

2ª Edição revisada e ampliada

EDITORES: ADÃO BENVINDO DA LUZ & FERNANDO A. FREITAS LINS

ROCHAS & MINERAIS INDUSTRIAIS

usos e especificações



SUMÁRIO

PARTE I: INTRODUÇÃO GERAL

01. PANORAMA DAS ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS NO BRASIL 3
Fernando A. Freitas Lins

02. DESEMPENHO FUNCIONAL DOS MINERAIS INDUSTRIAIS: 25
DESAFIOS TECNOLÓGICOS, FERRAMENTA DE MARKETING E ESTRATÉGIA DE VALORIZAÇÃO
Renato R. Ciminelli

PARTE II: ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS: USOS E ESPECIFICAÇÕES

03. AGALMATOLITO 69
Adão Benvindo da Luz, Paulo Tomedi e Rodrigo Martins

04. AMIANTO 79
*Normando Claudino Moreira de Queiroga, William Bretas Linares, Joselito Dasio da Silva
e Adão Benvindo da Luz*

05. AREIA INDUSTRIAL 103
Adão Benvindo da Luz e Fernando A. Freitas Lins

06. AGROMINERAIS - ENXOFRE 125
*Gildo de Araújo Sá C. de Albuquerque (in memoriam), Ronaldo Simões L. Azambuja (in memoriam.)
e Fernando A. Freitas Lins*

07. AGROMINERAIS - FOSFATO 141
Francisco E. Lápido Loureiro, Marisa Bezerra de Mello Monte e Marisa Nascimento

08. AGROMINERAIS - POTÁSSIO 175
Marisa Nascimento, Marisa Bezerra de Mello Monte e Francisco E. Lápido Loureiro

09. AGROMINERAIS - ROCHAS SILICÁTICAS COMO FONTES MINERAIS 205
ALTERNATIVAS DE POTÁSSIO PARA A AGRICULTURA
*Éder de Souza Martins, Claudinei Gouveia de Oliveira, Álvaro Vilela de Resende e Marcello
Silvino Ferreira de Matos*

10. ARGILA - ATAPULGITA E SEPIOLITA 223
Adão Benvindo da Luz e Salvador Luiz M. de Almeida

11. ARGILA - BENTONITA 239
Adão Benvindo da Luz e Cristiano Honório de Oliveira

12. ARGILA - CAULIM	255
<i>Adão Benvindo da Luz, Antônio Rodrigues de Campos, Eduardo Augusto de Carvalho, Luis Carlos Bertolino e Rosa Bernstein Scorzelli</i>	
13. BARITA	295
<i>Adão Benvindo da Luz e Carlos Adolpho Magalhães Baltar</i>	
14. BAUXITA	311
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Achilles Junqueira Bourdot Dutra</i>	
15. BERILO	339
<i>Marcelo Soares Bezerra e Júlio de Rezende Nesi</i>	
16. CALCÁRIO E DOLOMITO	363
<i>João Alves Sampaio e Salvador Luiz Matos de Almeida</i>	
17. CIANITA REFRACTÁRIA	389
<i>Caroline Meira Lopes de Castro Joffily e Claudinei Gouveia de Oliveira</i>	
18. CROMITA	403
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Paulo Renato Perdigão Paiva</i>	
19. DIAMANTE	427
<i>Mario Jorge Costa e Adão Benvindo da Luz</i>	
20. DIATOMITA	451
<i>Silvia Cristina Alves França, Adão Benvindo da Luz e Paulo Francisco Inforçati</i>	
21. FELDSPATO	467
<i>Adão Benvindo da Luz, Fernando A. Freitas Lins e José Mario Coelho</i>	
22. FLUORITA	487
<i>João Alves Sampaio, Carlos Adolpho Magalhães Baltar e Mônica Calixto de Andrade</i>	
23. GIPSITA	505
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, Flavia de Freitas Bastos e Adão Benvindo da Luz</i>	
24. GRAFITA	527
<i>João Alves Sampaio, Paulo Fernando Almeida Braga e Achilles Junqueira Bourdot Dutra</i>	
25. HALITA	551
<i>Paulo Roberto Cabral de Melo, Renato Senna de Carvalho e Dorival de Carvalho Pinto</i>	

