

## **NEFELINA SIENITOS DO MACIÇO ALCALINO DE POÇOS DE CALDAS, MG-SP: CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E PETROLÓGICA**

Mabel Norma Costas Ulbrich  
Celson de Barros Gomes  
Horstpeter H. G. J. Ulbrich  
Instituto de Geociências, USP

## **ABSTRACT**

Discrete bodies of nepheline syenites crop out in the northern half of the Poços de Caldas alkaline massif. Several facies can be identified in the field, based on structural, textural and mineralogical variations. The main rock-forming minerals are Or-rich potash feldspar (40-60%), nepheline (20-36%) and aegirine-augite to aegirine (about 15%). The aegiritic nepheline syenites may have some amphibole (manganeseoan magnesio-arfvedsonite) together with several rare-metal silicates (eudialite, etc.).

In the intermediate and miaskitic types, the common accessory minerals are sphene, opaques and fluorite (with biotite or amphibole and/or sodic pyroxene).

Potash feldspar compositions indicate crystallization from K-rich magmas; the mineral shows, on the other hand, variable structural states with highly ordered microcline and orthoclase coexisting in the same grain or in different crystals of the same sample. These features suggest submagmatic re-equilibration controlled by the peralkaline character of the magmas. Nephelines in fine-grained miaskitic nepheline syenites exhibit large amounts of excess silica, indicating crystallization temperatures of more than 750°C; in medium-grained apaititic rocks the estimated temperatures are  $\pm 600^\circ\text{C}$ . In two miaskitic facies, pyroxene composition varies continuously from soda-augite (in the reabsorbed cores of the grains) to aegirine (in the margins). The biotite flakes are commonly zoned. Lack of fayalite and aenigmatite in the nepheline syenites indicates that crystallization proceeded at  $f_{\text{O}_2}$  values higher than those of the FMQ buffer.

## INTRODUÇÃO

Os nefelina sienitos são rochas raras e muito diferenciadas, constituídas essencialmente de feldspato alcalino e nefelina, acompanhados de minerais máficos diversos presentes, em geral em quantidades subordinadas às dos felsíticos. A sua antiga divisão em tipos agpaíticos e miasquíticos, com base apenas na relação molecular ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ), é hoje ampliada, incluindo-se feições mineralógicas resultantes do mesmo específico dos agpaítos, particularmente a sua riqueza anormal em vários metais raros (e.g., Sørensen, 1974a). Nas rochas agpaíticas, e na condição de acessórios típicos, aparecem alguns silicatos sem alumínio portadores de metais raros (eudialita, lamprofilita, astrofilita, ringuita e vários outros). Nas miasquíticas ocorrem em quantidades acessórias minerais característicos das rochas calco-alcalinas normais: titanita, zircão, biotita, apatita, etc. Em rochas com quimismo intermediário encontram-se tanto minerais "agpaíticos" como "miasquíticos".

As rochas agpaíticas, embora de ocorrência rara, são constituintes importantes de alguns dos macicos alcalinos do mundo, como

Khibina e Lovozeró, na URSS, Pilanesberg, na África do Sul, e Illímaussaq, na Groenlândia oriental. Nefelina sienitos com eudialita, já conhecidos no maciço de Poços de Caldas desde os trabalhos de Guimaraes (1948), aparecem identificados no mapa de Ellert et al. (1959; Fig. 1) como uma região de "lujauritos e chibinitos". Trabalhos mais recentes (H.H. Ulbrich, em preparação), visando caracterizar faciologícamente as rochas faneríticas do distrito, permitiram reconhecer vários outros nefelina sienitos com afinidades agpaíticas; resultados parciais das observações de campo são fornecidos na Fig. 2. Esses trabalhos serviram de base para os estudos de detalhe aqui desenvolvidos, com os quais se pretende estabelecer possíveis condições de cristalização dos nefelina sienitos agpaíticos e miasquíticos, relações genéticas entre os diversos corpos, etc., através dos dados químicos de minerais félscicos e máficos das rochas.

GEOLOGIA

O maciço alcalino de Poços de Caldas, de idade Mesozóica (Amaral et al., 1967; Bushee, 1974), invade rochas precambrianas brasilianas do Bloco Pinhal (e.g., Artur, 1980; Wernick et al., 1981). Observa-

No mapa geológico da Fig. 1 (Ellert et al., 1959), observa-se que o maciço tem forma subcircular e ocupa área aproximada de 800 km<sup>2</sup>, numa região localizada ao S de Minas Gerais e NE de São Paulo. Petrografia, dominam quase por inteiro as rochas alcalinas feldspácticas do campo II da classificação modal proposta pelo IUGS (Streckeisen, 1976), ocorrendo seja como nefelina sienitos, seja como tinguaítios e fonólitos. Para informações petrográficas adicionais, ver Ellert (1959) e Björnberg (1959).

O maciço destaca-se na paisagem de rochas precambrianas por um marcado desnível topográfico nas suas bordas setentrional, ocidental e meridional. Nessas bordas ocorrem corpos de tingualtos que foram interpretados por Ellert (1959) como remanescentes de diques anelares de notável expressão. No interior, a topografia é mais plana, com relevo ainda íngreme em algumas áreas, por exemplo, nas partes W e SE do maciço.

NEFELINA SIENITOS

Estas rochas cobrem aproximadamente 120 km<sup>2</sup> e estão distribuídas como corpos de dimensões pequenas ou moderadas, principalmente nas partes setentrional e central do maciço. As áreas em estudo são mostradas na Fig. 2, com os nefelina sienitos agrupados em quatro regiões distintas: Anel Norte (A), interior do maciço (B), Morro do Serrrote (C) e região ocidental do Anel Norte (D).

