

EVOLUÇÃO QUÍMICA E TEXTURAL DE PIROXÊNIOS EM ENCLAVES MÁFICO-ULTRAMÁFICOS E NEFELINA SIENITOS HOSPEDEIROS, PEDREIRA DA PREFEITURA, MACIÇO ALCALINO POÇOS DE CALDAS (MG-SP).

Bruna P. Ricardi ^(1,2) & Silvio R. F. Vlach ^(1,3)

1. Departamento de Mineralogia e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo

2. brunaticardi@yahoo.com.br; 3. srfvlach@usp.br

Abstract

The fine-grained nepheline syenites of Pedreira da Prefeitura, Poços de Caldas Alkaline Massif (MG-SP), have mafic-ultramafic enclaves of unknown origin. Pyroxenes are the main mafic minerals in syenites and are the predominant mineral in the enclaves. The prismatic pyroxene of the nepheline syenites is strongly zoned, from diopside in the core to aegirine-augite in the rim, with mg# values between 1,0 and 0,2, respectively. This pyroxene has similar textural and chemical characteristics compared to the macrocrystals of diopside of the enclaves, such as pale cores, with high contents of MgO, CaO and relatively high of Cr₂O₃, and green xenomorphic rim, with great amount of Fe₂O₃ e Na₂O. These features suggest that syenites contain partially reabsorbed pyroxene xenocrysts, probably captured during mingling and partial mixing between syenitic and ultrabasic magmas.

Keywords: enclaves, pyroxenes, Poços de Caldas.

Introdução

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 km² de exposição. As rochas que afloram no maciço são, em ordem de abundância, fonolitos, “tinguaítos” (micro nefelina sienitos) e nefelina sienitos diversos, de afinidades miasquíticas, intermediárias e agpáiticas, rochas vulcanoclásticas e remanescentes sedimentares.

Os nefelina sienitos compreendem um total de 143 km² em área de ocorrência e, entre estes, os nefelina sienitos da Pedreira (Ulbrich, 1984; Ulbrich *et al.*, 2005), assim denominados pela sua ocorrência na Pedreira da Prefeitura, são as rochas mais expressivas, ocupando cerca de 80 km². Estas rochas contêm enclaves microgranulares félsicos e máfico-ultramáficos.

O objetivo deste trabalho é caracterizar textural e quimicamente os piroxênios dos enclaves máfico-ultramáficos, comparando-os com os da rocha encaixante.

Materiais e métodos

As descrições petrográficas foram realizadas no Laboratório de Microscopia Petrográfica do IGc-USP. Para tal foi utilizado o microscópio petrográfico ZEISS AxioplanTM. Análises químicas pontuais dos piroxênios foram realizadas no Laboratório de Microsonda Eletrônica do IGc-USP, com a microsonda JEOL JXA-8600S. As configurações analíticas empregadas para a obtenção de imagens BSE (em modo composicional) e análises qualitativas e quantitativas com EDS e WDS foram de 15 KeV para a voltagem de aceleração, 20 nA para a corrente e 1 µm de diâmetro para o feixe eletrônico. As correções para os efeitos de matriz, bem como conversões para óxidos foram efetuadas automaticamente com o programa PROZA (Bastin & Heijligers, 1990). As análises foram feitas na zona de núcleo, intermediária e borda dos cristais, visando definir zoneamentos composicionais presentes, evidenciados em fotomicrografias e imagens de BSE.

O tratamento dos dados analíticos foi efetuado com o programa Mincalc99 (Gualda e Vlach, inédito) e com planilhas comerciais. O cálculo das proporções catiônicas e da partição Fe²⁺/Fe³⁺ foi feito segundo o método de Droop (1987), considerando a somatória de 4 cátions e 6 oxigênios.

Aspectos geológicos e petrográficos locais

Os nefelina sienitos da Pedreira afloram na porção centro-norte do Maciço Alcalino Poços de Caldas, em 80km² de exposição. As melhores exposições destas rochas estão na Pedreira da Prefeitura, situada próxima aos contatos com os fonolitos encaixantes, no extremo norte do maciço.

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 a diferentes arranjos texturais, a variações do índice de cor e a presença de algum mineral acessório específico.