26. LÍTIÓ	585
<i>Paulo Fernando Almeida Braga e João Alves Sampaio</i>	
27. MAGNESITA	605
<i>Luís Rodrigues Armôa Garcia, Paulo Roberto Gomes Brandão e Rosa Malena Fernandes Lima</i>	
28. MANGANÊS	633
<i>João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade, Achilles Junqueira Bourdot Dutra e Márcio Torres Moreira Penna</i>	
29. MICA	649
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, João Alves Sampaio e Patrícia Maria Tenório Cavalcante</i>	
30. NEFELINA SIENITO	663
<i>João Alves Sampaio, Sílvia Cristina Alves França e Paulo Fernando Almeida Braga</i>	
31. QUARTZO	681
<i>Pedro Luiz Guzzo</i>	
32. RMIS: ROCHAS E MINERAIS PARA CERÂMICA DE REVESTIMENTO	723
<i>Mônica Calixto de Andrade, João Alves Sampaio, Adão Benvindo da Luz e Alberto Buoso</i>	
33. RMIS: ARGILA PARA CERÂMICA VERMELHA	747
<i>Marsis Cabral Junior, José Francisco Marciano Motta, Amilton dos Santos Almeida e Luiz Carlos Tanno</i>	
34. RMIS: ARGILA PLÁSTICA PARA CERÂMICA BRANCA	771
<i>José Francisco Mariano Motta, Adão Benvindo da Luz, Carlos Adolpho Magalhães Baltar, Marcelo Soares Bezerra, Marsis Cabral Júnior e José Mario Coelho</i>	
35. TALCO	793
<i>Ivan Falcão Pontes e Salvador Luiz Matos de Almeida</i>	
36. TERRAS-RARAS	817
<i>Simon Rosental</i>	
37. TITÂNIO: MINERAIS DE TITÂNIO	841
<i>Carlos Adolpho Magalhães Baltar, João Alves Sampaio, Mônica Calixto de Andrade e Dorival de Carvalho Pinto</i>	
38. VERMICULITA	865
<i>José Fernandes de Oliveira Ugarte, João Alves Sampaio e Sílvia Cristina Alves França</i>	
39. ZEOLITAS NATURAIS	889
<i>Nélio das Graças de Andrade da Mata Resende, Marisa Bezerra de Mello Monte e Paulo Renato Perdigão Paiva</i>	
40. ZIRCONITA	917
<i>Luiz Carlos Bertolino, Nely Palermo, João Alves Sampaio e Sílvia Cristina Alves França</i>	

PARTE III: OS MINERAIS E O MEIO AMBIENTE

41. MINERAIS APLICADOS À TECNOLOGIA AMBIENTAL: MINERAIS VERDES 933
Silvia Cristina Alves França, José Fernandes de Oliveira Ugarte e Adriana de A. Soeiro da Silva
42. EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL E AMBIENTAL A POEIRAS DE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS 961
Zuleica Carmen Castilhos, Reiner Neumann e Olívia Bezerra

GLOSSÁRIO

CAPÍTULO 30

Nefelina Sienito

João Alves Sampaio¹
Sílvia Cristina Alves França²
Paulo Fernando Almeida Braga³

1. INTRODUÇÃO

A nefelina (Na,K)(AlSiO₄) é um mineral aluminossilicato de sódio, do sistema hexagonal, pertencente ao grupo dos feldspatóides, que se forma nas rochas magmáticas subsaturadas em sílica. O magma, com sílica insuficiente para combinar com o sódio e formar feldspato favorece a formação da nefelina, cujo nome deriva do grego *nephele*, que significa nuvem, dado que, quando imerso em ácido, o mineral torna-se turvo.