Os corpos de nefelina sienitos, raramente homogêneos, aparecem constituídos de vários fácies petrográficos, identificados no campo por pequenas variações na estrutura, textura ou mineralogia. O exemplo mais marcante é o dos corpos *lujaurítico-chibinitíticos* (setor A da Fig. 2). No corpo ocidental, com bons afloramentos, reconheceram-se cinco fácies petrográficos que se sucedem do centro à borda com uma estrutura característica: dois fácies centrais de *lujaurítos* (com dife-  
rrente granulação e teores de minerais máficos); dois fácies de nefelina sienitos com textura traquítóide, e um fácies externo de *chibinitítos*. As variedades de nefelina

Os "lujauritos" e os "chibinitos" são variedades de nefelina sienitos bem definidos na literatura universal (Johannsen, 1931; Sørensen, 1974b); os restantes nefelina sienitos não merecem nomes específicos. A nomenclatura utilizada na Fig. 2 pretende caracterizar cada corpo isoladamente adicionando ao nome "nefelina sienito" algum detalhe que lembre a cor, mineralogia ou textura das rochas que compõem tal fácies dominante; às vezes, agrega-se um nome geográfico permitindo a sua localização. Descrições completas dos corpos e fácies aparecem em Ulbrich (1983).

## Petrografia

Os nefelina sienitos são em sua maioria leucocráticos a hololeucocráticos, com estrutura maciça e textura ora hipidiomórfica equigranular ou inequigranular, ora foiaítica, de granulação média a gros-

sa. Em alguns fácies as rochas apresentam forte orientação, sobretudo planar, e o exemplo mais extremo é o dos *lujauritos*; neles, os piroxênios aciculares se dispõem formando densas malhas de agulhas intercrescidas que rodeiam como "folhas maficas" os minerais felsicos, lembrando a textura de um "augen" ou "flasergneiss".

Um corpo especial é o dos *pseudoleucita nefelina sienitos*, que possuem pseudoleucitas de tamanhos variáveis e distribuição heterogênea, em matriz fofaítica.

A mineralogia essencial dos nefelina sienitos varia pouco; o feldspato potássico é o mineral dominante (40-60% modal), seguido de nefelina (20-36% modal). Dos minerais ferromagnesianos, o único importante é o piroxênio sódico (egirina-augita a egirina) em proporções que raramente ultrapassam os 15% modais, exceção feita aos *lujauritos* que contêm 25 a 30% de piroxênio. Em quantidades não maiores que 1% encontra-se por vezes biotita nas rochas de afinidade miasquítica, ou arfvedsonita nos tipos agpaíticos ou intermediários, onde o anfibólito acompanha invariavelmente egirina.

A presença de silicatos de metais raros (SMR) como eudialita, lamprofilita, rinquita, etc., junto com os minerais maficos (anfibólito ou biotita, principalmente), permite separar os nefelina sienitos agpaíticos dos miasquíticos (ou intermediários). Entre os fácies agpaíticos, contam-se os seguintes: a) os dois corpos *lujaurítico-chibiniticos*, aflorando na região da Pedra Balão (setor A, Fig. 2), que contêm até 10% de eudialita e 4% de outros SMR; b) os *chibinitos de Botelhos* e os *orientais* (setor A, Fig. 2) com proporções variáveis de SMR; c) os *nefelina sienitos com eudialita do Serrrote* (setor C, Fig. 2), que possuem 3 a 3,5% de SMR e d) os *nefelina sienitos ocidentais com eudialita* (setor D, Fig. 2), também com 3% de SMR.

Os restantes nefelina sienitos, de afinidade miasquítica ou intermediária, apresentam em geral menos de 4% de minerais acessórios, principalmente titanita, grãos opacos e fluorita. Alguns fácies exibem pequenas quantidades de anfibólito sódico e/ou giannetita; este último é um mineral reconhecido apenas nas rochas de Poços de Caldas (Guimaraes, 1948; Branco, 1956) e ainda pobemente caracterizado (e.g., Fleischer, 1949).

#### Mineralogia

O feldspato potássico ocorre em geral como cristais subidiomórficos, não pertíticos, com geminação de Carlsbad e Baveno. O estado estrutural é muito variável, tanto as observações ópticas (ângulo 2V e presença ou ausência de geminação múltipla albita-periclinio) como os estudos de difratometria de raios X demonstram que na maioria dos nefelina sienitos coexistem microclinio de alta triclinicidade ( $\Delta_{131}=0,75$ ; Goldsmith e Laves, 1954) com ortoclásio, nos mesmos grãos de feldspato, ou em diferentes cristais da mesma amostra. Em alguns fácies, o feldspato potássico é unicamente microclinio máximo ( $\Delta_{131}>0,86$ ).

A nefelina forma grãos subidiomórficos a idiomórficos e está comumente alterada em natrolita e analcima nas rochas agpaíticas, e em natrolita e/ou cancrinita nas de afinidade miasquítica.

Outros minerais felsicos de ocorrência esporádica incluem albita, sodalita e analcima, os dois últimos em parte primários. Quantidades subordinadas de albita foram reconhecidas em alguns fácies de contato, tanto em rochas agpaíticas como miasquíticas. O mineral se apresenta como cristais frescos, com geminação polissintética e hábito tabular, com bordas irregulares a onduladas. Na maioria das vezes a albita acha-se total ou parcialmente inclusa em cristais maiores de feldspato potássico; os grãos de feldspato em contato com albita são via de regra pertíticos e exibem geminação múltipla Ab-Pe. Ocasionalmente, sodalita e analcima (possivelmente primárias) aparecem também em alguns fácies, sobretudo nas rochas dos corpos *lujaurítico-chibiniticos* (Fig. 2, setor A); a analcima, entretanto, é mais comum como mineral tardio de alteração.

Na maioria dos nefelina sienitos, o piroxênio forma grãos xenomórficos zonados, variando de egirina-augita nos centros até egirina nas bordas, e também agregados fibrosos intersticiais, de evidente cristalização tardia. Nos *lujauritos*, aparecem unicamente cristais prismáticos alongados a aciculares com fraco zoneamento. Nos *chibinitos*,

piroxênio ocorre segundo três maneiras distintas: a) escassos cristais pequenos prismáticos, b) grãos grandes (maiores que 5 mm) xenomórficos, poiquilíticos, com zoneamento setorial que se caracteriza por mudanças na cor e no pleocroísmo em diferentes setores dos cristais, c) agregados fibrosos intersticiais.

