003    | 0,012    | 0,027    | 0,024               | 0,028     | 0,022     | 0,024               | 0,033    | 0,028     | 0,026    | 0,026    |  |
| M2Ca                                                        | 0,958                              | 0,982     | 0,973    | 0,937    | 0,887    | 0,885               | 0,879     | 0,891     | 0,896               | 0,884    | 0,886     | 0,890    | 0,880    |  |
| M2Na                                                        | 0,020                              | 0,027     | 0,029    | 0,066    | 0,115    | 0,116               | 0,125     | 0,102     | 0,103               | 0,111    | 0,111     | 0,106    | 0,117    |  |
| M2K                                                         | 0,001                              | 0,001     | 0,000    | 0,000    | 0,002    | 0,000               | 0,004     | 0,000     | 0,001               | 0,000    | 0,002     | 0,001    | 0,000    |  |
| Soma Cát.                                                   | 3,999                              | 3,999     | 4,000    | 4,000    | 3,998    | 4,000               | 3,996     | 4,000     | 3,999               | 4,000    | 3,998     | 3,999    | 4,000    |  |
| mg#                                                         |                                    |           |          |          |          |                     |           |           |                     |          |           |          |          |  |
| mg#                                                         | 0,957                              | 0,964     | 0,954    | 0,876    | 0,706    | 0,758               | 0,756     | 0,798     | 0,788               | 0,716    | 0,747     | 0,735    | 0,731    |  |
| Na                                                          | 2,384                              | 3,289     | 3,766    | 8,429    | 12,352   | 12,761              | 13,797    | 11,209    | 11,052              | 11,987   | 12,065    | 11,361   | 12,608   |  |
| Mg                                                          | 93,445                             | 92,935    | 91,429   | 78,927   | 59,828   | 64,136              | 62,804    | 68,901    | 68,026              | 60,475   | 63,370    | 63,130   | 61,853   |  |
| Fe <sup>2+</sup> +Mn                                        | 4,172                              | 3,776     | 4,805    | 12,644   | 27,820   | 23,102              | 23,400    | 19,890    | 20,923              | 27,538   | 24,565    | 25,509   | 25,539   |  |
| Moléculas                                                   |                                    |           |          |          |          |                     |           |           |                     |          |           |          |          |  |
| Q                                                           | 1,778                              | 1,773     | 1,711    | 1,642    | 1,676    | 1,654               | 1,631     | 1,678     | 1,701               | 1,666    | 1,667     | 1,691    | 1,665    |  |
| J                                                           | 0,040                              | 0,054     | 0,058    | 0,133    | 0,230    | 0,232               | 0,249     | 0,204     | 0,205               | 0,221    | 0,223     | 0,212    | 0,235    |  |
| Wo                                                          | 50,083                             | 51,279    | 51,689   | 51,336   | 48,239   | 47,654              | 47,754    | 47,673    | 48,085              | 47,485   | 47,465    | 47,797   | 47,515   |  |
| En                                                          | 40,979                             | 39,824    | 37,405   | 33,867   | 30,330   | 31,394              | 30,903    | 33,556    | 33,993              | 30,047   | 31,247    | 31,627   | 30,975   |  |
| Fs                                                          | 8,938                              | 8,897     | 10,906   | 14,796   | 21,431   | 20,952              | 21,342    | 18,771    | 17,921              | 22,468   | 21,288    | 20,576   | 21,510   |  |
| WEF                                                         | 97,786                             | 97,061    | 96,718   | 92,561   | 88,105   | 87,848              | 86,934    | 89,265    | 89,370              | 88,469   | 88,391    | 89,020   | 87,816   |  |
| Jd                                                          | 0,000                              | 0,000     | 0,000    | 0,456    | 0,316    | 0,000               | 0,000     | 0,000     | 0,000               | 0,000    | 0,000     | 0,000    | 0,000    |  |
| Ae                                                          | 2,214                              | 2,939     | 3,282    | 6,983    | 11,580   | 12,152              | 13,066    | 10,735    | 10,630              | 11,531   | 11,609    | 10,980   | 12,184   |  |



**Tabela 3:** Análises químicas quantitativas representativas de piroxênio do enclave Tipo II

| Amostra                                                     | Enclave Tipo II                       |           |           |          |          |          |          |          |                                        |           |          |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------------------------|-----------|----------|
|                                                             | PPE-5Bb                               |           |           |          |          |          |          |          |                                        |           |          |
|                                                             | Piroxênio da borda do enclave, zonado |           |           |          |          |          |          |          | piroxênio verde do interior do enclave |           |          |
