

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS CLINOPIROXÊNIOS DO
MACIÇO ALCALINO DE ANITÁPOLIS, SC**

S.M.A. Furtado¹, C.B. Gomes²

1. Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC

2. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP

ABSTRACT

Clinopyroxenes, displaying a wide compositional range, are the most important mafic minerals in the Anitápolis alkaline massif.

In the magnetite-biotite pyroxenites, clinopyroxenes are essentially represented by diopside and salite whereas in more leucocratic petrographic types they mainly consist of aegirine-augite having different Na content. In the phonolites, their compositions are also variable, salite, soda-augite and aegirine-augite being distinguished in addition to late phases presenting optical characteristics common to aegirine.

For most of the cases, structural formulae indicate that the sum Si + Al is insufficient to fill the tetrahedral position, with Fe³⁺ completing the occupancy.

Chemical evolution of Anitápolis pyroxenes suggests an increase in Na and concomitant depletion in Mg and Fe²⁺. This distinctive evolutionary trend exhibits some similarities to those noticed for clinopyroxenes minerals from the Cantal phonolites and rocks from the Melteig area, Fen. As in these two occurrences, the evolution of Anitápolis pyroxenes is interpreted as due to high fO₂ conditions, which are responsible for the formation of minerals containing low Fe²⁺ concentrations even in the early stages of crystallization.

The occurrence of micas with low annite content and important quantities of Fe³⁺, some of which is necessary to complete the tetrahedral site, and the presence of the assemblage sphene-magnetite also point to high fO₂ conditions.

RESUMO

Clinopiroxênios, mostrando ampla variação composicional, são os minerais máficos dominantes no maciço alcalino de Anitápolis.

Nos magnetita-biotita piroxenitos, eles estão representados essencialmente por diopsídio e salita, enquanto que nas rochas mais leucocráticas por egrina-augita, com conteúdo variado em Na. Nos fonolitos, a composição é também variável, estando presentes salita, soda-augita e egrina-augita, além de fases mais tardias com características ópticas de egrina.

O exame das fórmulas estruturais permite verificar que, na maior parte dos casos, a soma Si + Al é insuficiente para preencher a posição tetraédrica, com Fe³⁺ completando a vacância.

A evolução química desses minerais evidencia enriquecimento gradual em Na em detrimento de Mg, com pequena participação de Fe²⁺. Esta tendência evolutiva distinta assemelha-se, em parte, à observada para os clinopiroxênios dos fonolitos do Cantal e da área de Melteig, Fen. A exemplo destas ocorrências, a evolução dos piroxênios de Anitápolis é interpretada como decorrente de elevada fO₂, originando minerais com baixos teores de Fe²⁺, mesmo no estádios iniciais de cristalização.

A presença de mica com concentrações baixas em annita e participação expressiva de Fe³⁺, inclusive ocupando a posição tetraédrica, bem como a presença da associação titanita-magnetita corroboram aquela interpretação.

INTRODUÇÃO

O maciço alcalino de Anitápolis, inteiramente encaixado em rochas granitoides, localiza-se a 93 km de Florianópolis e ocupa área de 6 km².

Segundo Furtado (1989), na sua porção central, as rochas constituintes estão representadas por magnetita-biotita piroxenitos e apatita-piroxênio biotititos, envolvidos por ijolitos e nefelina sienitos (Fig. 1). Nas bordas, ocorrem variedades leuco-

cráticas, mesocráticas e melanocráticas intimamente associadas, e resultantes de processos de fenitização. Proporções menores de apatita piroxenitos formam faixas métricas em meio a ijolitos, nefelina sienitos e fenitos. Além desses tipos petrográficos, aparecem ainda veios e diques de foscrito (Furtado et al., 1986), bem como carbonatitos variados, de formação posterior aos foscritos. Diques de fonolito e, em menor

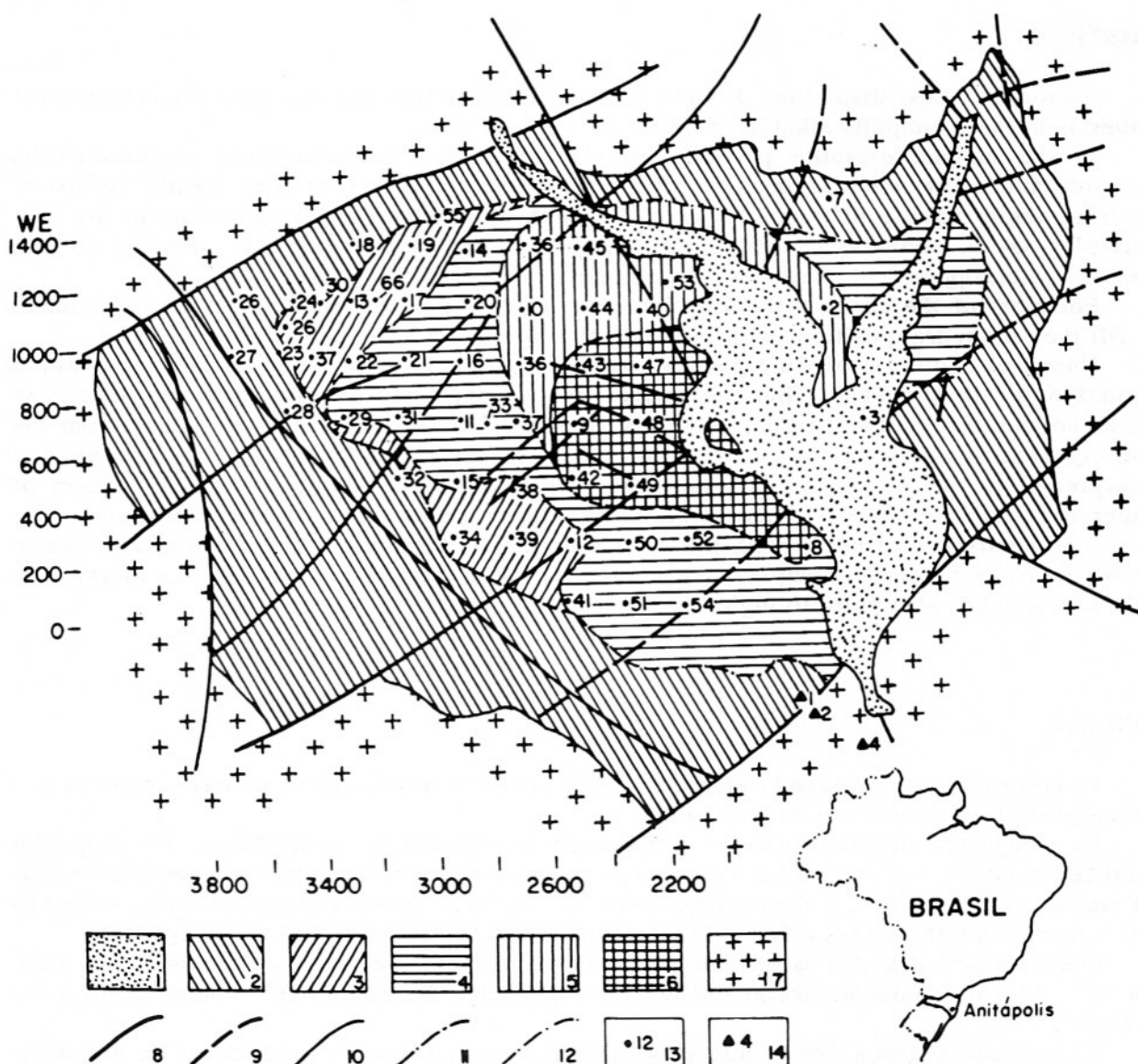


Figura 1 – Mapa geológico do maciço alcalino de Anitápolis (Furtado, 1989; modificado de Vergara, 1980, e Rodrigues, 1985). Legendas: 1, aluvião; 2, rochas de borda; 3, nefelina sienitos; 4, ijolitos; 5, apatita-piroxênio biotititos; 6, magnetita-biotita piroxenitos; 7, granitóides; 8, falha provável; 9, fratura provável; 10, contato observado; 11, contato inferido; 12, contato para sondagem; 13, sondagem; 14, dique amostrado.

quantidade, de lamprófiro são encontrados nas rochas granitóides encaixantes (Furtado & Scheibe, 1989).