Em alguns corpos de nefelina sienitos da Pedreira e nefelina sienitos manchados (anteriormente denominados de "híbridos" e "finos do Anel Norte", respectivamente; ver Ulbrich, 1983), os piroxênios exibem extremo zoneamento. Os cristais possuem núcleos augíticos ( $\alpha\text{Ac}=35-37^\circ$ ), às vezes idiomórficos, mais comumente reabsorbidos, rodeados por zonas extremamente finas de egirina-augita que passa a egirina ( $\alpha\text{Ac}=0-3^\circ$ ) nas bordas dos grãos.

Biotita amarela-marrom ocorre em algumas rochas miasquíticas como placas intersticiais aos demais minerais, ou então substituindo piroxênio. Na maioria das placas intersticiais nota-se mudanças marcantes na intensidade do pleocroísmo segundo áreas ou zonas bem definidas. Identificam-se dois casos: um deles, mais raro, mostra a passagem gradativa de uma zona com pleocroísmo intenso ( $\alpha$ = amarelo,  $\gamma$ = marrom) para outra com pleocroísmo mais fraco ( $\alpha$ = marrom-avermelhado,  $\gamma$ = vermelho). Entretanto, o caso mais comum configura-se quando duas áreas com pleocroísmo diferente apresentam-se com contatos nítidos; os limites entre as duas zonas podem ser retos ou, mais comumente, interdigitados. Nas rochas estudadas encontram-se tanto biotitas zonadas, como cristais de aspecto homogêneo.

Anfibólito sódico, arfvedsonítico, é encontrado em algumas rochas agpaíticas. Aparece como duas variedades texturais distintas, a mais comum sendo um anfibólito parcial ou totalmente incluído em cristais de piroxênio, mostrando em alguns casos relações de substituição (anfibólito substituindo piroxênio). A segunda variedade, restrita aos *lujauritos*, ocorre na forma de grandes cristais xenomórficos e poiquilíticos. Nos dois casos as propriedades ópticas são semelhantes, em particular o pleocroísmo:  $\alpha$ = verde-azulado e  $\gamma$ = verde-amarelado claro. Nos grãos poiquilíticos observa-se às vezes zoneamento óptico.

Os minerais acessórios típicos dos nefelina sienitos agpaíticos (eudialita, lamprofilita, astrofilita, etc.) são intersticiais às fases felsicas. A titanita e os grãos opacos das rochas miasquíticas aparecem comumente associados aos piroxênios; nos nefelina sienitos da Pedreira em especial, são vistos titanita e grãos opacos incluídos nas zonas de egirina-augita dos cristais zonados de piroxênio.

#### QUÍMICA MINERAL

Os minerais mais importantes dos nefelina sienitos (feldspato potássico, nefelina, albita, piroxênio, biotita e anfibólito) foram analisados numa microssonda eletrônica ARL do Instituto de Geociências da USP (para maiores detalhes ver Ulbrich, 1983). As relações  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  dos piroxênios foram calculadas por meio do programa SILCAL (Ulbrich e Ulbrich, 1982).

#### Feldspato potássico

Em geral os feldspatos são ricos em  $\text{K}_2\text{O}$ . Os teores de  $\text{Na}_2\text{O}$  raramente excedem 2% e o  $\text{CaO}$  acha-se presente em quantidades muito pequenas, por vezes aparecendo apenas como elemento traço. O ferro, provavelmente como  $\text{Fe}^{3+}$ , é encontrado na maioria dos cristais onde ocorre substituindo o alumínio. Não obstante, existe a possibilidade de que em alguns feldspatos parte do Fe detectado seja resultante da presença de partículas finíssimas de óxidos de ferro. Os dados de feldspato potássico de alguns fácies de nefelina sienitos agpaíticos e miasquíticos são fornecidos na Tabela 1. Nos nefelina sienitos da Pedreira, o mineral exibe por um lado, zonalidade marcante e, por outro, composição química pouco comum (Tabela 1) devida principalmente aos teores elevados de Sr. Em termos de composição, os núcleos dos cristais são mais ricos em Na, Sr e Ca que as bordas. Ba está presente em quantidades semelhantes às do Ca; contudo, como os dados sobre o elemento são erráticos, eles não foram incluídos na Tabela 1.

## Nefelina

Análises de nefelina são dadas na Tabela 1. Além dos elementos nela listados, fizeram-se testes para determinar a presença de Mg, Ca, Sr e Ba, com os dois últimos não detectados em quaisquer das amostras estudadas. As nefelinas das *nefelina sienitos da Pedreira* não contêm Sr, conquanto esse elemento seja abundante nos feldspatos coexistentes. Já Mg e Ca estão presentes apenas em algumas amostras, porém em quantidades muito pequenas, dentro dos limites de detecção da microsonda. As nefelinas possuem teores moderados de K<sub>2</sub>O e quantidades menores, ainda que significativas, de ferro, que, em geral, variam inversamente com o conteúdo de alumínio. Contudo, não foi reconhecido qualquer padrão particular de substituição de Al por Fe<sup>3+</sup>. O Fe<sup>3+</sup> pode ser mais abundante nos núcleos ou nas bordas dos cristais, ou mesmo mostrar variações em zonas alternantes; analogamente, diferentes amostras do mesmo corpo podem exibir teores variáveis de Fe<sup>3+</sup>. A característica química mais marcante das nefelinas dos vários fácies litológicos refere-se ao excesso de sílica (Qz), que é elevado nos fácies de granulação fina (geralmente fácies de contato) e baixo, ou muito baixo, nos fácies de granulação grossa.

## Albita

Em todas as rochas portadoras de albita tabular, o mineral aparece quimicamente homogêneo e com composição correspondente a 98-100% Ab.