|                                                             | Cristal                               | 3         |           |          |          |          |          |          |                                        |           |          |
| Ponto                                                       | 1 - N esc                             | 2 - N esc | 3 - N esc | 4 - Z cl | 5 - Z cl | 6 - B cl | 7 - B cl | 8 - B cl | 1 - N cl                               | 2 - B esc | 3 - N cl |
| SiO <sub>2</sub>                                            | 52,75                                 | 52,72     | 48,56     | 48,82    | 49,14    | 48,87    | 49,12    | 50,08    | 52,26                                  | 52,04     | 52,63    |
| TiO <sub>2</sub>                                            | 0,80                                  | 0,83      | 1,38      | 1,40     | 1,36     | 0,94     | 0,71     | 0,70     | 0,89                                   | 1,03      | 0,97     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 0,64                                  | 0,64      | 2,90      | 2,78     | 2,68     | 1,90     | 1,32     | 0,95     | 0,78                                   | 0,99      | 0,93     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | 6,59                                  | 6,04      | 6,69      | 6,15     | 6,02     | 7,41     | 8,93     | 10,15    | 6,15                                   | 5,21      | 4,89     |
| FeO                                                         | 5,84                                  | 6,69      | 6,71      | 7,44     | 7,65     | 8,74     | 10,69    | 10,20    | 5,92                                   | 5,15      | 5,68     |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                              | < l.d.                                | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.                                 | < l.d.    | < l.d.   |
| MnO                                                         | 0,55                                  | 0,61      | 0,81      | 1,07     | 1,02     | 1,30     | 1,81     | 1,73     | 0,54                                   | 0,52      | 0,47     |
| MgO                                                         | 11,47                                 | 11,32     | 9,60      | 9,37     | 9,32     | 7,79     | 5,65     | 5,33     | 11,89                                  | 12,55     | 12,08    |
| CaO                                                         | 19,69                                 | 19,37     | 21,50     | 21,66    | 21,79    | 20,52    | 18,68    | 16,82    | 21,16                                  | 21,55     | 21,06    |
| Na <sub>2</sub> O                                           | 2,52                                  | 2,48      | 1,55      | 1,44     | 1,47     | 1,96     | 2,79     | 3,79     | 1,84                                   | 1,62      | 1,98     |
| K <sub>2</sub> O                                            | < l.d.                                | < l.d.    | < l.d.    | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.                                 | < l.d.    | < l.d.   |
| ZnO                                                         | < l.d.                                | < l.d.    | 0,05      | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.   | 0,07     | 0,06     | < l.d.                                 | < l.d.    | < l.d.   |
| ZrO <sub>2</sub>                                            | < l.d.                                | < l.d.    | 0,14      | 0,08     | 0,11     | 0,15     | 0,31     | 0,26     | 0,12                                   | 0,07      | 0,06     |
| Total                                                       | 100,92                                | 100,77    | 99,91     | 100,24   | 100,58   | 99,61    | 100,09   | 100,07   | 101,58                                 | 100,74    | 100,75   |
| FeO                                                         | 11,77                                 | 12,12     | 12,72     | 12,98    | 13,07    | 15,41    | 18,73    | 19,33    | 11,45                                  | 9,84      | 10,08    |
| Fórmula Estrutural (Base em 4 cátions totais e 6 oxigênios) |                                       |           |           |          |          |          |          |          |                                        |           |          |
| TSi                                                         | 1,963                                 | 1,968     | 1,855     | 1,862    | 1,869    | 1,894    | 1,921    | 1,951    | 1,938                                  | 1,935     | 1,955    |
| TAL                                                         | 0,028                                 | 0,028     | 0,131     | 0,125    | 0,120    | 0,087    | 0,061    | 0,043    | 0,034                                  | 0,043     | 0,041    |
| TFe <sup>3+</sup>                                           | 0,009                                 | 0,004     | 0,014     | 0,013    | 0,012    | 0,019    | 0,018    | 0,006    | 0,028                                  | 0,022     | 0,005    |
| M1Al                                                        | 0,000                                 | 0,000     | 0,000     | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000                                  | 0,000     | 0,000    |
| M1Ti                                                        | 0,022                                 | 0,023     | 0,040     | 0,040    | 0,039    | 0,027    | 0,021    | 0,020    | 0,025                                  | 0,029     | 0,027    |