Idades K/Ar, obtidas em concentrados da biotita, para o maciço acham-se compreendidas no intervalo 130,6-136,4, com um valor médio de 133 Ma (Gomes et al., 1990).

MATERIAL E MÉTODOS

Nas rochas de Anitápolis, os piroxê-

nios consistem em uma das fases minerais mais abundantes, cristalizando-se após os opacos e a apatita.

Nos magnetita-biotita piroxenitos, ocupando a porção mais central do maciço (Fig. 1), os cristais são subidiomórficos a xenomórficos e apresentam, em média, 1,0 mm de tamanho, zoneamento levemente perceptível, pleocroísmo fraco em tons de verde claro, além de outras feições ópticas indicativas de diopsídio.

Nos apatita-piroxênio biotititos, apa-

tita piroxenitos, ijolitos e nefelina sienitos, os cristais são subidiomórficos a xenomórficos, com coloração e zoneamento concêntrico mais acentuado que no caso anterior, e mostram características ópticas apontando para teores mais elevados em sódio, principalmente sobretudo junto às bordas dos grãos. Em certas amostras, sobretudo de apatita piroxenitos e nefelina sienitos, os piroxênios possuem hábito radial, esquelético ou mesmo poiquilítico, com inclusões de opacos, apatita e raros cristais de biotita. Quando em contato com carbonatos, eles estão freqüentemente transformados em anfibólio e mica.

Nas rochas de borda, os piroxênios exibem cores verdes mais intensas e, nas amostras com quartzo, extinção quase reta. Os grãos são idiomórficos a subidiomórficos, às vezes com textura em pente, radiada ou poiquilítica, com inclusões de feldspato potássico. Nas amostras onde a textura granítica se mostra ainda preservada, o mineral cristaliza-se em torno dos feldspatos originais ou mesmo na forma de veios, associando-se então a anfibólio.

Nos fonolitos, os piroxênios ocorrem na forma de fenocristais ou como fase integrante da matriz. Os fenocristais têm, em média, 0,7 mm de tamanho, zoneamento concêntrico ou oscilatório, com bordas mais esverdeadas e, por vezes, franjas egrínicas. Na matriz, as diminutas acículas exibem também características de egrina.

O estudo químico desses minerais foi realizado com microsonda eletrônica de fabricação ARL, modelo EMX-SM, do Instituto de Geociências da USP. Para os tipos mais cálcicos, foram empregados os seguintes padrões: clinopiroxênio (Cpx 118) para Si e Ca; augita (A-209) para Al, Ti e Mg; egrina-augita (16A) para Fe e Na; egrina-augita (17A) para Mn; baddeleyta (Palabora) para Zr. Na análise de piroxênios mais sódicos usou-se egrina-augita (17A) para Fe e Na. O número de determinações em cada amostra e em cada grão variou em função da heterogeneidade óptica do mineral, com o zoneamento mais acentuado levando a um número maior de determinações e inclusive a realização de perfis transversais nos cristais.

O cálculo das proporções teóricas de FeO e Fe₂O₃ foi feito com o auxílio do programa SILCAL (Ulbrich & Ulbrich, 1982), que desdobra o Fe total em Fe²⁺ e Fe³⁺, de forma a manter-se a soma de ânions igual a 6 e a de cátions o mais pró-

xima possível de 4.

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Na Tabela 1, estão reunidas as análises químicas dos piroxênios e suas respectivas fórmulas estruturais calculadas na base de seis átomos de oxigênio (análises das rochas correspondentes encontram-se em Furtado, 1989). Cada composição representa a média aritmética de pontos mostrando, para os elementos maiores, variação composicional inferior a 2%. Assim, para amostras com pequena dispersão de valores é fornecido apenas um único dado, enquanto que para outras, exibindo faixa composicional mais ampla, tem-se um número maior de análises, de forma a melhor exprimir a variação química desses minerais.

Para fins de classificação, recorreu-se basicamente aos procedimentos adotados por Ulbrich (1983), que caracterizam os piroxênios como egrina, quando portadores de quantidade de Na superior a 0,85 átomos por fórmula unitária, e egrina-augita, quando apresentando valor maior de 0,20. Conforme Deer et al. (1978), o termo soda-augita é reservado para fases contendo proporção de Na acima de 0,10. Por outro lado, ainda segundo Ulbrich (1983), esses minerais são definidos como piroxênios com titânio se portadores de concentração deste elemento maior de 0,04 e menor de 0,10 afu.

Assim, com base nos critérios acima, os piroxênios de Anitápolis são classificados no geral como egrina-augita, à exceção dos presentes nos magnetita-biotita piroxenitos, diopsídio, salita e salita sódica. Em algumas amostras de fonolitos aparecem, em adição à egrina-augita, augita sódica, salita e salita sódica, enquanto que em um apatita piroxenito e um ijolito ocorrem também, respectivamente, augita e salita sódicas. Em certas análises, Ti está presente em maiores quantidades, associado juntamente a elevados valores de Na nos piroxênios da rocha leucocrática de borda E-2 e de alguns fonolitos.

O exame das fórmulas estruturais evidencia que, no conjunto dos piroxênios de Anitápolis, Si varia de 1,812 a 1,986 e que a soma de Si e Al é, em grande número de casos, insuficiente para o total preenchimento da posição Z. À exceção dos fonolitos e de algumas amostras de magnetita-biotita piroxenitos, piroxênio biotititos,

Tabela 1 – Composição química dos piroxênios de Anitápolis (*, FeO_T = ferro total calculado como FeO; **, $Fe = Fe^{3+} + Fe^{2+} + Mn$; ***, $Fe = Fe^{3+} + Fe^{2+} + Mn-Na$). Outras abreviações: T, análise total; C, centro; I, intermediária; B, borda; F, franja. Classificação: Di, diopsídio; S, salita; SS, soda-salita; SA, soda-augita; EA, egirina-augita.