## Piroxênio

Em conjunto, os piroxênios pertencem à série soda-augita-egirina-augita-egirina. As variações químicas mais marcantes consistem, em todos os casos, do aumento nos teores de Fe<sup>3+</sup> e Na (do centro para a borda dos grãos) e a consequente diminuição de Ca, Mg e Fe<sup>2+</sup>; essas variações se fazem acompanhar de mudanças correspondentes nos teores de Si, Al, Ti, Zr e Mn. Embora os piroxênios de cada fácie ou corpo de nefelina sienitos destacam-se por mostrar, em detalhe, uma tendência de evolução típica, ou até única, é possível mencionar-se algumas características gerais:

a) os piroxênios de alguns fácies miasquíticos (*nefelina sienitos da Pedreira* e *nefelina sienitos manchados*) possuem zoneamento químico contínuo; o zoneamento é dado pela presença de núcleos de soda-augita e uma zona externa de egirina-augita e egirina (Tabela 2), passando por uma "zona de transição" de pouca expressão volumétrica, porém, com rápidas mudanças químicas (Fig. 3);

b) nos fácies agpaíticos, e em outros fácies miasquíticos ou intermediários, o zoneamento é mais fraco (Tabela 2 e Fig. 3); os centros dos cristais são de egirina-augita ou egirina, com teores de Na maiores nas bordas;

c) em geral, o teor de Si dos piroxênios estudados acompanha o aumento de Na, com Al mostrando relação inversa. Como consequência, as bordas egirínicas dos grãos são mais ricas em Si e mais pobres em Al que os centros de egirina-augita. Às vezes, as quantidades de Si-Al mostram-se insuficientes para preencher as posições tetraédricas do mineral; nestes casos, é possível que tais posições sejam ocupadas por Fe<sup>3+</sup>;

d) os teores de Ti, Zr e Mn dos piroxênios são moderados a baixos; nas rochas miasquíticas, observa-se uma tendência ao enriquecimento em Ti e Zr nas bordas egirínicas dos grãos, o que não ocorre nas agpaíticas (Tabela 2). O Mn é em geral covariante com o Fe<sup>2+</sup>, à exceção das bordas de alguns cristais ou em agregados fibrosos de piroxênio egirínico, que são relativamente ricos no elemento.

## Biotita

As micas analisadas pertencem à série flogopita-annita-oxianita (Wones e Eugster, 1965). As modificações na relação Mg:Fe são diferentes para cada corpo de nefelina sienitos; em conjunto, abrangem um campo composicional que vai de annita<sub>30</sub> a annita<sub>96</sub> (o teor de annita

sendo equivalente à relação (Fe+Mn)/(Fe+Mn+Mg), com Fe(total) = Fe<sup>2+</sup>). Em apenas um corpo, o de *nefelina sienitos cinzas do Anel Norte*, as micas passam de annita<sub>35</sub> a annita<sub>84</sub> (Tabela 3). Em geral as micas que substituem o piroxênio são homogêneas e ricas em annita.

As variações na relação Mg:Fe acham-se acompanhadas por mudanças nos demais elementos, em particular Si, Al, Ti, Mn e F; Cl e Ba não foram detectados nas biotitas. Via de regra, o Si diminui e o Al aumenta à medida que se eleva o teor de annita. O teor médio de Al é baixo nessas micas, sendo mesmo possível inferir-se que parte das posições tetraédricas estejam preenchidas por Fe<sup>3+</sup>. Os teores de Ti são moderados e os de Mn relativamente elevados. Os dados apresentados mostram que a substituição de OH por F encontra-se diretamente relacionada com o teor de Mg das micas (Rosenberg e Foit, 1977).

## Anfibólio sódico

O mineral apresenta quimismo semelhante nos diferentes nefelina sienitos, exibindo zoneamento químico apenas nos *lujauritos*. Trata-se de um anfibólio arfvedsonítico com mais de 6,5% de Na<sub>2</sub>O e mais de 2,0 de K<sub>2</sub>O, além de teores muito baixos de CaO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Tabela 3). A variedade presente pode ser classificada como magnésio-arfvedsonita manganesifera, com base nos teores elevados de álcalis, Mg e Mn, além da pobreza em Ca e Al (Leake, 1978). Não contém Cl detectável sen do, porém, relativamente rica em F (Rosenberg e Foit, 1977).

## CONSIDERAÇÕES PETROLÓGICAS

Nas regiões setentrional e central do maciço de Poços de Caldas ocorre um número relativamente elevado de corpos de nefelina sienitos, a maioria deles constituído por vários fácies petrográficos com características texturais e estruturais próprias. Observações de detalhe, feitas no Anel Norte e no Morro do Serrote, indicam uma possível seqüência que começa com nefelina sienitos miasquíticos ou intermediários e culmina com a invasão de magmas de nefelina sienitos agpaíticos (Ulbrich et al., 1979). Os trabalhos de campo e o químismo dos minerais, principalmente dos máficos, sugere que um mesmo tipo de magma se dispõe na forma de vários corpos discretos, em geral muito separados entre si, e a profundidades que não devem exceder alguns poucos quilômetros. Cada corpo de nefelina sienitos constitui uma unidade geológica perfeitamente definida; por outro lado, é evidente que o número de corpos individuais excede notavelmente o dos tipos magmáticos. Concede-se a existência de pelo menos dois tipos de magmas na região, o agpaítico e o miasquítico (ou menos agpaítico) relacionados entre si por processos de diferenciação (H.H. Ulbrich, em preparação).

As rochas constituintes dos corpos *lujaurítico-chibiníticos* são os tipos mais fortemente agpaíticos da região, a julgar pelo elevado teor de SMR. As evidências texturais mostram que nessas rochas, e em outras agpaíticas de Poços de Caldas, os feldspatos potássicos e/ou as nefelinas representam as primeiras fases de cristalização (fases "liquidus"), formando-se em seguida os piroxênios. Nos *lujauritos* em particular, os piroxênios egirínicos aparecem como cristais prismáticos-aciculares idiomórficos; entretanto, as texturas sugerem que esse hábito é uma característica que guarda relação com a cinética de cristalização, uma vez que os cristais de piroxênio ocorrem intersticialmente aos grãos maiores de feldspato e nefelina, aos quais rodeiam fluidamente. Respeita-se assim a "ordem agpaítica de cristalização", presente em rochas agpaíticas do mundo inteiro (Sørensen, 1974a; Kogarko e Romanchev, 1977).