Duas variedades texturais são particularmente características na região da Pedreira da Prefeitura: uma de granulação mais grossa, tipicamente foiaítica (nefelina e máficos intersticiais a uma malha de cristais de feldspato alcalino tabular) e outra de granulação fina-média e inequigranular em que a nefelina aparece, em geral, como inclusões idiomórficas pequenas no feldspato alcalino, conferindo-lhe aspecto poiquilítico. Descrições detalhadas sobre a

geologia, petrografia e mineralogia destas rochas são encontradas principalmente em Ulbrich *et al.* (1979), Ulbrich (1983) e Ulbrich (1984).

Enclaves microgranulares félsicos são mais recorrentes no nefelina sienito mais grosso, enquanto o de granulação mais fina possui grande parte dos máfico-ultramáficos. Os enclaves máfico-ultramáficos apresentam dimensões desde milimétricas até cerca de 5 cm e as formas variam de angulosas a pouco arredondadas. Macroscopicamente, possuem textura com aspecto “porfirítico” definida por macrocristais prismáticos de piroxênio, imersos em matriz cinza escura. Alguns enclaves apresentam-se disruptos, com finas venulações fonolíticas. Os contatos com a encaixante ora são retos, ora mais curvilíneos, sinuosos. Ao microscópio petrográfico, os macrocristais possuem núcleos róseos, classificados como “titano-diopsídio”, e bordas verdes, com dimensões entre 0,2 e 1,0 cm, imersos em uma matriz fanerítica muito fina a afanítica, constituída essencialmente por clinopiroxênio verde. Cristais textural e composicionalmente semelhantes aos destes enclaves são encontrados no nefelina sienito hospedeiro (de granulação fina), com núcleo róseo ou incolor (diopsídico) e borda verde, que composicionalmente corresponde a egirina-augita. Estes cristais não estão presentes no nefelina sienito mais grosso (Ricardi, 2006).

Aspectos texturais e químicos

O nefelina sienito hospedeiro é constituído essencialmente por feldspato potássico e nefelina. Os minerais máficos são clinopiroxênios, acompanhados por quantidades menores de hainita, titanita e magnetita. Duas gerações de piroxênios são texturalmente distintas: uma prismática com núcleos pouco pleocróicos, diopsídicos, e bordas com pleocroísmo forte em tons de verde, que correspondem à egirina-augita (Fig. 1); outra, constituída tipicamente por egirina, forma agregados fibrosos intersticiais.

Os enclaves máfico-ultramáficos são constituídos por clinopiroxênio, juntamente com feldspato potássico, nefelina, magnetita e titanita, em ordem crescente de importância. O clinopiroxênio é o principal mineral e está presente em três gerações distintas: variedades com tonalidades rosadas, levemente pleocróicas e variedades incolores aparecem como macrocristais (Fig. 2), enquanto variedades em tons de verde-oliva predominam na matriz ou como bordas nos macrocristais.

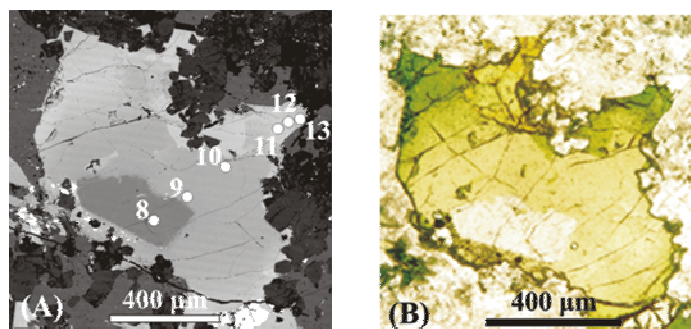


Figura 1: Imagens de clinopiroxênio zonado do nefelina sienito hospedeiro, rodeado por cristais félsicos (nefelina e feldspato alcalino). **(A):** Imagem de elétrons retro-espalhados em modo composicional. Núcleo mais escuro indica maior teor de CaO e MgO, e menores de Fe_2O_3^c (calculado), em relação a borda. Pontos identificam as análises representativas na Tabela 1. **(B):** fotomicrografia com luz plano-polarizada, evidenciando o núcleo pouco pleocróico (diopsídico) e a borda verde (egirina-augita).

Os macrocristais com tonalidades rosadas são os mais comuns. São subidiomórficos a idiomórficos, prismáticos, entre 0,6 mm e 1,0 cm, com pleocroísmo em tons de róseo-pálido. Localmente, apresentam extinção setorial e anômala em tonalidades de azul *jeans* e forte dispersão dos eixos ópticos, observada em figuras de interferência, característica da “titano-augita”. A geração incolor aparece como núcleos mais ou menos irregulares, com contatos bruscos, nos macrocristais róseos (Fig. 2). Uma característica típica dos macrocristais é a presença de texturas de corrosão marginal e substituição por uma geração posterior de piroxênio verde-oliva, similar ao predominante na matriz dos enclaves (Fig. 2).