| M1Fe <sup>3+</sup>                                          | 0,175                                 | 0,165     | 0,178     | 0,163    | 0,161    | 0,197    | 0,245    | 0,292    | 0,144                                  | 0,124     | 0,132    |
| M1Fe <sup>2+</sup>                                          | 0,166                                 | 0,182     | 0,214     | 0,237    | 0,243    | 0,283    | 0,350    | 0,332    | 0,174                                  | 0,152     | 0,172    |
| M1Cr                                                        | 0,000                                 | 0,000     | 0,001     | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000                                  | 0,000     | 0,000    |
| M1Mg                                                        | 0,636                                 | 0,630     | 0,547     | 0,533    | 0,528    | 0,450    | 0,330    | 0,309    | 0,657                                  | 0,696     | 0,669    |
| M1Ni                                                        | 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    |
| M2Fe <sup>2+</sup>                                          | 0,016                                 | 0,027     | 0,000     | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,009                                  | 0,008     | 0,005    |
| M2Mn                                                        | 0,017                                 | 0,019     | 0,026     | 0,035    | 0,033    | 0,043    | 0,060    | 0,057    | 0,017                                  | 0,016     | 0,015    |
| M2Ca                                                        | 0,785                                 | 0,774     | 0,880     | 0,885    | 0,888    | 0,852    | 0,783    | 0,702    | 0,841                                  | 0,858     | 0,838    |
| M2Na                                                        | 0,182                                 | 0,179     | 0,114     | 0,107    | 0,108    | 0,147    | 0,212    | 0,287    | 0,132                                  | 0,117     | 0,142    |
| M2K                                                         | 0,000                                 | 0,000     | 0,000     | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,001                                  | 0,000     | 0,000    |
| Soma Cát.                                                   | 4,000                                 | 4,000     | 4,000     | 4,000    | 4,000    | 4,000    | 4,000    | 4,000    | 3,999                                  | 4,000     | 4,000    |
| mg#                                                         | 0,778                                 | 0,751     | 0,718     | 0,692    | 0,685    | 0,614    | 0,485    | 0,482    | 0,782                                  | 0,813     | 0,791    |
| Na                                                          | 17,896                                | 17,261    | 12,653    | 11,732   | 11,842   | 15,926   | 22,269   | 29,137   | 13,347                                 | 11,830    | 14,158   |
| Mn                                                          | 62,537                                | 60,752    | 60,710    | 58,443   | 57,895   | 48,754   | 34,664   | 31,371   | 66,431                                 | 70,374    | 66,700   |
| Fe <sup>2+</sup> +Mn                                        | 19,567                                | 21,986    | 26,637    | 29,825   | 30,263   | 35,320   | 43,067   | 39,492   | 20,222                                 | 17,796    | 19,143   |
| Moléculas                                                   |                                       |           |           |          |          |          |          |          |                                        |           |          |
| Q                                                           | 1,603                                 | 1,613     | 1,641     | 1,655    | 1,659    | 1,586    | 1,462    | 1,344    | 1,682                                  | 1,714     | 1,683    |
| J                                                           | 0,363                                 | 0,359     | 0,229     | 0,213    | 0,216    | 0,295    | 0,424    | 0,573    | 0,265                                  | 0,234     | 0,285    |
| Wo                                                          | 43,505                                | 42,990    | 47,324    | 47,422   | 47,612   | 46,220   | 43,855   | 41,347   | 44,967                                 | 45,749    | 45,686   |
| En                                                          | 35,252                                | 34,954    | 29,416    | 28,550   | 28,342   | 24,399   | 18,473   | 18,215   | 35,145                                 | 37,083    | 36,455   |
| Fs                                                          | 21,243                                | 22,056    | 23,261    | 24,028   | 24,046   | 29,382   | 37,672   | 40,438   | 19,889                                 | 17,168    | 17,860   |
| WEF                                                         | 81,674                                | 81,976    | 87,928    | 88,802   | 88,659   | 84,683   | 78,221   | 70,966   | 86,506                                 | 88,082    | 85,636   |
| Jd                                                          | 0,000                                 | 0,000     | 0,000     | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000                                  | 0,000     | 0,000    |
| Ae                                                          | 18,326                                | 18,024    | 12,072    | 11,198   | 11,341   | 15,337   | 21,779   | 29,034   | 13,494                                 | 11,918    | 14,364   |



**Tabela 4:** Análises químicas quantitativas representativas de titanita dos enclaves Tipo I e II e da rocha hospedeira.