	Magnetita-biotita piroxenitos					Piroxênio biotítico			Apatita piroxenitos				
	8-33 T	42-54,2		43-29		47-28 T	2-98,6		16A-70		27-33,2		
		C	B	C	B		C	B	C	B	C	I	B
SiO ₂	51,70	52,14	51,00	50,76	51,68	51,07	52,24	52,06	51,22	51,22	51,54	51,77	51,53
TiO ₂	1,14	1,33	0,92	0,89	0,58	0,84	0,38	0,39	0,22	0,27	0,29	0,40	0,55
Al ₂ O ₃	3,01	2,59	1,76	1,80	2,00	2,55	1,15	1,05	1,14	0,90	0,64	0,37	0,31
Fe ₂ O ₃	1,91	1,75	6,63	5,06	6,34	4,17	10,91	11,66	8,15	12,47	11,68	12,80	17,39
FeO	4,01	3,68	2,56	1,95	1,43	3,75	4,21	4,50	1,83	1,25	4,50	4,94	1,74
MnO	0,10	0,09	0,15	0,13	0,16	0,17	0,29	0,28	0,40	0,39	0,27	0,40	0,43
MgO	14,29	14,23	13,13	14,66	14,56	13,19	9,70	8,94	11,82	10,56	8,81	7,52	7,19
CaO	22,83	24,23	22,69	23,45	22,20	22,11	18,43	16,96	22,28	18,80	18,40	16,46	15,30
Na ₂ O	0,67	0,56	1,49	0,83	1,51	1,15	3,77	4,36	2,14	3,68	3,78	4,93	5,90
ZrO ₂						0,01	0,04	0,05	0,12	0,08	0,10	0,10	0,15
Total	99,66	100,60	100,33	99,53	100,46	99,02	101,11	100,25	99,33	99,66	100,01	99,69	100,49
FeO _T *	5,73	5,25	8,52	6,50	7,13	7,51	14,2	14,99	9,17	12,47	15,01	16,46	17,39
FÓRMULA ESTRUTURAL													
Si	1,910	1,911	1,894	1,889	1,900	1,911	1,947	1,959	1,928	1,929	1,953	1,974	1,948
Al ^{IV}	0,090	0,089	0,077	0,079	0,087	0,089	0,051	0,041	0,051	0,040	0,029	0,017	0,014
Fe ^{3+IV}			0,029	0,032	0,023		0,002		0,021	0,031	0,022	0,009	0,038
Al ^{VI}	0,041	0,023				0,024		0,005					
Ti	0,032	0,037	0,026	0,025	0,016	0,024	0,011	0,011	0,006	0,008	0,008	0,011	0,016
Fe ^{3+VI}	0,053	0,048	0,156	0,110	0,152	0,117	0,304	0,330	0,210	0,322	0,311	0,356	0,457
Fe ²⁺	0,124	0,113	0,079	0,061	0,044	0,117	0,131	0,142	0,058	0,039	0,143	0,157	0,055
Mn	0,003	0,003	0,005	0,004	0,005	0,005	0,009	0,007	0,013	0,012	0,009	0,013	0,014
Mg	0,787	0,777	0,727	0,813	0,798	0,735	0,539	0,501	0,663	0,593	0,498	0,427	0,405
Ca	0,904	0,952	0,903	0,935	0,875	0,886	0,736	0,684	0,899	0,759	0,747	0,673	0,620
Na	0,048	0,040	0,107	0,060	0,107	0,083	0,272	0,318	0,156	0,269	0,278	0,364	0,433
Total	3,992	3,993	4,003	4,008	3,997	3,991	4,002	3,998	4,005	4,002	3,994	4,001	4,000
Ca	48,32	50,29	47,55	47,83	46,13	47,63	42,77	41,11	48,23	43,22	43,18	41,11	39,02
Mg	42,06	41,05	38,28	41,59	42,07	39,52	31,32	30,11	35,57	33,77	28,79	26,08	25,49
Fe**	9,62	8,66	14,16	10,59	11,81	12,85	25,92	28,79	16,20	23,01	28,03	32,80	35,49
Na	4,96	4,25	10,74	5,88	10,47	8,52	32,45	27,62	16,17	26,98	28,28	37,76	44,68
Mg	81,39	82,95	73,00	79,70	78,08	75,46	51,12	54,72	68,70	59,48	50,66	44,29	41,80
Fe***	13,65	13,18	16,26	14,42	11,45	16,02	16,43	17,66	15,13	13,54	21,06	17,95	13,52
Classificação	Di	Di	SS	S	SS	S	EA	EA	SA	EA	EA	EA	EA

Tabela 1 (cont.)

	Ijolitos															
	16A-108,0		21-60,9		22-46		23-71,3		36-69,3		36-101,3			57-58,5		
	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	I	B	A	I	B
SiO ₂	52,03	52,78	51,68	51,67	51,91	52,25	52,54	52,13	51,73	51,83	52,57	51,46	52,22	51,75	51,51	51,77
TiO ₂	0,23	0,21	0,24	0,26	0,39	0,35	0,46	0,68	0,51	0,47	0,35	0,36	0,55	0,52	0,40	0,56
Al ₂ O ₃	0,79	0,71	0,83	0,90	0,65	1,02	1,30	0,82	1,16	1,34	0,93	1,04	1,70	0,89	0,68	0,86
Fe ₂ O ₃	9,52	12,45	10,62	12,82	5,42	8,76	10,50	13,58	7,48	11,79	6,87	11,22	13,93	7,25	11,57	13,23
FeO	3,67	1,25	2,39	1,28	4,87	5,25	4,05	1,36	6,73	4,55	6,18	2,52	5,37	6,53	2,60	1,32
MnO	0,29	0,28	0,26	0,26	0,40	0,40	0,53	0,54	0,37	0,38	0,40	0,47	0,56	0,55	0,48	0,60
MgO	10,24	10,38	10,74	10,58	11,20	9,72	11,45	9,30	9,40	8,79	10,36	9,43	6,01	10,45	9,91	10,54
CaO	18,50	17,18	18,77	17,07	21,54	18,12	16,91	18,59	19,16	18,81	19,89	18,39	14,80	18,33	18,28	16,02
Na ₂ O	3,71	4,58	3,58	4,44	2,26	3,61	3,70	4,39	2,91	3,87	2,81	3,95	5,74	2,94	3,88	4,62
ZrO ₂	0,10	0,08	0,12	0,11	0,14	0,29	0,21	0,36	0,15	0,18	0,08	0,14	0,37	0,15	0,12	0,12
Total	99,08	99,90	99,22	99,39	98,78	99,77	101,65	101,75	99,61	102,01	100,44	98,98	101,26	99,36	99,43	99,65
FeO _T [*]	12,24	12,45	11,95	12,82	9,75	13,13	13,50	13,58	13,47	15,16	12,36	12,62	17,91	13,05	13,01	13,23
FÓRMULA ESTRUTURAL																
Si	1,969	1,970	1,950	1,944	1,971	1,974	1,940	1,934	1,964	1,929	1,971	1,953	1,966	1,965	1,949	1,944
Al ^{IV}	0,031	0,030	0,036	0,040	0,029	0,026	0,057	0,036	0,036	0,059	0,029	0,047	0,034	0,035	0,030	0,038
Fe ^{3+IV}			0,014	0,016			0,003	0,030		0,012					0,021	0,018
Al ^{VI}	0,004	0,001				0,019			0,016		0,012		0,041	0,005		
Ti	0,007	0,006	0,007	0,007	0,011	0,010	0,013	0,019	0,015	0,013	0,010	0,010	0,016	0,015	0,011	0,016
Fe ^{3+VI}	0,271	0,350	0,288	0,347	0,155	0,249	0,289	0,349	0,214	0,318	0,194	0,321	0,395	0,207	0,308	0,356
Fe ²⁺	0,116	0,039	0,075	0,040	0,155	0,166	0,125	0,042	0,214	0,142	0,194	0,080	0,169	0,207	0,082	0,042
Mn	0,009	0,009	0,008	0,008	0,013	0,013	0,017	0,017	0,012	0,012	0,013	0,015	0,018	0,018	0,015	0,019
Mg	0,578	0,577	0,604	0,593	0,634	0,547	0,630	0,514	0,532	0,488	0,579	0,534	0,337	0,591	0,559	0,590
Ca	0,750	0,687	0,759	0,688	0,877	0,733	0,669	0,739	0,780	0,750	0,799	0,748	0,597	0,746	0,741	0,645
Na	0,272	0,331	0,262	0,324	0,166	0,264	0,265	0,316	0,214	0,280	0,204	0,291	0,419	0,216	0,285	0,336
Total	4,007	4,000	4,003	4,007	4,011	4,001	4,008	3,996	3,997	4,003	4,005	3,999	3,999	4,005	4,001	4,004
Ca	43,50	41,33	43,42	39,95	47,82	42,92	38,60	43,70	44,52	43,55	44,05	44,91	39,38	42,17	42,93	38,62
Mg	33,53	34,72	34,55	35,47	34,57	32,03	36,35	30,40	30,37	28,34	31,45	32,55	22,23	33,41	32,39	35,33
Fe ^{**}	22,97	23,95	22,02	24,58	17,62	25,06	25,04	25,90	25,11	28,11	24,50	22,54	38,39	24,42	24,68	26,05
Na	27,93	33,95	26,50	32,27	17,35	27,08	24,92	33,19	22,02	28,80	20,82	30,63	45,59	21,11	28,93	32,78
Mg	59,34	59,18	61,06	59,06	66,25	56,10	59,20	53,99	54,73	50,20	59,08	56,21	36,67	57,77	56,75	57,56
Fe ^{***}	12,73	6,87	12,44	8,67	16,40	16,82	15,88	12,82	23,25	21,00	20,10	13,16	17,74	21,11	14,31	9,66
Classificação	EA	EA	EA	EA	SS	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA

Tabela 1 (cont.)

	Nefelina sienitos								Meso, melanocráticas e leucocráticas						Glimmerito	
	12-66,0		13-91,5		19-73		4-51,65		4-61,9		21-138	7-83,05	E-2	4-27,2		
	C	B	C	B	C	B	C	B	C	I	B	T	T	T	C	B
SiO ₂	51,31	51,40	51,96	51,99	52,92	51,66	51,10	51,35	50,31	51,69	51,59	51,70	50,65	51,70	50,72	51,02
TiO ₂	0,76	0,72	0,36	0,37	0,40	0,38	0,61	0,61	0,56	0,51	0,55	0,24	0,80	3,13	0,60	0,70
Al ₂ O ₃	1,03	1,04	0,68	0,74	1,07	1,00	0,80	0,60	0,79	0,66	0,65	0,54	0,64	0,13	0,61	0,51
Fe ₂ O ₃	11,49	14,62	10,29	11,98	9,22	14,83	12,45	16,13	13,37	15,35	17,31	9,89	16,59	22,71	15,01	24,40
FeO	6,89	5,64	3,97	2,69	5,53	1,48	4,80	3,63	5,16	3,45	1,73	3,81	6,40	4,99	1,50	3,87
MnO	0,28	0,32	0,26	0,25	0,29	0,28	0,31	0,63	0,43	0,33	0,38	0,21	0,47	0,40	0,20	0,09
MgO	7,27	6,01	9,89	9,72	9,02	8,78	7,60	6,19	7,30	7,40	7,22	10,09	4,73	2,71	8,71	2,74
CaO	16,85	15,70	17,95	17,78	17,65	15,44	17,00	14,37	16,40	14,63	12,76	19,45	12,63	4,45	17,27	6,44
Na ₂ O	4,26	5,42	3,79	4,25	4,07	5,48	4,56	6,04	4,73	5,78	6,64	3,27	6,52	10,48	4,87	9,58
ZrO ₂	0,22	0,30	0,27	0,27	0,44	0,37	0,12	0,14	0,10	0,10	0,12	0,15	0,11	0,11	0,49	0,45
Total	100,36	101,16	99,42	100,04	100,61	99,71	99,36	99,69	99,15	99,91	99,95	99,35	99,53	100,27	99,98	99,80
FeO _T *	17,23	18,79	13,23	13,47	13,83	14,83	16,01	18,14	17,19	17,27	17,31	12,71	21,32	24,94	15,01	25,83
FÓRMULA ESTRUTURAL																
Si	1,954	1,949	1,967	1,956	1,986	1,952	1,955	1,963	1,939	1,961	1,967	1,960	1,961	1,978	1,926	1,973
Al ^{IV}	0,046	0,047	0,030	0,033	0,014	0,045	0,036	0,027	0,036	0,030	0,029	0,024	0,029	0,006	0,027	0,023
Fe ^{3+IV}		0,006	0,003	0,011		0,003	0,009	0,010	0,025	0,009	0,004	0,016	0,010	0,016	0,047	0,004
Al ^{VI}					0,033											
Ti	0,022	0,021	0,010	0,011	0,011	0,011	0,018	0,017	0,016	0,015	0,016	0,007	0,023	0,090	0,017	0,020
Fe ^{3+VI}	0,329	0,417	0,290	0,328	0,260	0,419	0,350	0,454	0,363	0,429	0,493	0,266	0,473	0,612	0,382	0,706
Fe ²⁺	0,220	0,179	0,126	0,085	0,174	0,047	0,154	0,116	0,166	0,110	0,055	0,121	0,207	0,160	0,048	0,125
Mn	0,009	0,010	0,008	0,008	0,009	0,009	0,010	0,020	0,014	0,011	0,012	0,007	0,015	0,013	0,006	0,003
Mg	0,413	0,340	0,558	0,545	0,504	0,494	0,433	0,353	0,419	0,418	0,410	0,570	0,273	0,155	0,493	0,158
Ca	0,687	0,638	0,728	0,717	0,710	0,625	0,697	0,589	0,677	0,595	0,521	0,790	0,524	0,182	0,703	0,267
Na	0,314	0,399	0,278	0,310	0,296	0,401	0,338	0,448	0,354	0,425	0,491	0,240	0,489	0,778	0,359	0,719
Total	3,994	3,998	3,998	4,004	3,997	4,006	4,000	3,997	4,009	4,003	3,998	4,001	4,004	4,000	4,008	3,998
Ca	41,44	40,28	42,50	42,33	39,14	42,85	42,17	38,20	40,69	37,85	34,85	44,63	34,88	15,85	41,87	21,14
Mg	24,91	21,46	32,57	32,17	30,93	30,42	26,20	22,89	25,18	26,59	27,42	32,20	18,17	13,50	29,36	12,51
Fe ^{**}	35,47	38,26	24,92	25,50	29,93	26,74	31,64	38,92	34,13	35,56	37,73	23,16	46,94	70,64	28,77	66,35
Na	32,30	42,18	28,22	31,73	31,26	41,26	35,36	47,01	35,87	43,50	50,42	24,49	50,00	80,54	36,78	72,19
Mg	42,50	35,94	56,65	55,78	53,22	50,82	45,29	37,04	42,45	42,78	42,09	58,16	27,90	16,04	50,51	15,86
Fe ^{***}	25,20	21,88	15,13	12,49	15,52	7,92	19,35	15,95	21,68	13,72	7,49	17,35	22,10	3,42	12,70	11,95
Classificação	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA	EA c/ Ti	EA	EA

Tabela 1 (cont.)