Os macrocristais de piroxênio dos enclaves, principalmente os róseos, são caracterizados por possuírem alto teor de TiO_2 (Tab. 1), correspondendo a um “diopsídio com Ti” (Morimoto, 1988). Do núcleo para a borda, estes piroxênios apresentam zoneamento composicional marcado pelo decréscimo de MgO, CaO e de Cr_2O_3 , e aumento de Na_2O , Fe_2O_3^c (calculado) e MnO (Fig. 3 e Tab. 1). Este zoneamento é facilmente reconhecido em imagens BSE (Fig. 2), onde a borda possui tonalidade mais clara de cinza e o núcleo mais escuro. O índice $\text{mg\#}$ [$\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$] varia em torno de 0,9 (Tab. 1). Assim como os macrocristais, os piroxênios da matriz são classificados como diopsídio, gradando para augita. Zoneamentos composicionais são muito sutis. Estes piroxênios possuem composição semelhante à zona verde da borda dos macrocristais.

O nefelina sienito hospedeiro possui cristais de piroxênio semelhantes textural e quimicamente aos dos enclaves. São prismáticos, com núcleos rosados/incolores (diopsídicos) geralmente com alto teor de Cr_2O_3 , que passam subitamente para egirina-augita (verde) e por fim, para egirina em sua borda extrema (Fig. 1). Este forte zoneamento

pode ser observado na figura 3, pelo maior teor de Mg nos núcleos e maior de Na nas bordas. O índice *mg#* varia de 1,0 a 0,2 do núcleo para borda (Tab. 1). A principal substituição catiônica que se observa é a de Ca (sítio catiônico M1), Fe^{2+} , Mn e Mg (M2) por Fe^{3+} (M1) e Na (M2), com correlação quase perfeita, do núcleo para a borda (Fig. 4).

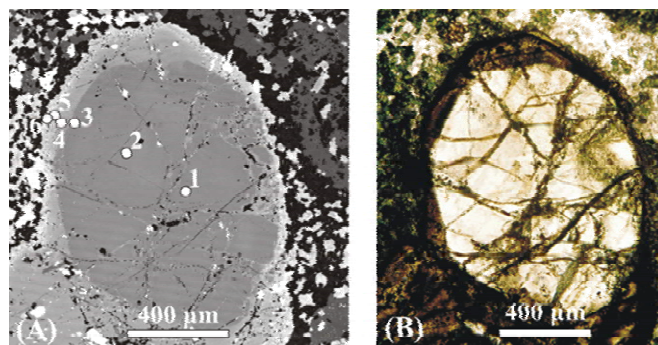


Figura 2: Imagens de macrocristal de clinopiroxênio zonado do enclave máfico-ultramáfico, rodeado por matriz fina composta por diopsídio e minerais félsicos (nefelina e feldspato alcalino). **(A):** Imagem de elétrons retro-espalhados em modo composicional. Núcleo mais escuro indica maior teor de CaO e MgO, e menores de Fe_2O_3^c (calculado), em relação a borda. Pontos identificam as análises representativas na Tabela 1. **(B):** fotomicrografia com luz plano-polarizada, evidenciando o núcleo pouco pleocróico (diopsídico) em contato com a zona rósea e, por fim, com a borda verde.

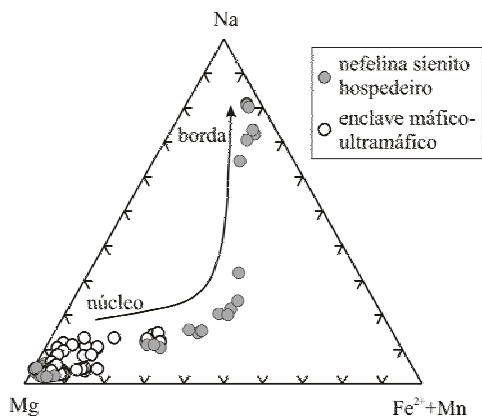


Figura 3: Diagrama ternário Mg-Na-($\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}$) para os piroxênios do nefelina sienito hospedeiro e dos enclaves máfico-ultramáficos.