Nefelina sienito é uma rocha ígnea rica em feldspatos sódicos, praticamente livre de quartzo, com a presença de minerais ferromagnesianos, tais como: piroxênio sódico, anfibólio alcalino e biotita. A rocha ocorre, em geral, na forma irregular em corpos intrusivos de tamanhos variados, sua textura é do tipo granítica ou gnáissica, cuja individualização dos grãos se obtém na granulometria que varia desde poucos milímetros até 100 µm.

A nefelina sienito constitui uma das matérias-primas essenciais para as indústrias de vidros e cerâmicas. Na fabricação de vidros, esse insumo mineral é utilizado, cada vez mais, como fonte de álcalis, que favorece o processo de vitrificação em temperaturas mais baixas, com substancial redução no consumo de combustível.

Na indústria cerâmica, a nefelina sienito é um substituto virtual do feldspato, em decorrência do seu elevado teor de alumina. Além disso, o elevado teor de álcalis diminui a fusibilidade, melhora a capacidade fluxante e permite a sinterização de corpos cerâmicos a baixas temperaturas ou com uma menor quantidade de agente vitrificante. Tais razões justificam a procura pelos produtos de nefelina sienito, por parte das indústrias de vidro e cerâmica.

¹Engº de Minas/UFPE, D.Sc. em Engenharia Metalúrgica/COPPE-UFRJ, Tecnologista Sênior do CETEM/MCT.

²Engº Química/UFS, D.Sc. em Engenharia Química/COPPE-UFRJ, Tecnologista do CETEM/MCT.

³Engº Químico/UFRRJ, M.Sc. em Engenharia Mineral/USP, Pesquisador do CETEM/MCT.

A aplicação dos produtos de nefelina sienito em diversos setores da indústria, especialmente de vidros e cerâmicas, encontra, no entanto dificuldade em relação ao teor de Fe_2O_3 e da granulometria de liberação dos minerais portadores de ferro. Em alguns casos, o teor de Fe_2O_3 inviabiliza o aproveitamento do depósito mineral, embora a separação magnética seja efetiva na remoção desses minerais, dentre os quais destacam-se a magnetita e os hidróxidos de ferro. Assim, o aproveitamento econômico dos depósitos de nefelina sienito torna-se viável, especialmente quando o teor de Fe_2O_3 situa-se abaixo de 2,0%. De forma paradoxal, quando o ferro se encontra na forma de sulfetos, a sua remoção constitui uma etapa árdua do processo. Em alguns casos, a conjugação do processo de flotação seguido de lixiviação, torna-se uma alternativa tecnológica para o caso (Braga *et al*, 1998; França e Sampaio, 2002).

Embora o mercado seja favorável a nefelina sienito, há dificuldades em se obter produtos com baixo teor de ferro. Estas dificuldades tornam-se mais acentuadas nas indústrias de vidro e cerâmica, nas quais a rocha sofre a concorrência de feldspato e aplitos. No Brasil, ela ainda não é utilizada nestas aplicações, embora haja registro de tentativas nesse sentido.

2. MINERALOGIA E GEOLOGIA

Mineralogia

Sempre que se fala na nefelina, um feldspatóide, torna-se indispensável o conhecimento básico dos conceitos mineralógicos relacionados aos feldspatos, sobre os quais é feita uma abordagem preliminar. Feldspato é um termo genérico para um grupo de aluminossilicato contendo potássio, sódio e cálcio. Os principais minerais são ortoclásio albita ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$), anortita ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) e ortoclásio/microclínio ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$).

Os grupos dos feldspatos formam duas séries cristalinas ou soluções sólidas de minerais. O diagrama da Figura 1 ilustra as séries de produtos comerciais de feldspatos ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$. $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. KAlSi_3O_8). As áreas em negrito correspondem aos feldspatos homogêneos, enquanto a área na cor cinza ilustra as variações nas composições para as pertitas e as antipertitas. No diagrama, constam as diferenças de composições entre produtos comerciais, embora não esteja indicada a composição modal do feldspato de produtos individuais (isto é, se cada ponto corresponde a um monomineral ou a um produto feldspato).