	Fonolitos											
	1			2		4-1			4-2			
	C	I	B	C	B	C	B	F	C	I	B	
SiO ₂	51,47	51,95	51,30	49,89	48,34	51,18	51,25	51,44	51,83	51,31	50,34	
TiO ₂	0,73	0,68	0,84	1,42	2,58	0,72	0,88	0,84	0,68	1,00	1,51	
Al ₂ O ₃	1,95	1,56	1,57	2,81	4,60	2,60	2,46	0,95	2,11	2,62	2,27	
Fe ₂ O ₃	4,99	8,44	12,22	4,41	4,87	7,00	8,10	26,07	4,95	7,66	11,88	
FeO	10,47	7,60	4,71	5,95	6,58	6,30	7,29	2,61	4,45	6,90	7,13	
MnO	0,34	0,27	0,32	0,23	0,17	0,34	0,31	0,75	0,13	0,24	0,28	
MgO	8,70	8,40	7,39	12,21	11,33	10,02	8,61	0,63	12,05	9,05	6,05	
CaO	19,26	18,57	16,57	21,40	20,60	19,71	18,24	7,01	22,25	18,79	15,59	
Na ₂ O	2,47	3,42	4,96	1,20	1,30	2,71	3,48	10,53	1,42	3,39	5,19	
ZrO ₂	0,03	0,04	0,07	0,03	0,03	0,14	0,14	0,07	0,03	0,04	0,05	
Total	100,41	100,93	99,96	99,54	100,40	100,72	100,75	100,89	99,40	101,00	100,29	
FeO _T *	14,96	15,19	15,71	9,91	10,96	12,60	14,57	26,06	8,90	13,97	17,82	
FÓRMULA ESTRUTURAL												
Si	1,953	1,954	1,945	1,879	1,812	1,917	1,929	1,969	1,929	1,921	1,920	
Al ^{IV}	0,047	0,046	0,055	0,121	0,188	0,083	0,073	0,031	0,075	0,079	0,080	
Fe ^{3+IV}												
Al ^{VI}	0,040	0,023	0,015	0,004	0,015	0,032	0,026	0,012	0,018	0,037	0,022	
Ti	0,021	0,019	0,024	0,040	0,073	0,020	0,025	0,024	0,019	0,028	0,043	
Fe ^{3+VI}	0,142	0,239	0,349	0,125	0,137	0,197	0,229	0,751	0,140	0,215	0,341	
Fe ²⁺	0,332	0,239	0,194	0,187	0,206	0,197	0,229	0,083	0,140	0,216	0,227	
Mn	0,011	0,009	0,010	0,007	0,005	0,011	0,010	0,024	0,004	0,008	0,009	
Mg	0,492	0,471	0,418	0,615	0,633	0,559	0,483	0,036	0,673	0,505	0,344	
Ca	0,783	0,748	0,673	0,864	0,827	0,791	0,736	0,288	0,894	0,754	0,637	
Na	0,182	0,249	0,365	0,088	0,094	0,197	0,254	0,782	0,103	0,246	0,384	
Total	4,003	3,997	4,048	4,000	3,990	4,004	3,992	4,000	3,991	4,009	4,007	
Ca	44,49	43,85	40,94	46,25	45,74	45,07	43,63	24,36	48,30	44,38	40,89	
Mg	27,96	27,61	25,43	36,67	35,01	31,85	28,63	3,05	36,36	29,73	22,08	
Fe**	27,56	28,55	33,64	17,08	19,25	23,08	27,74	72,59	15,35	25,30	37,03	
Na	18,60	26,99	37,60	8,76	9,58	20,40	26,71	87,50	10,76	26,03	41,49	
Mg	50,35	47,17	43,04	68,23	64,52	58,00	50,79	4,00	70,32	53,44	37,35	
Fe***	31,05	25,84	19,36	23,00	25,90	21,60	22,50	8,50	18,92	20,53	20,96	
Classificação	SA	EA	EA	S c/ Ti	S c/ Ti	SS	EA	EA	SS	EA	EA c/ Ti	

ijolitos e nefelina sienitos, faz-se necessária a locação de Fe^{3+} na posição tetraédrica, com a sua participação chegando a atingir 0,047 átomos por afu, no caso particular da porção central de cristais da amostra de glimmerito.

Para melhor visualização do preenchimento das posições estruturais é fornecido o gráfico idealizado por Larsen (1976), reunindo Na- Fe^{3+} e Si+Al (Fig. 2). A projeção dos minerais de Anitápolis na referida figura evidencia menor densidade de pontos para a ocupação de Z apenas por Si e Al, e maior no terceiro quadrante, onde se dá a locação de Fe^{3+} para suprir a deficiência tetraédrica. Com poucas exceções, os pontos acham-se próximos da linha com inclinação 2 ($\alpha = 2$), indicando que, para as amostras com excesso de Fe^{3+} sobre Na, somente a metade do Fe^{3+} é necessária para

o preenchimento da posição Z, a sugerir, assim, para esses piroxênios a existência do componente ferri-tschermakita ($\text{CaFe}_2^{3+} + \text{Fe}_2^{3+} + \text{SiO}_6$). Por outro lado, a localização dos pontos no primeiro quadrante, nas proximidades da linha de inclinação, sugere que, além do excesso de Na empregado na formação de jadeíta (NaAlSiO_6), tem-se ainda a possibilidade de geração de moléculas contendo esse elemento em combinação com Ti e Zr.

Apesar dessas indicações, não se adota no presente trabalho o cálculo quantitativo dos denominados "membros finais", preferindo-se as classificações que tomam por base a fórmula estrutural, uma vez que, devido a sua maior simplicidade, elas encontram maior aceitação na literatura, tornando, dessa forma, mais fácil a comparação entre piroxênios de distintos maciços.

No diagrama convencional Ca-Mg-($\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mn}$) (Fig. 3), verifica-se que os piroxênios presentes nos magnetita-biotita piroxenitos e em alguns fonolitos e ijolitos caem no campo da salita. Quando a concentração de Na aumenta e, via de consequência, a molécula de acmita, observa-se pronunciada inflexão para o campo da augita e ferroaugita, além da tendência em direção ao vértice da ferrossilita, restringindo, assim, a utilização desse gráfico para fins classificatórios.

No diagrama Na-Mg-($\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mn-Na}$) (Fig. 4), vê-se claramente que os minerais de Anitápolis apresentam enriquecimento gradual em Na, com pequena participação do Fe^{2+} no processo. A evolução se dá a partir dos magnetita-biotita piroxenitos, mais ricos em Mg, passando por ijolitos, nefelina sienitos e rochas de borda. A registrar também o amplo espectro composicional exibido pelos fonolitos.

Comparando-se a tendência química desses piroxênios com a observada em outros maciços brasileiros (Fig. 5), nota-se a menor participação do Fe^{2+} na evolução dos minerais de Anitápolis. Ali, o processo é marcadamente caracterizado pelo enriquecimento de Na em detrimento de Mg, ou seja, do termo acmita em função do componente diopsídio, com o Fe^{2+} mantendo-se em linhas gerais constante.