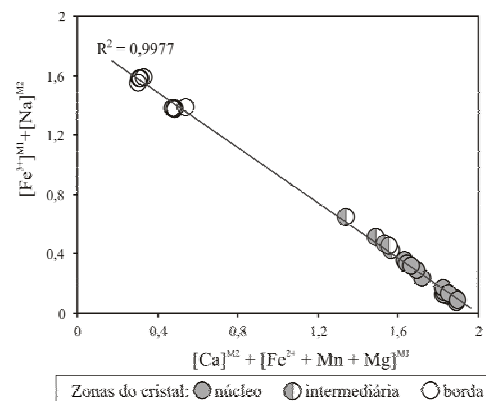


Figura 4: Diagrama mostrando a correlação entre $[\text{Fe}^{3+} + \text{Na}]$ e $[\text{Ca} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mn} + \text{Mg}]$ para os clinopiroxênios do nefelina sienito fino.

Considerações finais

O clinopiroxênio é a principal fase máfica do nefelina sienito fino e o principal constituinte dos enclaves máfico-ultramáficos presentes na Pedreira da Prefeitura. A rocha hospedeira possui cristais de diopsídio que se assemelham aos macrocristais dos enclaves, tanto no ponto de vista textural quanto composicional. Ambos possuem índice *mg#* próximo de 1,0 e altos teores relativos de Cr_2O_3 no núcleo, com conseqüente aumento nos teores de Na_2O e Fe_2O_3 junto às bordas. No entanto, o clinopiroxênio da encaixante apresenta teores muito mais elevados destes elementos nas bordas, cristalizando egirina fibrosa e intersticial como termo final (Tab. 1).

As relações estruturais entre os enclaves máficos e os sienitos hospedeiros suportam uma hipótese de coexistência de magmas distintos. Feições como bordas afaníticas mais escuras e porções rompidas nos enclaves, sugerem uma origem híbrida para estes sienitos (ver também Ulbrich, 1983).

Estas evidências sugerem que os núcleos rosados/incolores de clinopiroxênio observados no nefelina sienito hospedeiro sejam, na realidade, xenocristais capturados dos enclaves e parcialmente absorvidos e corroboram uma hipótese de coexistência e mistura parcial entre magmas sieníticos e ultrabásicos.

Agradecimentos

B. Ricardi agradece à FAPESP pela bolsa de iniciação científica, concedida em 2006, “Evolução textural e mineralógica de enclaves micro-granulares em nefelina sienitos da Pedreira da Prefeitura, Maciço Alcalino Poços de Caldas (MG-SP)”, inserida no projeto temático “A evolução do magmatismo alcalino na plataforma Sul-Americana: implicações petrogenéticas e geodinâmicas”, coordenado por Celso B. Gomes.

Tabela 1: Análises químicas pontuais (% peso para óxidos, e cátions por fórmula unitária para íons) representativas dos piroxênios do nefelina sienito hospedeiro e dos enclaves máfico-ultramáficos, Maciço Alcalino Poços de Caldas. (< l.d. = menor que o limite de detecção).