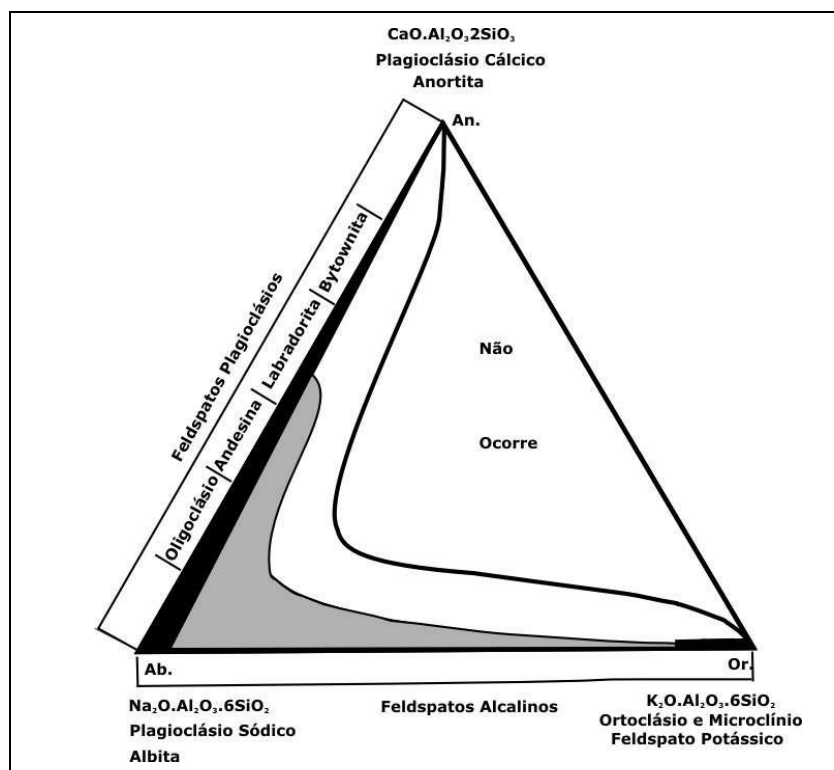


Figura 1 – Diagrama ilustrativo dos produtos comerciais de feldspatos, série plagioclásios (Smith e Bates citados por Kauffman e Dyk (1994)).

As composições das fases finais das séries referem-se aos feldspatos com predominância de sódio, cálcio e potássio. Os feldspatos cuja composição química varia entre sódio e potássio são ditos feldspatos alcalinos, enquanto aqueles entre sódio e cálcio são ditos calco-sódicos ou feldspatos plagioclásios. Com base nos aspectos de estrutura e composição química, esses grupos podem ainda ser subdivididos dentro da série alcalina e plagioclásio. A distinção e proporção das fases são importantes na classificação das rochas ígneas (Deer *et al.*, 1996).

As propriedades físicas de ambas as séries são muito similares. Os feldspatos têm dureza 6, densidade variando de 2,54 a 2,76 e um lustre vítreo. A cor é mais específica e pode variar do translúcido ao transparente, branco ao cinza, verde, amarelo e vermelho.

Os aspectos diagnósticos dessas duas séries geralmente exigem auxílios de outros recursos, como: ópticos, de análises químicas, de raios-X, entre outros. Não obstante, a presença de albita pode facilitar a distinção, até mesmo a olho nu, entre os plagioclásios e os feldspatos rico em potássio.

Pertitas são produtos de exsoluções de uma solução sólida, inicialmente homogênea, de feldspatos potássio-sódio que formam, em um ambiente de temperatura decrescente, um intercrescimento de feldspatos ricos em sódio, no cristal hospedeiro de feldspato rico em potássio. Antipertitas são produtos de exsolução, nos quais o mineral hospedeiro é um feldspato plagioclásio rico em sódio e os intercrescimentos são feldspatos ricos em potássio.