Os *nefelina sienitos da Pedreira* são, por outro lado, rochas tipicamente miasquíticas. Nelas, o piroxênio contém núcleos de soda-augita, comumente reabsorvidos, exibindo por vezes contornos idiomórficos; as bordas egirínicas dos grãos apresentam-se descontínuas e irregulares. Portanto, a textura indica que os núcleos de soda-augita se formaram muito antes que as bordas egirínicas e que são anteriores, ou em parte contemporâneas, aos minerais félscicos (especialmente a nefelina). Nessas rochas, os núcleos de piroxênio representam a fase "liquidus", seguida posteriormente pelos minerais félscicos.

O conteúdo de alguns elementos menores, em especial de Zr e

Ti, nos piroxênios está diretamente relacionado com o caráter mais ou menos percalcino dos magmas. Nos magmas agpaíticos, o Zr concentra-se nos líquidos residuais forma, juntamente com outros cations, os silicatos de metais raros, principalmente eudialita e, em consequência, as bordas egirínicas dos cristais de piroxênio mostram-se empobrecidas em Zr (Tabela 2). Observações semelhantes foram descritas para o maciço Illímaussaq (Larsen, 1976). O comportamento é diferente nos magmas miasquíticos, com o Zr enriquecido nos líquidos residuais se concentrando preferencialmente nas bordas externas dos piroxênios. Conclui-se assim que egirinas relativamente enriquecidas em Zr devem ser características de magmas miasquíticos.

Idêntico raciocínio aplica-se na interpretação do comportamento do Ti. Nos magmas miasquíticos, o Ti pode concentrar-se nos líquidos finais e, dessa forma, ingressar nas bordas dos cristais de piroxênio ou em outros minerais ferromagnesianos, uma vez formadas as fases titaniferas como titanita, ilmenita, magnetita, etc., que são comumente de cristalização precoce; ao contrário, nos magmas agpaíticos, o Ti aparece nos silicatos de metais raros de cristalização tardia. Exemplos desse comportamento observam-se nos piroxênios de *lujauritos*, *nefelina sienitos* da *Pedreira* e *nefelina sienitos manchados* (Tabela 2).

A composição química dos feldspatos potássicos, que constituem mais de 50% das rochas, sugere cristalização a partir de magmas ricos em K. Por outro lado, o mineral apresenta grande complexidade estrutural, mostrando na maioria dos fácies a coexistência de ortoclásio e microclínio de alta triclinicidade num mesmo cristal ou em diferentes grãos da amostra. Estas características dos feldspatos, raramente mencionadas nas rochas calcio-alcalinas, são comuns em nefelina sienitos, a julgar pelos dados de literatura (Mackenzie, 1954; Retief, 1962; Czygan, 1969, entre outros) e não podem ser interpretados no sentido clássico, considerando que o estado estrutural do feldspato depende exclusivamente da história de resfriamento do corpo ígneo.

Confirmando as sugestões dadas por Parsons e Boyd (1971) e Parsons (1978), considera-se aqui que a transformação ortoclásio-microclínio depende não só da velocidade de resfriamento das rochas, mas, principalmente, da influência dos líquidos magmáticos ou residuais, ricos em álcalis e voláteis, que promovem ou aceleram o processo de ordenamento.

Do mesmo modo, sugere-se que a albite tabular, presente apenas em alguns fácies de contato de rochas agpaíticas e miasquíticas, possui origem metassomática com a sua formação se dando a partir das soluções residuais que percolaram as rochas. Note-se que os feldspatos potássicos vizinhos são pertíticos e contêm invariavelmente geminação multipla, indicando que o ordenamento estrutural, e a eventual exsolução da fase sódica, são fenômenos de reequilíbrio e demonstram, ainda que em escala reduzida, a importância da recristalização sob condições pós-magmáticas nas rochas alcalinas.

As nefelinas encontradas em nefelina sienitos miasquíticos de granulação fina possuem elevado excesso de sílica (Qz), a sugerir, segundo estudos experimentais (Hamilton e Mackenzie, 1960; Hamilton, 1961), elevada temperatura de cristalização (superiores a 750°C; Fig. 4). Em algumas rochas agpaíticas de granulação média, as evidências texturais indicam cristalização simultânea de nefelina e feldspato potássico; os dados químicos dos dois minerais, aplicando-se o geotermômetro de Powell e Powell (1977), fornecem temperaturas de cristalização em torno de 600°C. Nas rochas de granulação grossa, tanto agpaíticas como miasquíticas, a composição da nefelina contém pouco excesso de sílica e se concentra no "campo de convergência" de Morozewicz-Buerger (localizado entre  $Ne_{75.1}Ks_{20.5}Qz_{4.4}$  e  $Ne_{73}Ks_{27}$ ); essas composições apontam para temperaturas de cristalização inferiores a 500°C, provavelmente como resultado de reequilíbrio submagmático. Paralelamente, sabe-se que as rochas de granulação grossa são também aquelas onde predomina feldspato ordenado (microclínio).

Os minerais máficos, quimicamente mais complexos que os félidos, possibilitam o aparecimento de nítidas tendências evolutivas (Fig. 3) que permitem caracterizar, por um lado, a composição dos magmas e, por outro, as próprias condições de cristalização dos minerais. A relação Fe:Mg das arfvedsonitas depende essencialmente dos líquidos dos quais o mineral cristaliza (Ernst, 1962); no entanto, admite-se que

tanto o conteúdo como as variações de  $Fe^{3+}$  nos minerais máficos são predominantemente controladas por mudanças na  $fO_2$ . Em geral, a ausência de faialita e enigmatita nas rochas faneríticas de Poços de Caldas, como também o teor de acmita dos piroxênios precoces dos *nefelina sienitos da Pedreira* e *nefelina sienitos manchados* (9-14% de Ac nos núcleos de soda-augita), sugere que a cristalização das rochas processou-se sob condições de  $fO_2$  elevadas, superiores às do buffer FMQ (Nash e Wilkinson, 1970; Marsh, 1975; Larsen, 1976).