Litotipo		enclave máfico-ultramáfico							nefelina sienito fino						
Piroxênio		Diopsídio róseo com núcleo incolor, macrocristal						diopsídio da matriz	Diopsídio incolor com borda verde						egirina fibrosa
Análise		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Localização		núcleo	núcleo	núcleo	borda	borda	borda	núcleo	núcleo	núcleo	borda	borda	borda	borda	núcleo
SiO ₂		51,46	50,32	50,61	45,43	48,68	48,89	49,63	50,62	48,59	48,35	49,22	50,34	51,03	51,30
TiO ₂		1,08	1,37	1,20	3,30	2,73	1,21	1,28	1,57	1,52	1,37	0,72	1,77	2,58	2,76
Al ₂ O ₃		2,36	3,31	2,59	6,09	2,15	2,59	2,26	3,41	2,88	2,48	0,86	0,70	0,72	0,76
Fe ₂ O ₃ ^c		3,17	3,63	5,06	6,79	6,28	6,75	5,07	3,55	5,99	5,99	11,53	21,58	24,06	23,98
FeO		1,47	1,98	< l.d.	3,40	6,15	6,31	6,66	1,36	6,67	6,96	9,34	5,64	4,24	4,35
Cr ₂ O ₃		0,27	0,23	0,20	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,22	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.
MnO		0,04	0,07	0,08	0,63	1,02	1,03	0,79	0,04	1,00	0,87	1,73	1,02	0,85	0,88
MgO		16,27	15,49	16,21	10,13	9,63	9,29	10,36	15,69	9,83	9,45	4,99	1,57	0,64	0,72
CaO		23,81	23,55	23,66	22,14	21,85	20,99	21,79	24,37	21,64	21,51	16,20	5,46	2,70	2,33
Na ₂ O		0,32	0,34	0,59	1,47	1,76	1,78	1,43	0,27	1,41	1,48	4,08	9,90	11,67	11,79
K ₂ O		< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,09	0,18	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.	< l.d.
ZnO		< l.d.	0,02	0,04	0,03	0,02	0,04	0,07	< l.d.	0,06	0,06	0,05	0,04	< l.d.	0,06
ZrO ₂		0,01	< l.d.	< l.d.	< l.d.	0,20	0,14	0,15	< l.d.	0,09	0,17	0,30	1,08	0,93	0,71
Total		100,26	100,29	100,25	99,46	100,54	99,21	99,53	101,14	99,70	98,69	99,00	99,11	99,49	99,63
Proporção catiônica (por fórmula unitária) com base em 4 cátions totais e 6 oxigênios															
Si		1,883	1,849	1,852	1,726	1,848	1,877	1,890	1,842	1,856	1,869	1,938	1,969	1,978	1,982
Ti		0,030	0,038	0,033	0,094	0,078	0,035	0,037	0,043	0,044	0,040	0,021	0,052	0,075	0,080
Al		0,102	0,143	0,112	0,273	0,096	0,117	0,102	0,146	0,130	0,113	0,040	0,032	0,033	0,034
Fe ³⁺		0,087	0,100	0,139	0,194	0,179	0,195	0,145	0,097	0,172	0,174	0,342	0,635	0,702	0,697
Fe ²⁺		0,045	0,061	0,000	0,108	0,195	0,203	0,212	0,041	0,213	0,225	0,308	0,185	0,138	0,140
Cr		0,008	0,007	0,006	0,002	0,000	0,000	0,001	0,006	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
Mn		0,001	0,002	0,002	0,020	0,033	0,033	0,026	0,001	0,032	0,028	0,058	0,034	0,028	0,029
Mg		0,888	0,848	0,884	0,573	0,545	0,531	0,588	0,851	0,560	0,544	0,293	0,092	0,037	0,041
Ca		0,934	0,927	0,928	0,901	0,889	0,863	0,889	0,950	0,885	0,891	0,683	0,229	0,112	0,096
Na		0,023	0,024	0,042	0,108	0,130	0,133	0,106	0,019	0,104	0,111	0,311	0,751	0,877	0,883
K		0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,009	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
Zn		0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002
Zr		0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,003	0,003	0,000	0,002	0,003	0,006	0,021	0,018	0,013
Mg# Mg/(Mg+Fe ²⁺)		0,952	0,933	1,000	0,842	0,736	0,724	0,735	0,954	0,724	0,707	0,488	0,332	0,212	0,227

Referências

- Bastin G.F. & Heijligers H.J.M. 1990. Progress in electron-probe micro-analysis. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, **21**: 90-92.
- Droop G. T. R. 1997. A general equation for estimating Fe³⁺ in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analysis, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, **51**: 431-437.
- Gualda G.A.R. & Vlach S.R.F. Inédito. Mincalc99. Software sem registro de patente.
- Morimoto N. 1988. Nomenclature of Pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, **39**(1): 55-76.
- Ricardi B.P. 2006. *Petrografia e mineralogia de enclaves máfico-ultramáficos em nefelina sienitos da Pedreira da Prefeitura, Maciço Alcalino Poços de Caldas (MG-SP)*. Monografia de Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 80p.
- Richard L.R. 1995. MinPet: Mineralogical and Petrological Data Processing System, Version 2.02. MinPet Geological Software, Quebec, Canadá.
- 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., Kahn H., Vlach, S.R.F., Bagnoll E. 1979. Estrutura e petrologia dos nefelina sienitos do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP: nota preliminar. *Bol. Mineral.*, Recife, **6**: 31-40.
- Ulbrich H.H.G.J., Vlach S.R.F., Demaifee D., Ulbrich M.N.C. 2005. Structure and origin of the Poços de Caldas Alkaline Massif, SE Brazil. In.: Comin-Chiaramonti P. & Gomes C.B. (eds.) *Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform*. São Paulo, Edusp/Fapesp, pp.: 367-418.
- 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.