| Amostra<br>Cristal<br>Ponto    | Nefelina sienito médio-grosso a grosso |          |          |           |          |           |           |           |           |          |          | Enclave Tipo II |          |           |           | Enclave Tipo I |  |  |  |
|--------------------------------|----------------------------------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------------|----------|-----------|-----------|----------------|--|--|--|
|                                | PPE-8A                                 |          |          |           |          |           |           |           |           |          |          | PPE-5Bb         |          |           |           | PPE-7Aa        |  |  |  |
|                                | 1 - B cl                               | 2 - B cl | 3 - B cl | 4 - B esc | 5 - Z cl | 6 - B esc | 7 - B esc | 8 - B esc | 1 - N esc | 2 - B cl | 3 - B cl | 4 - B esc       | 1 - B cl | 2 - N esc | 3 - B esc | 4 - N esc      |  |  |  |
| SiO <sub>2</sub>               | 28,695                                 | 28,351   | 29,464   | 29,194    | 29,231   | 29,545    | 28,892    | 29,368    | 29,449    | 28,991   | 29,48    | 30,408          | 29,549   | 29,394    | 29,992    | 30,243         |  |  |  |
| TiO <sub>2</sub>               | 34,793                                 | 33,235   | 34,789   | 33,185    | 34,871   | 32,928    | 33,788    | 33,693    | 33,036    | 31,570   | 31,825   | 38,678          | 35,974   | 36,817    | 35,588    | 35,071         |  |  |  |
| ZrO <sub>2</sub>               | 1,011                                  | 1,034    | 0,837    | 1,152     | 1,103    | 1,046     | 1,051     | 1,039     | 2,067     | 1,781    | 2,108    | 0,199           | 1,016    | 0,859     | 0,137     | 0,399          |  |  |  |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 1,277                                  | 1,163    | 1,156    | 1,370     | 1,225    | 1,067     | 0,681     | 0,750     | 3,463     | 3,171    | 3,128    | 0,625           | 0,792    | 0,697     | 0,369     | 0,425          |  |  |  |
| La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | na                                     | na       | na       | na        | na       | na        | 0,409     | 0,334     | 0,100     | 0,056    | 0,108    | 0,024           | 0,244    | 0,141     | <l.d.     | <l.d.          |  |  |  |
| Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,245                                  | 1,121    | 1,054    | 1,450     | 1,312    | 1,001     | 0,917     | 1,003     | 0,371     | 0,278    | 0,332    | <l.d.           | 0,704    | 0,269     | <l.d.     | <l.d.          |  |  |  |
| Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,559                                  | 0,641    | 0,634    | 0,566     | 0,433    | 0,520     | 0,585     | 0,315     | 0,098     | <l.d.    | 0,180    | <l.d.           | 0,181    | <l.d.     | 0,068     | <l.d.          |  |  |  |
| Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,065                                  | <l.d.    | 0,182    | 0,101     | <l.d.    | 0,252     | <l.d.     | 0,188     | <l.d.     | 0,078    | <l.d.    | <l.d.           | 0,069    | <l.d.     | <l.d.     | <l.d.          |  |  |  |
| Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,116                                  | <l.d.    | 0,116    | 0,073     | <l.d.    | <l.d.     | 0,169     | 0,050     | 0,065     | <l.d.    | <l.d.    | 0,182           | <l.d.    | <l.d.     | <l.d.     | <l.d.          |  |  |  |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0,178                                  | 0,098    | 0,159    | 0,142     | 0,113    | 0,070     | 0,106     | 0,127     | <l.d.     | 0,072    | <l.d.    | <l.d.           | 0,113    | 0,060     | <l.d.     | <l.d.          |  |  |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,951                                  | 0,981    | 0,960    | 0,929     | 0,936    | 0,968     | 1,200     | 1,119     | 0,509     | 0,484    | 0,496    | 0,069           | 0,856    | 0,770     | 1,531     | 0,911          |  |  |  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,946                                  | 1,846    | 1,881    | 2,116     | 1,933    | 2,312     | 2,297     | 2,434     | 2,363     | 2,480    | 2,273    | 0,277           | 1,539    | 1,302     | 1,646     | 1,340          |  |  |  |
| MnO                            | 0,096                                  | 0,123    | 0,099    | 0,084     | 0,106    | 0,105     | 0,145     | 0,127     | 0,086     | 0,097    | 0,074    | <l.d.           | 0,101    | 0,069     | 0,079     | 0,073          |  |  |  |
| MgO                            | 0,034                                  | 0,032    | 0,044    | 0,052     | 0,048    | 0,043     | 0,052     | 0,046     | 0,060     | 0,055    | 0,065    | <l.d.           | 0,020    | 0,031     | 0,015     | 0,030          |  |  |  |
| CaO                            | 26,641                                 | 26,652   | 27,322   | 26,890    | 27,117   | 27,411    | 26,927    | 27,258    | 26,563    | 26,335   | 26,858   | 27,750          | 27,580   | 27,992    | 28,362    | 28,681         |  |  |  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,163                                  | 0,139    | 0,135    | 0,151     | 0,151    | 0,118     | 0,105     | 0,091     | 0,663     | 0,630    | 0,587    | 0,619           | 0,145    | 0,115     | 0,080     | 0,067          |  |  |  |