Evidências de mudanças na  $fO_2$  (e/ou  $PH_2O$ ) durante a cristalização das rochas são observadas em piroxênios e biotitas. A reabsorção dos núcleos de soda-augita nos piroxênios de alguns fácies miasquíticos e a consequente cristalização de piroxênio progressivamente mais rico em  $Fe^{3+}$  e Na, acompanhado de titanita e magnetita, sugere elevação da  $fO_2$  nos estágios iniciais de cristalização dessas rochas (Carmichael e Nicholls, 1967; Stephenson e Upton, 1982). Por outro lado, o zoneamento peculiar das placas intersticiais de biotita em outros nefelina sienitos miasquíticos caracteriza também mudanças bruscas nas variáveis intensivas ( $fO_2$  ou  $PH_2O$ ).

#### AGRADECIMENTOS

São devidos principalmente às agências de pesquisa (FINEP, Proc. 3.3.82.0381.00, beneficiário C.B. Gomes) e FAPESP (H.H.G.J. Ulbrich), que deram o apoio financeiro indispensável à realização deste trabalho e às pessoas que colaboraram na sua elaboração.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, G., BUSHEE, J., CORDANI, U.G., KAWASHITA, K. e REYNOLDS, J.H. - 1967 - Potassium-argon ages of alkaline rocks from southern Brazil. Geoch. Cosmoch. Acta, 31: 117-142.
- ARTUR, A.C. - 1980 - Rochas metâmorficas dos arredores de Itapira, SP. Dissertação de Mestrado, Inst. Geoc., USP: 192 p.
- BJÖRNBERG, A.J.S. - 1959 - Rochas clásticas do planalto de Poços de Caldas. Fac. Fil. Ciênc. Let., USP, Bol. 237: 65-122.
- BRANCO, J.J.R. - 1956 - Notas sobre a geologia e petrografia do planalto de Poços de Caldas, MG. Esc. Eng., Univ. Minas Gerais, Inst. Pesq. Radioativas, Publ. 5: 72 p.
- BUSHEE, J. - 1974 - Geology and petrography of the lujaurite and nearby rocks, Poços de Caldas, Brazil. Ph.D. thesis, Dept. of Geol. and Geophys., Univ. California, Berkeley: 137 p.
- CARMICHAEL, I.S.E. e NICHOLLS, J. - 1967 - Iron-titanium oxides and oxygen fugacities in volcanic rocks. J. Geophys. Res., 72: 4665-4687.
- CZYGAN, W. - 1969 - Petrographie und alkali-verteilung im foyait der Serra de Monchique, Süd-Portugal. Neues Jb. Miner. Abh. 177: 32-73.
- ELLERT, R. - 1959 - Contribuição à geologia do maciço alcalino de Poços de Caldas. Fac. Fil. Ciênc. Let., USP, 237: 5-63.
- ELLERT, R., BJÖRNBERG, A.J.S. e COUTINHO, J.M.V. - 1959 - Mapa geológico do maciço alcalino de Poços de Caldas, Brasil. Escala 1:75.000 . Fac. Fil. Ciênc. Let., USP.
- ERNST, W.G. - 1962 - Synthesis, stability relations and occurrence of riebeckite-arfvedsonite solid solutions. J. Geol., 70: 951-980.
- FLEISHER, M. - 1949 - New mineral names. Pennaite, giannetite. Amer. Miner., 34: 770.
- GOLDSMITH, J.R. e LAVES, F. - 1954 - The microline-sanidine stability relations. Geoch. Cosmoch. Acta, 5: 1-19.
- GUIMARÃES, D. - 1948 - Os depósitos zirconíferos do Planalto de Poços de Caldas e o geoquímismo do Zr. Inst. Tecnol. Ind., Bol. 6: 3-40.
- HAMILTON, D.L. - 1961 - Nephelines as crystallization temperature indicators. J. Geol., 69: 321-329.
- HAMILTON, D.L. e MACKENZIE, W.S. - 1960 - Nepheline solid solution in the system  $NaAlSiO_4$ - $KAlSiO_4$ - $SiO_2$ . J. Petrol., 1: 56-72.
- JOHANNSEN, A. - 1931 - A descriptive petrography of the igneous rocks. Vol. I - Introduction, textures, classifications and glossary. Univ. Chicago Press, Chicago, 318 p.
- KOGARKO, L.N. e ROMANCHEV, B.P. - 1977 - Temperature, pressure, redox conditions and mineral equilibria in agpaitic nepheline syenites and apatite-nepheline rocks. Trad. de Geokhimiya, 1977. Geoch.

Amostra	Feldspatos potássicos			Nefelinas		
	Lujauritos	Ne Si da Pedreira	Ne Si cinza Anel Norte	Lujauritos	Ne Si da Pedreira	Ne Si cinza do Anel Norte
Granulação da rocha	46	134	238	176	46	134
SiO <sub>2</sub>	64,3	64,7	65,3	64,4	63,9	42,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>b</sup>	18,0	18,0	19,4	19,7	18,1	33,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>b</sup>	0,54	0,46	0,46	0,58	0,67	0,46
CaO	0,03	0,03	0,36	0,08	0,02	1,98
Na <sub>2</sub> O	1,05	1,85	4,76	2,91	0,39	14,9
K <sub>2</sub> O	15,8	14,3	9,04	12,9	16,3	7,86
SrO			1,38	0,33		6,04
Total	99,72	99,34	100,70	100,90	99,38	99,42
Fórmula estrutural na base de 32 oxigênios						
Si	11,992	11,806	11,739	11,936	8,282	8,600
Al	3,951	3,929	4,135	4,229	7,703	7,089
Fe	0,076	0,063	0,063	0,079	0,067	0,285
Ca	0,006	0,006	0,069	0,016		
Na	0,378	0,665	1,669	1,030	5,612	5,921
K	3,744	3,382	2,084	2,088	1,951	1,475
Sr			0,145	0,035		
Or	91,1	84,2	53,5	74,5	96,6	Ne
Ab	8,7	15,6	40,4	24,1	3,3	Ks
An	0,2	0,2	6,1C	1,4C	0,1	Qz

Tabela 1 - Análises químicas por microsonda de feldspatos potássicos e nefelinas de alguns nefelina sienitos de Poços de Caldas

a - zonas com teores diferentes de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 b - Fe (total) calculado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 c - "An" inclui Ca e Sr

Tabela 2 - Análises químicas por microssonda de piroxênios de alguns nefelina sienitos de Poços de Caldas.