A nefelina é o mais comum dos feldspatóides (aluminossilicatos de potássio, tendo sódio e cálcio como elementos principais), entretanto com quantidades menores de íons metálicos. O conteúdo de sílica faz a diferença química entre feldspatos e feldspatóides, os quais contêm cerca de dois terços de sílica a menos que os feldspatos alcalinos e, por isso, tendem a formar soluções ricas em álcalis, especificamente, em sódio e potássio. O grupo dos feldspatóides inclui também leucita, sodalita e cancrinita.

A estrutura dos feldspatóides é semelhante àquela dos feldspatos e minerais de sílica. Contudo, vários deles desenvolveram cavidades estruturais maiores que as dos feldspatos, como resultado de ligações de quatro e seis células tetraédricas. Esse aumento na abertura de estruturas para um certo número de feldspatóides, em relação aos feldspatos, responde pela diferença nas densidades desses minerais. Assim, se explica a diferença nas faixas de densidade entre esses minerais, entre 2,15 e 2,50, para feldspatóides, e entre 2,54 e 2,75, para os feldspatos, (Klein *et al.*, 1985).

A nefelina se cristaliza no sistema hexagonal e pode se alterar, formando sodalita, cancrinita e zeólita. A sua fórmula química é $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, com a possibilidade de ocorrer a substituição do sódio pelo potássio. O cálcio ocorre em algumas situações, com quantidade variável de 3 a 12%. Na Tabela 1, encontram-se as composições teóricas da nefelina comparadas aos principais minerais do grupo dos feldspatos, bem como as composições de nefelina, albita e microclínio provenientes da província de Ontário, Canadá, e de uma nefelina sienito do Brasil.

Tabela 1 – Composições teóricas (%) da nefelina e dos minerais que compõem as séries dos feldspatos, bem como a nefelina, a albita e o microclínio da província de Ontário, Canadá.

Composições teóricas da nefelina e dos principais membros das séries dos feldspatos					
Feldspatos	Na₂O	K₂O	CaO	Al₂O₃	SiO₂
Nefelina	21,8			35,9	42,3
Microclínio	-	16,9	-	18,4	64,7
Ortoclásio		16,9	-	18,4	64,7
Albita	11,8	-	-	19,5	68,7
Anortita			20,1	36,6	43,3
Composições químicas de nefelina, albita e microclínio da província de Ontário e Brasil					
Óxidos	Ontário – Canadá			Brasil	
	Nefelina	Albita	Microclínio	Nefelina	
SiO ₂	43,01	67,90	64,50	58,40	
Al ₂ O ₃	34,01	20,60	19,31	23,80	
MgO	0,04	0,06	0,42	0,60	
CaO	0,36	0,24	0,07	2,60	
Na ₂ O	15,42	10,78	2,03	7,24	
K ₂ O	6,15	0,15	13,59	5,57	
H ₂ O	0,99	0,22	0,28	-	
Fe ₂ O ₃	0,14	ND	ND	3,30	
FeO	ND	ND	ND	-	
Densidade	2,62	2,59	2,55	-	

Fontes: Klein (1985); Kauffman e Dyk (1994) e Guillet (1994).

Geologia

A nefelina sienito é uma rocha ígnea e se caracteriza pela escassez de quartzo e presença do feldspatóide nefelina. A rocha é formada com base em magmas alcalinos com baixo teor de sílica, o que favorece a formação da nefelina em vez do feldspato albita, muito embora haja nefelina sienito com origem em gnaisse.