| Total                          | 97,770                                 | 95,440   | 98,830   | 97,460    | 98,590   | 97,390    | 97,320    | 97,940    | 98,900    | 96,140   | 97,560   | 98,870          | 98,880   | 98,550    | 98,030    | 97,340         |  |  |  |
| Total ETR                      | 1,985                                  | 1,762    | 1,986    | 2,190     | 1,745    | 1,773     | 2,080     | 1,890     | 0,634     | 0,412    | 0,620    | 0,206           | 1,198    | 0,447     | 0,128     | 0,000          |  |  |  |
| Si                             | 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     | 4,000     | 4,000          |  |  |  |
| Ti                             | 3,647                                  | 3,526    | 3,552    | 3,419     | 3,588    | 3,352     | 3,518     | 3,451     | 3,374     | 3,276    | 3,247    | 3,826           | 3,662    | 3,768     | 3,569     | 3,488          |  |  |  |
| Zr                             | 0,069                                  | 0,071    | 0,055    | 0,077     | 0,074    | 0,069     | 0,071     | 0,069     | 0,137     | 0,120    | 0,139    | 0,013           | 0,067    | 0,057     | 0,009     | 0,026          |  |  |  |
| Nb                             | 0,080                                  | 0,074    | 0,071    | 0,085     | 0,076    | 0,065     | 0,043     | 0,046     | 0,213     | 0,198    | 0,192    | 0,037           | 0,048    | 0,043     | 0,022     | 0,025          |  |  |  |
| La                             | 0,000                                  | 0,000    | 0,000    | 0,000     | 0,000    | 0,000     | 0,021     | 0,017     | 0,005     | 0,003    | 0,005    | 0,001           | 0,012    | 0,007     | 0,001     | 0,001          |  |  |  |
| Ce                             | 0,064                                  | 0,058    | 0,052    | 0,073     | 0,066    | 0,050     | 0,046     | 0,050     | 0,018     | 0,014    | 0,016    | 0,000           | 0,035    | 0,013     | 0,002     | 0,002          |  |  |  |
| Nd                             | 0,028                                  | 0,032    | 0,031    | 0,028     | 0,021    | 0,025     | 0,029     | 0,015     | 0,005     | 0,002    | 0,009    | 0,000           | 0,009    | 0,000     | 0,003     | 0,000          |  |  |  |
| Sm                             | 0,003                                  | 0,000    | 0,009    | 0,005     | 0,001    | 0,012     | 0,000     | 0,009     | 0,000     | 0,004    | 0,000    | 0,000           | 0,003    | 0,002     | 0,000     | 0,000          |  |  |  |
| Gd                             | 0,005                                  | 0,001    | 0,005    | 0,003     | 0,000    | 0,000     | 0,008     | 0,002     | 0,003     | 0,001    | 0,001    | 0,008           | 0,000    | 0,000     | 0,003     | 0,001          |  |  |  |
| Y                              | 0,013                                  | 0,007    | 0,011    | 0,010     | 0,008    | 0,005     | 0,008     | 0,009     | 0,000     | 0,005    | 0,001    | 0,003           | 0,008    | 0,004     | 0,003     | 0,002          |  |  |  |
| Al                             | 0,156                                  | 0,163    | 0,154    | 0,150     | 0,151    | 0,154     | 0,196     | 0,180     | 0,081     | 0,079    | 0,079    | 0,011           | 0,137    | 0,123     | 0,241     | 0,142          |  |  |  |
| Fe <sup>3+</sup>               | 0,204                                  | 0,196    | 0,192    | 0,218     | 0,199    | 0,236     | 0,239     | 0,249     | 0,242     | 0,257    | 0,232    | 0,027           | 0,157    | 0,133     | 0,165     | 0,133          |  |  |  |
| Mg                             | 0,011                                  | 0,015    | 0,011    | 0,010     | 0,012    | 0,012     | 0,017     | 0,015     | 0,010     | 0,011    | 0,009    | 0,000           | 0,012    | 0,008     | 0,009     | 0,008          |  |  |  |
| Mn                             | 0,007                                  | 0,007    | 0,009    | 0,011     | 0,010    | 0,009     | 0,011     | 0,009     | 0,012     | 0,011    | 0,013    | 0,000           | 0,004    | 0,006     | 0,003     | 0,006          |  |  |  |
| Ca                             | 3,979                                  | 4,029    | 3,974    | 3,947     | 3,976    | 3,976     | 3,994     | 3,978     | 3,866     | 3,893    | 3,905    | 3,911           | 4,000    | 4,081     | 4,053     | 4,064          |  |  |  |
| Na                             | 0,044                                  | 0,038    | 0,036    | 0,040     | 0,040    | 0,031     | 0,028     | 0,024     | 0,175     | 0,169    | 0,154    | 0,158           | 0,038    | 0,030     | 0,021     | 0,017          |  |  |  |
| Soma Cál                       | 12,311                                 | 12,217   | 12,162   | 12,076    | 12,221   | 11,996    | 12,228    | 12,124    | 12,141    | 12,043   | 12,004   | 11,995          | 12,192   | 12,277    | 12,104    | 11,916         |  |  |  |
| O                              | 20,363                                 | 20,136   | 20,085   | 19,923    | 20,200   | 19,741    | 20,141    | 19,967    | 20,061    | 19,833   | 19,773   | 19,836          | 20,155   | 20,292    | 19,914    | 19,600         |  |  |  |







**Tabela 6:** Análises químicas quantitativas representativas de feldspato alcalino dos enclaves Tipo I e II e da rocha hospedeira.