Amostra	Lujauritos			Nefelina Sienitos da Pedreira			Ne Si manchados		Ne Si finos ocidentais	
	505	238	452		540					
SiO <sub>2</sub>	51,2	51,8	50,1	51,5	49,0	50,2	51,2	49,1	50,3	50,8
TiO <sub>2</sub>	1,48	1,19	1,26	4,02	0,84	4,96	3,00	0,77	2,38	0,69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,79	0,80	2,45	1,28	1,10	0,93	0,65	2,58	1,08	0,94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>b</sup>	23,6	30,2	3,28	21,2	7,94	21,8	28,6	6,52	28,0	12,9
FeO <sup>b</sup>	5,31		11,8	6,8	10,7	4,89		5,87	1,32	11,6
MnO	0,83	0,89	1,16	0,99	2,00	1,20	2,41	1,52	2,27	1,60
MgO	1,39	0,79	8,04	0,54	6,90	0,50	0,18	11,0	0,20	2,58
CaO	4,49	0,70	19,2	3,13	18,7	3,15	0,35	20,4	0,98	11,7
Na <sub>2</sub> O	10,3	12,7	1,90	11,3	2,10	11,5	13,1	1,32	12,37	6,32
ZrO <sub>2</sub>	0,10	0,10			0,09	0,40	0,03	0,07	0,60	0,18
Total	99,49	99,17	99,19	100,76	99,37	99,53	99,52	99,15	99,50	99,31
FeO <sup>c</sup>	26,5	27,2	14,7	25,9	17,9	24,5	25,7	11,7	26,5	23,2
										28,1

Fórmula estrutural na base de 6 oxigênios

Si	1,986	1,993	1,934	1,967	1,919	1,950	1,973	1,877	1,959	2,000	1,984
Al <sup>IV</sup>	0,014	0,007	0,066	0,033	0,051	0,043	0,027	0,116	0,041		0,016
Fe <sup>3+</sup>				0,030	0,008		0,007				
Al <sup>VI</sup>	0,022	0,029	0,045	0,025			0,003		0,009	0,044	0,019
Ti	0,043	0,034	0,037	0,116	0,025	0,145	0,087	0,022	0,070	0,020	0,049
Fe <sup>3+</sup>	0,689	0,875	0,095	0,621	0,204	0,628	0,828	0,181	0,820	0,382	0,683
Fe <sup>2+</sup>	0,172		0,381	0,207	0,351	0,159		0,188	0,043	0,382	0,228
Mn	0,027	0,029	0,038	0,032	0,066	0,040	0,079	0,049	0,075	0,053	0,033
Mg	0,080	0,045	0,463	0,031	0,403	0,029	0,010	0,625	0,012	0,152	0,034
Ca	0,187	0,029	0,796	0,128	0,785	0,131	0,015	0,836	0,041	0,494	0,173
Na	0,075	0,948	0,142	0,837	0,160	0,868	0,979	0,098	0,934	0,483	0,781
Mg	7,6	4,4	45,2	2,8	41,1	2,7	1,0	65,1	1,1	14,2	3,2
Fe <sup>2+</sup> +Mn	18,9	2,9	40,9	21,6	42,6	18,1	7,4	24,7	11,1	40,7	24,2
Na	73,5	92,7	13,9	75,6	16,3	79,2	91,6	10,2	87,8	45,1	72,6

a - início da "zona de transição", amostra com poucos núcleos pequenos de soda-augita.

b - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e FeO calculados por meio de programa SILCAL (Ulbrich e Ulbrich, 1982).

c - Fe (total) calculado como FeO.

Tabela 3 - Análises químicas por microssonda de biotitas e anfíbólitos de alguns nefelina sienitos de Poços de Caldas

Amostra	Biotita				Anfíbólito	
	Nefelina Sienitos cinzas do Anel Norte	Lujaurito	Ne Si com eudialita do Serrote			
Amostra	zona <sup>a</sup> 222	zona <sup>a</sup> 131	zona <sup>a</sup> 46	zona <sup>a</sup> 159		
SiO <sub>2</sub>	44,5	40,3	35,6	52,6	54,1	52,7
TiO <sub>2</sub>	2,65	2,77	4,06	0,70	0,46	0,58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,75	8,97	8,65	0,77	0,58	1,04
FeO <sup>b</sup>	10,4	16,9	30,7	17,6	12,9	17,3
MnO	3,60	5,02	3,34	5,26	5,94	2,98
MgO	14,4	11,2	3,53	8,31	11,0	10,2
CaO	0,07	0,08	0,05	0,96	0,70	1,92
Na <sub>2</sub> O	0,07	0,10	0,03	7,23	7,05	6,21
K <sub>2</sub> O	10,02	9,87	9,11	2,82	3,64	3,07
F	2,25	1,32	0,20	1,61	1,93	1,53
Total	96,71	96,53	95,27	97,86	98,30	97,53
O=F	-0,94	-0,55	-0,08	-0,68	-0,81	-0,64
Fórmula estrutural	na base de 22 oxigênios			na base de 23 oxigênios		
Si	6,605	6,238	5,918	8,114	8,187	8,062
Al	1,395	1,635	1,697			
Al	0,134			0,140	0,104	0,188
Ti	0,295	0,322	0,508	0,082	0,052	0,067
Fe	1,292	2,192	4,275	2,277	1,627	2,218
Mn	0,452	0,658	0,471	0,688	0,761	0,386
Mg	3,193	2,573	0,876	1,913	2,480	2,321
Ca	0,011	0,013	0,009	0,158	0,113	0,315
Na	0,019	0,031	0,011	2,164	2,068	1,845
K	1,896	1,948	1,935	0,556	0,703	0,600
$\frac{\text{Fe}+\text{Mn}}{\text{Fe}+\text{Mn}+\text{Mg}}$	0,35	0,53	0,84			

a - cristais zonados (ver texto)