Essa mesma tendência pode ser também reconhecida em um monócrystal com zoneamento oscilatório presente em amostra (4-1) de fonolito porfirítico (Fig. 6). Embora as modificações químicas não se-

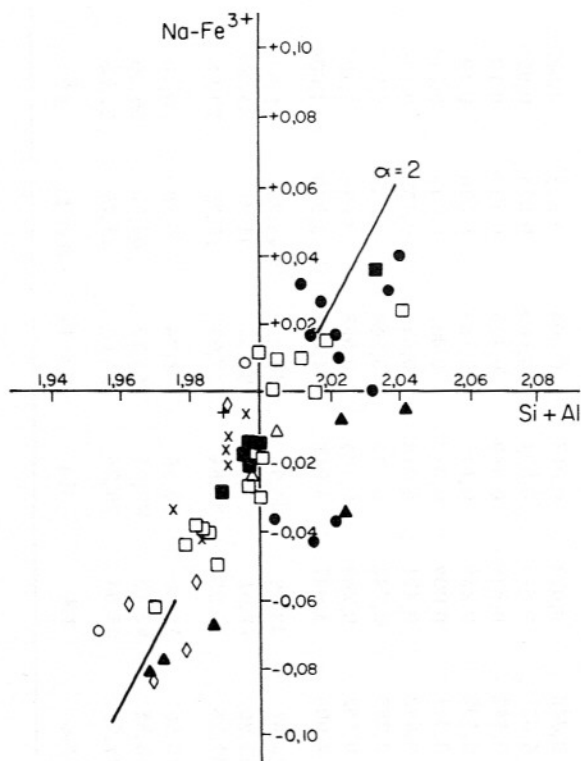


Figura 2 - Gráfico Na- Fe^{3+} vs. Si + Al para os piroxênios de Anitápolis. Legenda: triângulo cheio, magnetita-biotita piroxenitos; triângulo vazio, piroxênio biotititos; losango, apatita piroxenitos; círculo cheio, fonolitos; círculo vazio, glimmeritos; quadrado cheio, nefelina sienitos; quadrado vazio, ijolitos; cruz inclinada, rochas meso e melanocráticas de borda; cruz vertical, rochas leucocráticas de borda.

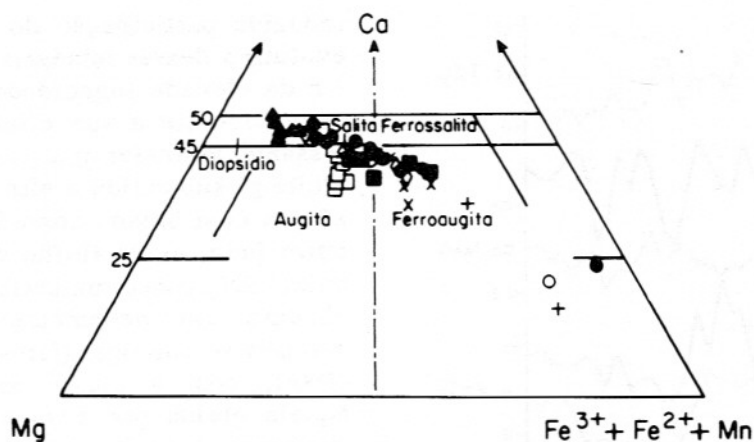


Figura 3 - Diagrama Ca-Mg-(Fe³⁺ + Fe²⁺ + Mn) (cf. Poldervaart & Hess, 1951) para os piroxênios de Anitápolis. Símbolos como na Figura 2.

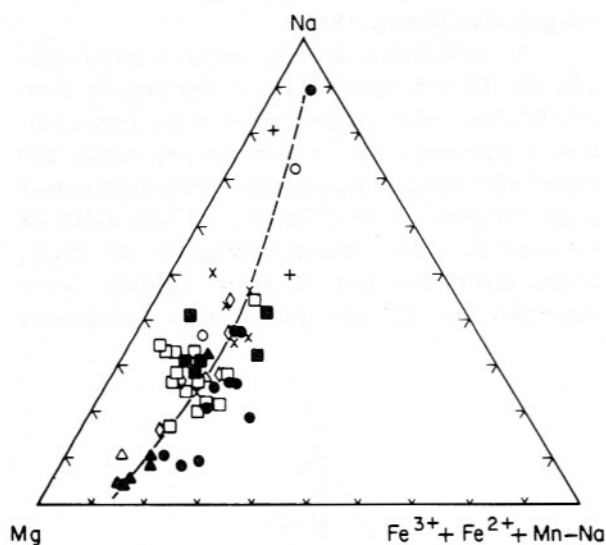


Figura 4 - Projeção dos piroxênios de Anitápolis e correspondente curva de cristalização no diagrama Na-Mg-(Fe³⁺ + Fe²⁺ + Mn-Na). Símbolos como na Figura 2.

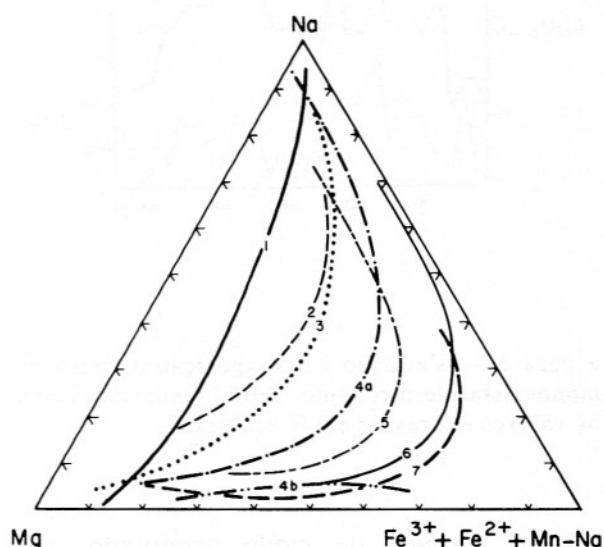


Figura 5 - Curvas de cristalização de piroxênios de maciços alcalinos brasileiros: 1, Anitápolis; 2, Itapirapuã (Gomes et al., 1970); 3, Bannhadão (Ruberti, 1984); 4, Parte Oriental do Estado do Rio de Janeiro (Valença, 1980): a) Tanguá-Rio Bonito-Itaúna-Morro de São João e b) Soarinho; 5, Piratini (Barbieri et al., 1987); 6, Ilha de Vitória (Motoki, 1986); 7, Tunas (Gomes et al., 1987).

jam amplas, pode-se inferir que, para a maior parte dos elementos analisados, o comportamento é contínuo, com pronunciada correspondência entre CaO e MgO, bem como FeO_T e Na₂O; MnO acompanha em parte o FeO_T, enquanto que Al₂O₃ guarda alguma identificação com CaO e MgO, sugerindo forte correlação negativa entre as moléculas de diopsídio e acmita. Esses resultados são confirmados pelas características ópticas do cristal, onde as cores mais esverdeadas e os menores ângulos de extin-

ção, identificados nas porções centrais e nas bordas do monocristal, refletem uma maior riqueza no componente acmita (natureza mais egírfica do piroxênio), ao passo que nas zonas intermediárias tem-se o predomínio de composições mais diopsídicas. Para os demais elementos pesquisados, os

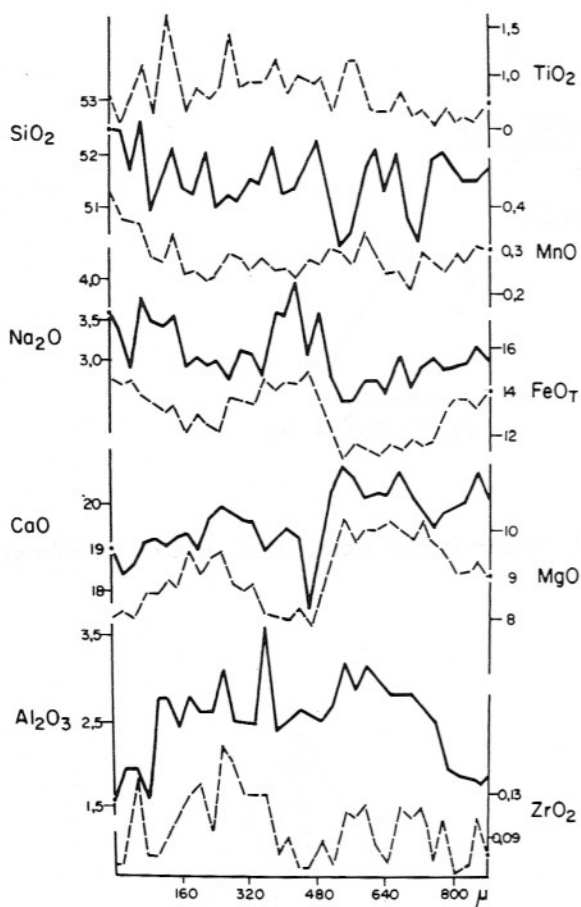


Figura 6 - Variação na composição química de monocristal de piroxênio. Perfil transversal com os valores expressos em % em peso.

valores flutuam de modo acentuado, em parte devido às dificuldades nas determinações precisas de Si e Zr, cujas concentrações muito altas ou muito baixas originam grandes desvios quando as análises são efetuadas sob um único tempo de integração.