| Amostra                               | Nefelina sienito médio-grosso a grosso |           | Nefelina Sienito médio-fino a fino |          |           | Endave Tipo I |          |          | Enclave Tipo II |           |           |
|---------------------------------------|----------------------------------------|-----------|------------------------------------|----------|-----------|---------------|----------|----------|-----------------|-----------|-----------|
|                                       | PPE-8A                                 |           | PPE-6b                             |          |           | PPE-7Aa       |          |          | PPE-5Bb         |           |           |
|                                       | 2                                      |           | 2                                  |          |           | 2             |          |          | 2               |           |           |
|                                       | 1 - N esc                              | 1 - N esc | 1 - N cl                           | 3 - N cl | 4 - N esc | 1 - N esc     | 2 - B cl | 3 - B cl | 1 - N cl        | 2 - B esc | 3 - B esc |
| Ponto                                 |                                        |           |                                    |          |           |               |          |          |                 |           |           |
| SiO <sub>2</sub>                      | 65,52                                  | 64,98     | 63,80                              | 60,95    | 64,20     | 64,13         | 64,10    | 63,28    | 64,46           | 64,96     | 65,26     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 18,57                                  | 18,55     | 18,26                              | 19,06    | 17,97     | 18,96         | 19,66    | 20,02    | 18,83           | 18,14     | 18,00     |
| TiO <sub>2</sub>                      | 0,12                                   | 0,03      | 0,06                               | 0,12     | 0,06      | 0,06          | 0,10     | 0,09     | 0,07            | 0,08      | 0,09      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 0,51                                   | 0,39      | 0,38                               | 0,38     | 0,60      | 0,38          | 0,45     | 0,45     | 0,50            | 0,79      | 0,92      |
| MnO                                   | 0,03                                   | < l.d.    | < l.d.                             | < l.d.   | < l.d.    | 0,05          | 0,04     | 0,03     | < 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.    |
| CaO                                   | 0,06                                   | 0,05      | 0,04                               | 1,76     | < l.d.    | 0,06          | 0,22     | 0,27     | 0,04            | < l.d.    | < l.d.    |
| Na <sub>2</sub> O                     | 3,05                                   | 3,10      | 1,42                               | 2,58     | 1,82      | 2,72          | 3,12     | 3,58     | 2,82            | 2,90      | 2,87      |
| K <sub>2</sub> O                      | 12,57                                  | 12,36     | 14,74                              | 12,00    | 14,35     | 12,71         | 11,38    | 10,62    | 12,31           | 12,62     | 12,82     |
| BaO                                   | 0,14                                   | < l.d.    | 0,08                               | 0,13     | 0,13      | 0,17          | 0,15     | 0,21     | 0,80            | 0,40      | 0,16      |
| SrO                                   | 0,38                                   | 0,48      | 0,32                               | 1,64     | 0,11      | 1,05          | 1,95     | 2,15     | 0,59            | 0,24      | 0,14      |
| Total                                 | 100,95                                 | 99,94     | 99,10                              | 98,63    | 99,24     | 100,30        | 101,16   | 100,70   | 100,43          | 100,13    | 100,26    |
| Fórmula Estrutural (com base em 32 O) |                                        |           |                                    |          |           |               |          |          |                 |           |           |
| Si                                    | 11,915                                 | 11,918    | 11,907                             | 11,523   | 11,946    | 11,804        | 11,697   | 11,605   | 11,843          | 11,934    | 11,958    |
| Al                                    | 3,976                                  | 4,007     | 4,012                              | 4,244    | 3,938     | 4,110         | 4,224    | 4,323    | 4,073           | 3,926     | 3,884     |
| Fe <sup>3+</sup>                      | 0,070                                  | 0,054     | 0,054                              | 0,054    | 0,084     | 0,052         | 0,062    | 0,063    | 0,069           | 0,109     | 0,127     |
| Ti                                    | 0,017                                  | 0,004     | 0,009                              | 0,017    | 0,008     | 0,008         | 0,014    | 0,013    | 0,010           | 0,011     | 0,012     |
| Mg                                    | 0,004                                  | 0,000     | 0,000                              | 0,000    | 0,000     | 0,007         | 0,006    | 0,005    | 0,000           | 0,000     | 0,000     |
| Mn                                    | 0,000                                  | 0,001     | 0,002                              | 0,002    | 0,001     | 0,004         | 0,000    | 0,000    | 0,002           | 0,002     | 0,001     |