As nefelinas sienitos são compostas essencialmente de nefelina, plagioclásios sódicos (em geral albita ou oligoclásio) e microclínio, todavia a proporção destes minerais pode variar segundo faixas extensas. Esses tipos de rocha contêm de 20 a 30% de nefelina, no entanto são encontradas segregações aproximadamente puras. Os minerais acessórios mais encontrados são hornblenda, piroxênio, pirita, biotita, moscovita, magnetita, calcita, entre outros, que podem ocorrer em proporções que variam desde traços até poucos pontos percentuais, tais como: sodalita, cancrinita, granada, zircônio, apatita, coríndon, titanita, ilmenita, escapolita, calcita, turmalina, vesuvianita, clorita e zeólitas. Para melhor aproveitamento comercial, as jazidas de nefelina sienito devem conter menos que 5% de minerais ferromagnesianos e ausência de coríndon.

No Brasil, há vários depósitos de grande porte de nefelina sienito distribuídos, principalmente, nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais, Bahia, entre outros. Mesmo assim, a produção de matéria-prima contendo álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) ainda advém do feldspato produzido com base em pegmatitos.

3. LAVRA E PROCESSAMENTO

Lavra

A lavra é feita, em geral, por métodos a céu aberto. Como se trata sempre de rocha compacta, o desmonte, feito por explosivos, na maioria dos casos, utiliza relação estéril:minério sempre baixa, igual a 1:1. O transporte também é feito de forma convencional, por meio de carregadeiras frontais e caminhões.

Processamento

Os depósitos comerciais de nefelina sienito devem ter granulometria de liberação dos minerais de ganga (biotita, hornblenda, pirita, magnetita etc) numa faixa que permita a remoção dos mesmos por processos convencionais de concentração e, ainda, possibilite o emprego industrial do produto final. Tais processos devem proporcionar produtos finais com pureza adequada à sua utilização nas indústrias, que exigem insumos com elevado índice de alvura, para os quais os minerais escuros são os mais nocivos. O êxito no emprego dos processos de remoção desses minerais está relacionado à granulometria de liberação dos mesmos. Assim, para liberação em granulometria grossa, torna-se essencial o emprego da separação magnética e da flotação, em alguns casos, seguidos de lixiviação.

O processamento de nefelina sienito (Figura 2) inicia-se com diversas etapas de britagem e peneiramento, seguidos da remoção dos minerais portadores de ferro (magnetita e ferromagnesianos), por meio de separação magnética de média e alta intensidade. O produto não-magnético, a nefelina sienito, é então moído em moinhos de seixos e classificado em aeroseparadores, de acordo com as especificações comerciais (produtos para cerâmica e para indústria de vidros) (Guillet, 1994).