b - Fe (total) calculado como FeO

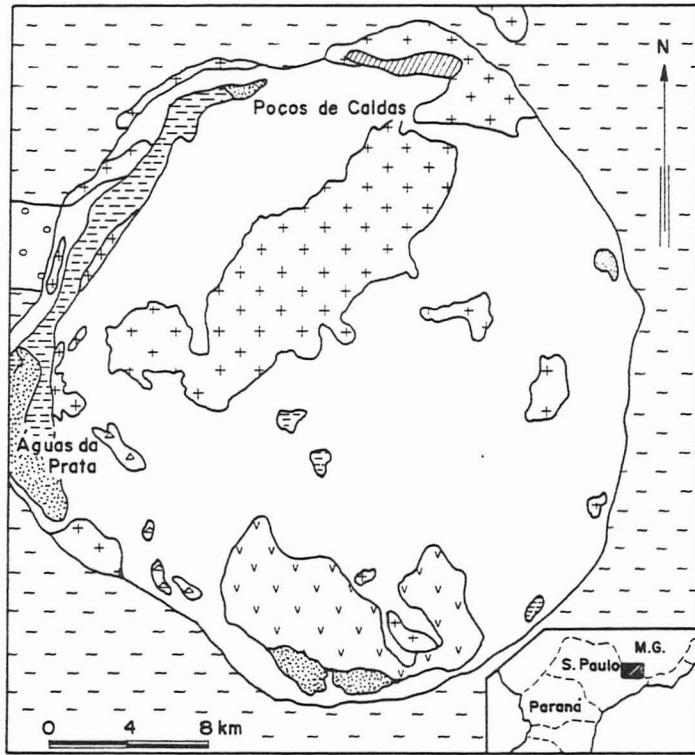


Fig. 1 - Mapa do maciço alcalino de Poços de Caldas (Ellert et al., 1959), simplificado.

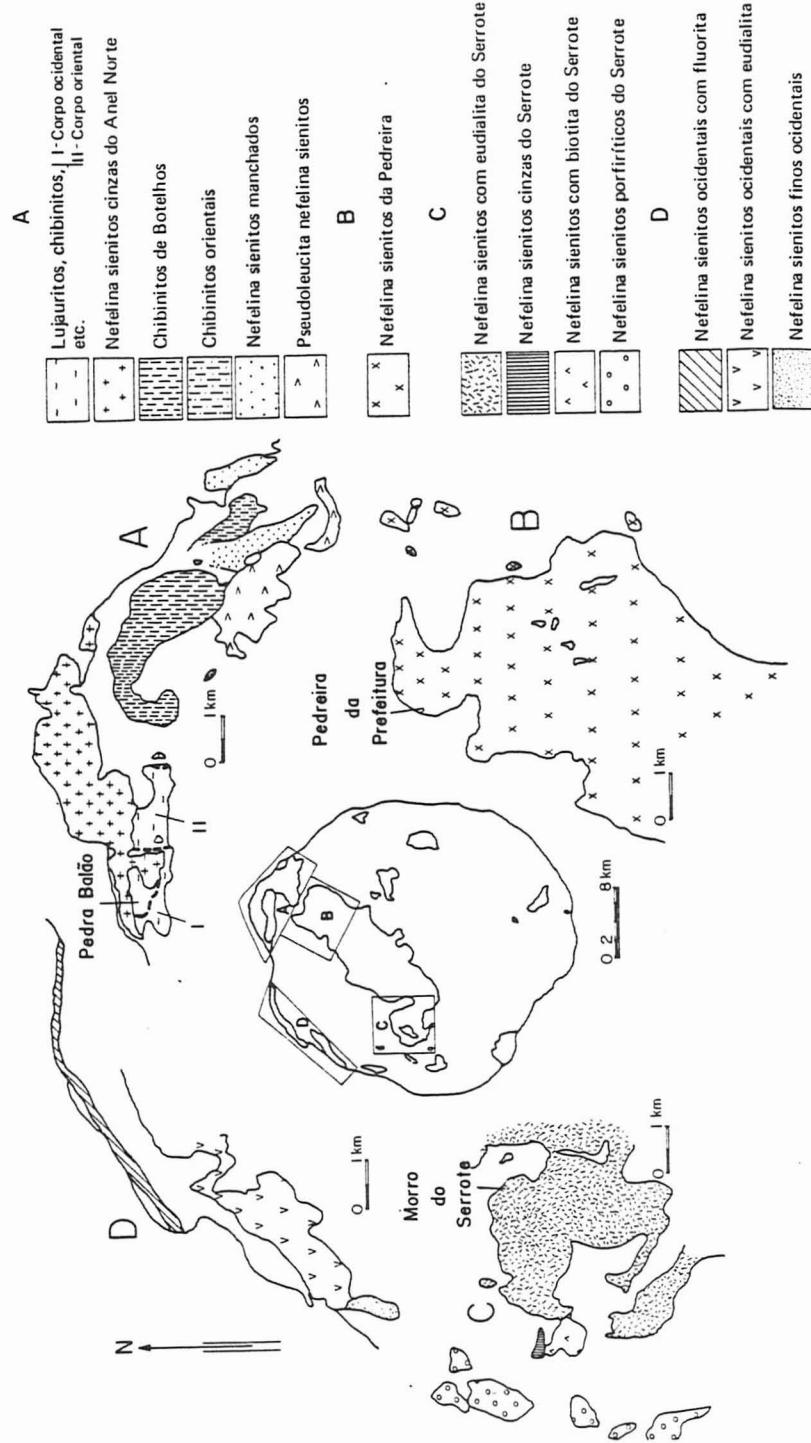
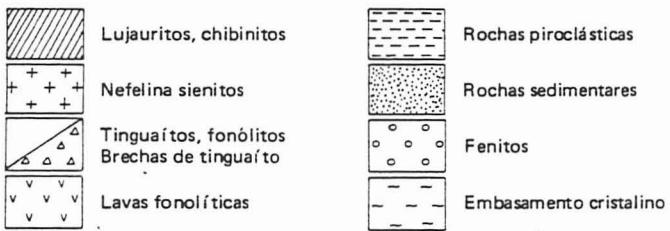


Fig. 2 - Geologia dos corpos de nefelina sienitos (H.H. Ulbrich, em preparação). As quatro áreas estudadas aparecem ampliadas separadamente. O mapa base central é o de Ellert et al. (1959).