| Ba                                    | 0,010                                  | 0,000     | 0,006                              | 0,010    | 0,009     | 0,012         | 0,011    | 0,015    | 0,058           | 0,029     | 0,011     |
| Sr                                    | 0,040                                  | 0,050     | 0,030                              | 0,180    | 0,010     | 0,110         | 0,210    | 0,230    | 0,060           | 0,030     | 0,020     |
| Ca                                    | 0,011                                  | 0,010     | 0,008                              | 0,356    | 0,000     | 0,012         | 0,043    | 0,053    | 0,007           | 0,000     | 0,001     |
| Na                                    | 1,076                                  | 1,103     | 0,515                              | 0,945    | 0,655     | 0,969         | 1,102    | 1,271    | 1,005           | 1,033     | 1,019     |
| K                                     | 2,917                                  | 2,893     | 3,509                              | 2,894    | 3,407     | 2,986         | 2,649    | 2,485    | 2,885           | 2,958     | 2,998     |
| Soma Cát                              | 20,036                                 | 20,040    | 20,052                             | 20,225   | 20,058    | 20,074        | 20,018   | 20,063   | 20,012          | 20,032    | 20,031    |
| Z                                     | 15,978                                 | 15,983    | 15,982                             | 15,838   | 15,976    | 15,974        | 15,997   | 16,004   | 15,995          | 15,980    | 15,981    |
| X                                     | 4,068                                  | 4,057     | 4,076                              | 4,397    | 4,091     | 4,112         | 4,032    | 4,074    | 4,075           | 4,081     | 4,061     |
| Moléculas                             |                                        |           |                                    |          |           |               |          |          |                 |           |           |
| Ab                                    | 26,900                                 | 27,500    | 12,800                             | 22,500   | 16,100    | 24,400        | 29,000   | 33,400   | 25,800          | 25,900    | 25,400    |
| An                                    | 0,300                                  | 0,200     | 0,200                              | 8,500    | 0,000     | 0,300         | 1,100    | 1,400    | 0,200           | 0,000     | 0,000     |
| Or                                    | 72,900                                 | 72,200    | 87,000                             | 69,000   | 83,900    | 75,300        | 69,800   | 65,200   | 74,000          | 74,100    | 74,600    |



**Tabela 7:** Análises químicas quantitativas representativas de nefelina do enclave Tipo I e da rocha hospedeira.

| Amostra<br>Cristal<br>Ponto           | Nefelina sienito médio-<br>grosso a grosso |           | Nefelina sienito médio-fino a fino |          |          | Enclave Tipo I |          |          |          |          |           |
|---------------------------------------|--------------------------------------------|-----------|------------------------------------|----------|----------|----------------|----------|----------|----------|----------|-----------|
|                                       | PPE-8A                                     |           | PPE-6b                             |          |          | PPE-1Bg        |          |          | PPE-7Aa  |          |           |
|                                       | 1                                          |           | 1                                  |          |          | 2              |          |          | 1        |          |           |
|                                       | 1 - B esc                                  | 2 - N esc | 1 - N esc                          | 2 - B cl | 3 - B cl | 1 - B esc      | 2 - N cl | 3 - N cl | 1 - N cl | 2 - B cl | 3 - N esc |
| Óxidos (% em peso)                    |                                            |           |                                    |          |          |                |          |          |          |          |           |
| SiO <sub>2</sub>                      | 41,74                                      | 41,92     | 45,22                              | 43,48    | 44,01    | 45,99          | 44,94    | 45,29    | 45,77    | 46,46    | 46,86     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 34,99                                      | 34,98     | 31,76                              | 31,23    | 31,81    | 31,52          | 31,65    | 31,78    | 32,25    | 32,14    | 32,24     |
| TiO <sub>2</sub>                      | < l.d.                                     | < l.d.    | 0,05                               | 0,06     | < l.d.   | < l.d.         | < l.d.   | 0,05     | < l.d.   | 0,03     | 0,07      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>        | 0,09                                       | 0,11      | 1,26                               | 2,10     | 1,93     | 1,14           | 1,71     | 1,70     | 1,76     | 1,45     | 1,03      |
| MnO                                   | < l.d.                                     | < l.d.    | 0,03                               | 0,02     | 0,04     | < l.d.         | < l.d.   | 0,03     | 0,01     | < l.d.   | < l.d.    |
| MgO                                   | 0,01                                       | < l.d.    | < l.d.                             | 0,02     | 0,02     | 0,03           | 0,01     | 0,02     | 0,04     | 0,03     | 0,05      |