CONDIÇÕES DE CRISTALIZAÇÃO

No diagrama Na-Mg-(Fe²⁺ + Mn) (Fig. 7), reunindo algumas curvas de cristalização de piroxênios de rochas alcalinas, constata-se a grande similaridade de comportamento dos minerais de Anitápolis com o definido para os piroxênios dos fonolitos de Cantal (Varet, 1969) e, em menor proporção, com aqueles da área de Melteig (Kresten & Morogan, 1986) e fenitos de Sokli (Vartiainen & Woolley, 1976). Em todos esses casos, os autores interpretam a

reduzida participação do Fe²⁺ no processo evolutivo desses minerais como consequência da elevada fugacidade de oxigênio reinante durante a sua cristalização. É interessante assinalar que, em Fen, a área de Melteig, submetida a alta fO₂, mostra piroxênios com baixos conteúdos em Fe²⁺. Por outro lado, na de Holla, como resultado da baixa fO₂, esses minerais exibem enriquecimento em hedembergita nos estádios evolutivos iniciais (Kresten & Morogan, 1986), com a curva tendendo no geral àquela obtida por Larsen (1976) para Ilimaussaq. O enriquecimento em Na nas fases finais de cristalização, como observado em Fen, é esperado tanto em condições de alta, quanto de baixa fO₂, uma vez que essa molécula possui maior estabilidade quando a temperatura situa-se abaixo de 780°C, mesmo em condições mais redutoras que as estabelecidas pelo tampão quartzo-faialita-magnetita (Ernst, 1962).

A influência da fO₂ sobre a participação de Ti nos piroxênios é motivo de controvérsias. Nos magnetita-biotita piroxenitos, a presença de Ti poderia ser explicada pelas elevadas temperaturas, fO₂ superiores à do tampão QFM (Flower, 1974), além de favorecida pela baixa atividade de SiO₂, como apontado por Kushiro (1960). Já o ingresso de Ti nos piroxênios egírfnicos

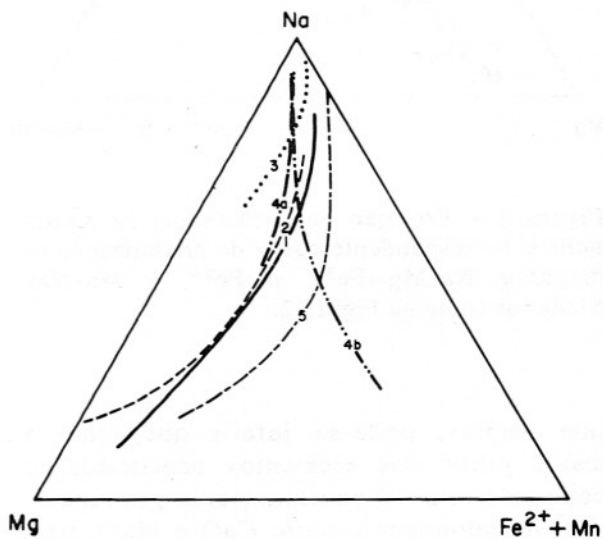


Figura 7 - Diagrama Na-Mg-(Fe²⁺ + Mn) para piroxênios de algumas ocorrências alcalinas mundiais: 1, Anitápolis; 2, Cantal (Varet, 1969); 3, Sokli (Vartiainen & Woolley, 1976); 4, Fen (Kresten & Morogan, 1986): a) área de Melteig e b) área de Holla; 5, Itapirapuã (Gomes et al., 1970); 6, Ilimaussaq (Larsen, 1976).

tardios, como acontece em Anitápolis, é fato relativamente comum na literatura de rochas alcalinas e parece não estar determinado pelas condições apontadas acima, uma vez que Scott (1976) descreve junto aos fonolitos de Tenerife, Ilhas Canárias, a associação arfvedsonita-enigmatita-egirina rica em Ti, aceita como típica de condições de baixas temperatura e fugacidade de oxigênio. O ingresso de Ti nos piroxênios egirínicos tardios acha-se provavelmente relacionado com a alta atividade desse elemento nos líquidos residuais, aliado ao excesso de álcalis sobre alumina, como proposto por Bailey (1969) e também sugerido por Ulbrich (1983) para minerais de Poços de Caldas.

Outra característica marcante nos piroxênios, assim como nos anfibólios de Anitápolis (Furtado, 1989), é a escassez de Al ocupando a posição octaédrica. Para essas fases, Leake (1965) registra forte correlação positiva entre Al^{VI} e a pressão de cristalização, enquanto que Newmann (1976) interpreta a ausência quase total de Al octaédrico nos piroxênios de Oslo como resultado de cristalização nos níveis atuais da crosta ou próximos a estes.

Nas amostras de rochas silicáticas de Anitápolis é comum a transformação de piroxênios para anfibólios do tipo richterita e Mg-arfvedsonita, e, de modo subordinado, arfvedsonita. De acordo com Wones & Gilbert (1982), as condições que regem a cristalização desses anfibólios ainda não foram bem detalhadas, mas poderiam ser extremamente importantes na documentação das trocas de fO_2 durante os estádios finais de cristalização.

Em Anitápolis, é também freqüente a associação Mg-arfvedsonita e tetraferri-flogopita, proveniente da transformação de piroxênios, na presença de magnetita (Furtado, 1989). A cristalização dessas micas envolve grande participação de Fe^{3+} , ocupando, em lugar do Al, não só a posição octaédrica quanto tetraédrica. Porém, em qua-

se todas as variedades de micas presentes em Anitápolis existe grande participação do Fe^{3+} , conforme pode ser inferido pelas cores alaranjadas no vetor X, bem como pelo balanço das fórmulas estruturais, com excesso de cátions na camada octaédrica em detrimento da baixa ocupação tetraédrica (Furtado & Gomes, 1990).

A pequena participação do Fe^{2+} nas micas de Anitápolis determina a presença maciça de variedades com annita menor que 50, com poucas análises possuindo composições mais ricas em Fe. Wones & Eugster (1965) demonstraram, em experimentos realizados na presença de sanidina e magnetita, que a quantidade de annita depende fortemente da fO_2 e que valores menores de 40 correspondem ao tampão hematita-magnetita, a temperaturas próximas a 700°C.

Da mesma forma, a associação titanita-magnetita, presença quase constante em todos os tipos petrográficos de Anitápolis, é indicativa de condições de alta fO_2 , uma vez que ela é definida como estável em condições mais oxidantes que as correspondentes ao tampão QFM (Verhoogen, 1962).