| CaO                                   | < l.d.                                     | < l.d.    | 0,01                               | 0,01     | < l.d.   | < l.d.         | < l.d.   | 0,06     | < l.d.   | < l.d.   | 0,11      |
| Na <sub>2</sub> O                     | 15,80                                      | 15,55     | 16,04                              | 15,52    | 15,96    | 15,64          | 15,52    | 15,82    | 16,07    | 16,12    | 15,29     |
| K <sub>2</sub> O                      | 8,02                                       | 7,96      | 5,51                               | 5,77     | 5,91     | 5,27           | 5,89     | 5,91     | 5,80     | 5,61     | 5,42      |
| BaO                                   | < l.d.                                     | < l.d.    | < l.d.                             | < l.d.   | 0,06     | < l.d.         | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.    |
| SrO                                   | < l.d.                                     | < l.d.    | < l.d.                             | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.         | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.   | < l.d.    |
| Total                                 | 100,64                                     | 100,52    | 99,87                              | 98,22    | 99,74    | 99,61          | 99,74    | 100,65   | 101,72   | 101,84   | 101,10    |
| Fórmula Estrutural (com base em 32 O) |                                            |           |                                    |          |          |                |          |          |          |          |           |
| Si                                    | 8,051                                      | 8,083     | 8,656                              | 8,515    | 8,495    | 8,782          | 8,632    | 8,628    | 8,621    | 8,711    | 8,797     |
| Al                                    | 7,955                                      | 7,949     | 7,165                              | 7,207    | 7,238    | 7,094          | 7,164    | 7,136    | 7,159    | 7,102    | 7,133     |
| Fe <sup>3+</sup>                      | 0,000                                      | 0,000     | 0,006                              | 0,009    | 0,000    | 0,000          | 0,000    | 0,006    | 0,000    | 0,004    | 0,009     |
| Ti                                    | 0,012                                      | 0,015     | 0,181                              | 0,309    | 0,281    | 0,164          | 0,248    | 0,243    | 0,250    | 0,204    | 0,146     |
| Mg                                    | 0,000                                      | 0,000     | 0,005                              | 0,003    | 0,006    | 0,000          | 0,000    | 0,005    | 0,002    | 0,000    | 0,000     |
| Mn                                    | 0,004                                      | 0,000     | 0,001                              | 0,006    | 0,007    | 0,008          | 0,003    | 0,006    | 0,011    | 0,009    | 0,013     |
| Ba                                    | 0,001                                      | 0,000     | 0,000                              | 0,001    | 0,005    | 0,000          | 0,002    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000     |
| Sr                                    | 0,000                                      | 0,000     | 0,000                              | 0,000    | 0,000    | 0,002          | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,000    | 0,004     |
| Ca                                    | 0,001                                      | 0,000     | 0,003                              | 0,003    | 0,000    | 0,001          | 0,000    | 0,011    | 0,002    | 0,001    | 0,021     |
| Na                                    | 5,908                                      | 5,815     | 5,953                              | 5,893    | 5,975    | 5,791          | 5,780    | 5,845    | 5,867    | 5,861    | 5,565     |
| K                                     | 1,974                                      | 1,959     | 1,346                              | 1,440    | 1,455    | 1,285          | 1,443    | 1,436    | 1,393    | 1,341    | 1,297     |
| Soma Cát.                             | 23,906                                     | 23,821    | 23,314                             | 23,385   | 23,461   | 23,127         | 23,273   | 23,316   | 23,305   | 23,233   | 22,985    |
| O                                     | 32,000                                     | 32,000    | 32,000                             | 32,000   | 32,000   | 32,000         | 32,000   | 32,000   | 32,000   | 32,000   | 32,000    |
| Moléculas                             |                                            |           |                                    |          |          |                |          |          |          |          |           |
| Qz                                    | 8,855                                      | 8,860     | 8,945                              | 8,934    | 8,928    | 8,962          | 8,947    | 8,947    | 8,945    | 8,954    | 8,969     |
| Ks                                    | 17,939                                     | 17,943    | 17,871                             | 17,884   | 17,880   | 17,874         | 17,890   | 17,885   | 17,881   | 17,875   | 17,891    |
| Ne                                    | 73,207                                     | 73,197    | 73,184                             | 73,183   | 73,192   | 73,163         | 73,163   | 73,169   | 73,175   | 73,170   | 73,140    |