Para as rochas leucocráticas de borda, as condições de fO_2 devem ser, entretanto, menores que as esperadas para os demais tipos petrográficos, visto que titanita, acompanhada ou não de magnetita, acha-se presente, em adição a arfvedsonita e Mg-arfvedsonita ao lado de quartzo. Embora Ernst (1968) postule que a associação arfvedsonita-quartzo é estável a fO_2 correspondente ao tampão MW e temperaturas em torno de 700°C, em Anitápolis, a presença de Mg-arfvedsonita, uma fase mais oxidada, indica que as condições devem ter sido mais elevadas que aquelas definidas por esse autor.

AGRADECIMENTOS

Estes são devidos à FAPESP (Proc. 90/3692-7) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAILEY, D.K. (1969) The stability of acmite in the presence of H_2O . Amer. J. Sci., Schairer Vol., 267: 1-16.
BARBIERI, M.; BECCALUVA, L.; BROTZU,

P.; CONTE, A.; GARBARINO, C.; GOMES, C.B.; LOSS, E.L.; MACIOTTA, G.; MORBIDELLI, L.; SCHEIBE, L.F.; TAMURA, R.M.; TRAVERSA, G. (1988) Pe-

- trological and geochemical studies of alkali-
ne rocks from continental Brazil. 1. The
phonolite suite from Piratini, RS. *Geochim.
Brasil.*, 1: 109-138.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J.
(1978) Rock-forming minerals. Vol. 7, Single-
Chain Silicates. Longmans, London,
668p.
- ERNST, W.G. (1962) Synthesis, stability rela-
tions and occurrence of riebeckite-arfvedso-
nita solid solutions. *J. Geol.*, 70: 951-980.
- ERNST, W.G. (1968) Amphiboles. Springer-
Verlag, New York, 125p.
- FLOWER, M.J.F. (1974) Phase relation of titan-
acmite in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-$
 $\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$ at 1000 bars total water pressu-
re. *Amer. Mineral.*, 59: 536-548.
- FURTADO, S.M.A. (1989) Petrologia do maci-
ço alcalino de Anitápolis, SC. Tese de
Doutoramento, Instituto de Geociências/
USP, 245p.
- FURTADO, S.M.A. & SCHEIBE, L.F. (1989)
Ocorrências de lamprófiros associados aos
distritos alcalinos de Lages e Anitápolis,
SC. *Geochim. Brasil.*, 3: 149-160.
- FURTADO, S.M.A. & GOMES, C.B. (1990)
Quimismo das micas do maciço alcalino de
Anitápolis, SC. *Geochim. Brasil.*, 4: 33-47.
- FURTADO, S.M.A.; GOMES, C.B.; SCHEIBE,
L.F. (1986) Ocorrência de foscóritos no ma-
çiço alcalino de Anitápolis, SC. 34^o Congr.
Bras. Geol., Goiânia, Anais, 4: 1604-1614.
- GOMES, C.B.; MORO, S.L.; DUTRA, C.V.
(1970) Pyroxenes from the alkaline rocks of
Itapirapuã, São Paulo, Brazil. *Amer. Mine-
ral.*, 55: 224-240.
- GOMES, C.B.; BARBIERI, M.; BECCALUVA,
L.; BROTZU, P.; CONTE, A.; GARBARI-
NO, C.; MACCIOTTA, G.; MELLUSO, L.;
MORBIDELLI, L.; RUBERTI, E.; SCHEI-
BE, L.F.; TAMURA, R.M.; TRAVERSA,
G. (1987) Petrological and geochemical stu-
dies of alkaline rocks from continental Bra-
zil. 2. The Tunas Massif, State of Paraná.
Geochim. Brasil., 1: 201-234.
- GOMES, C.B.; RUBERTI, E.; MORBIDELLI,
L. (1990) Carbonatite complexes from Bra-
zil: a review. *J. South Amer. Earth Sci.*, 3:
51-63.
- KRESTEN, P. & MOROGAN, V. (1986) Feniti-
zation at the Fen Complex, Southern Nor-
way. *Lithos*, 19: 27-42.
- KUSHIRO, I. (1960) Si-Al relations in clino-
pyroxenes from igneous rocks. *Amer. J.
Sci.*, 258: 548-554.
- LARSEN, L.M. (1976) Clinopyroxenes and coe-
xisting mafic minerals from the alkaline Ili-
maussaq Intrusion, South Greenland. *J. Pe-
trol.*, 17: 258-290.
- LEAKE, B.E. (1965) The relationship between
tetrahedral aluminum and maximum possible
octahedral aluminum in natural calciferous
and subcalciferous amphiboles. *Amer. Mi-
neral.*, 50: 843-851.
- MOTOKI, A. (1986) Geologia e petrologia do
maciço alcalino da Ilha de Vitória, São
Paulo. Tese de Doutoramento, Instituto de
Geociências/USP, 254p.
- NEWMANN, E.R. (1976) Compositional rela-
tions among pyroxenes, amphiboles and
other mafic phases in the Oslo region pluto-
nic rocks. *Lithos*, 9: 85-109.
- POLDERVAART, A. & HESS, H.H. (1951)
Pyroxenes in the crystallization of basaltic
magmas. *J. Geol.*, 59: 472-489.
- RODRIGUES, E.P. (1985) O Complexo Alcali-
no de Anitápolis - Um estudo petrológico.
Dissertação de Mestrado, Instituto de Ge-
ociências/USP, 174p.
- RUBERTI, E. (1984) Petrologia do maciço al-
calino de Banhadão, PR. Tese de Doutra-
mento, Instituto de Geociências/USP, 249p.
- SCOTT, P.W. (1976) Crystallization trends of
pyroxenes from the alkaline volcanics rocks
of Tenerife, Canary Islands. *Mineral Mag.*,
40: 805-816.
- ULBRICH, M.N.C. (1983) Aspectos mineraló-
gicos e petrológicos de nefelina sienitos do
maciço de Poços de Caldas, MG-SP. Tese de
Doutoramento, Instituto de Geociências/
USP, 499p.
- ULBRICH, M.N.C. & ULBRICH, H.H.G.J.
(1982) Esquemas de cálculo para determina-
ção de $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ de piroxênios egirfínicos.
32^o Congr. Bras. Geol., Salvador, Bol. Esp.,
2: 78.
- VALENÇA, J.C. (1980) Geology, petrography
and petrogenesis of some alkaline igneous
complexes of Rio de Janeiro State, Brazil.
PhD Thesis, University of Western Ontario,
Canadá, 248p.
- ✓ARET, J. (1969) Les pyroxenes des phonolites
du Cantal (Auvergne, France). *N.J. Mineral.
Mh.*, 4: 174-184.
- VARTIAINEN, H. & WOOLLEY, A.R. (1976)
The petrography, mineralogy and chemistry
of the fenites of the Sokli Carbonatite In-
trusion, Finland. *Geol. Surv. Finland Bull.*,
280: 87.
- VERGARA, V.D. (1980) Pesquisa geológica no
complexo alcalino de Anitápolis. 31^o Congr.
Bras. Geol., Camboriú, Anais, 4: 2502-
2517.
- WONES, D.R. & EUGSTER, H.P. (1965) Stabi-
lity of biotite: experiment, theory and appli-
cation. *Amer. Mineral.*, 50: 1228-1272.
- WONES, D.R. & GILBERT, M.C. (1982) Am-
phiboles in the igneous environment. *Min-
eralogical Society of America, Reviews in
Mineralogy, Vol. 9B, Amphiboles: Petro-
logy and Phase Relations*, p. 355-383.