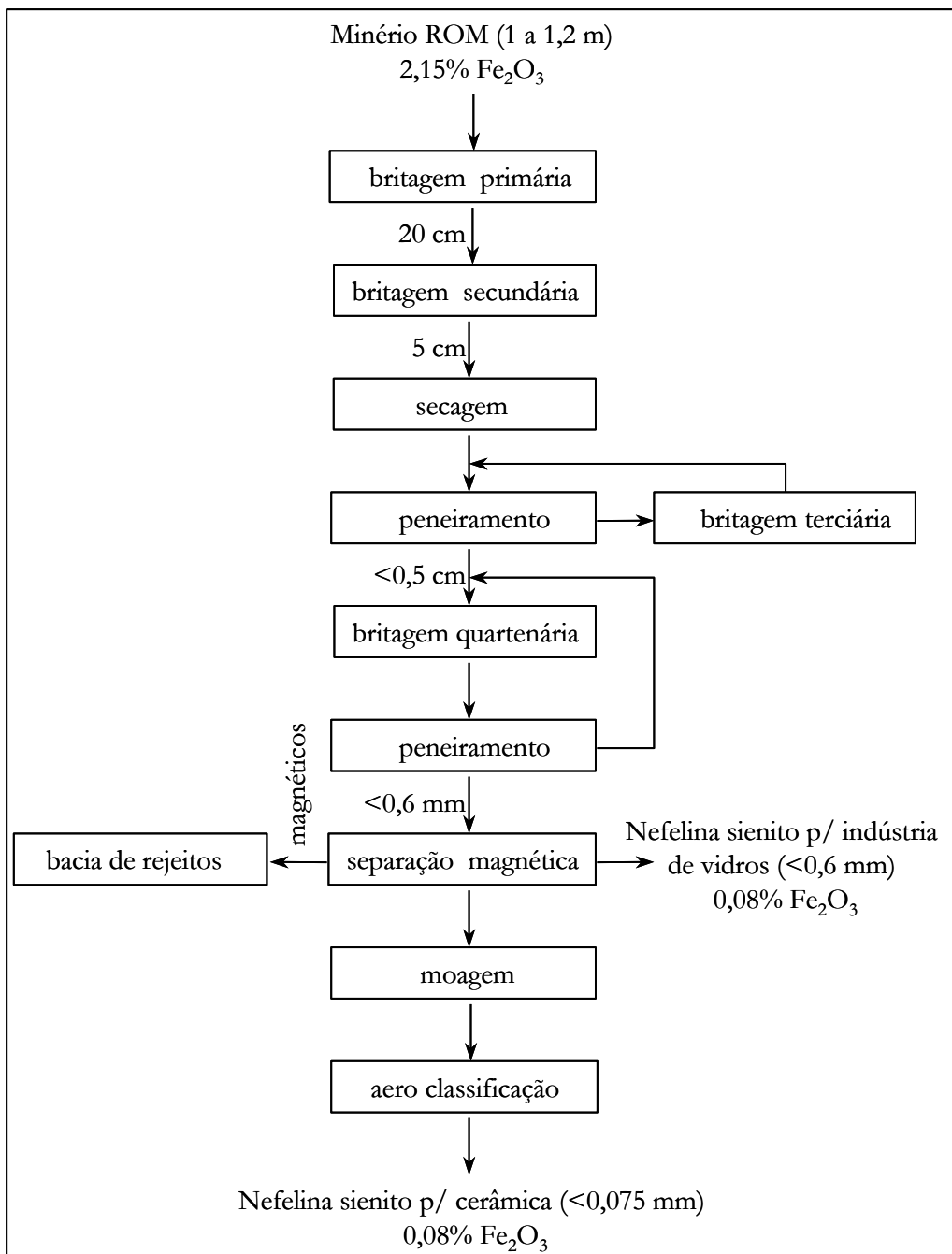


Figura 2 – Diagrama em blocos do beneficiamento da nefelina sienito da Unimin.

A flotação é também empregada em alguns casos, quando há minerais de ferro com baixa susceptibilidade magnética (por exemplo, pirita) ou há chance de obter concentrados de moscovita como subproduto.

4. PRINCIPAIS PRODUTORES

Os maiores depósitos comerciais de nefelina sienito para indústria de vidro e cerâmica estão localizados em Ontário, no Canadá, e em North Cape, na Noruega. No entanto, o maior produtor mundial de nefelina sienito é a Rússia, que a utiliza para produção de alumina, produtos de sódio e potássio e na fabricação de cimento *portland*. A nefelina sienito produzida na Rússia contém elevados teores de ferro, que inviabilizam sua utilização em vidros ou cerâmicas. A Tabela 2 ilustra os principais produtores, localização e sua capacidade instalada (McLemore, 2006).

Tabela 2 – Principais produtores mundiais.

Mina	Empresa	Capacidade (tpd)	Método de Lavra
Blue Mountain, Ontário, Canadá	Unimin	700.000	Céu aberto
North Cape, Stjernoya, Noruega	Unimin	330.000	Subterrânea
Khibiny, Kola, Rússia	Apatit Production	1.500.000	Céu aberto/subterrânea

5. USOS E FUNÇÕES

As indústrias de vidro e cerâmica são as principais usuárias de produtos nefelina sienito. Outras aplicações da nefelina sienito incluem a produção de alumina, carbonatos de sódio e potássio, cimento *portland*, apatita, entre outros. Também tem-se ampliado o uso da nefelina sienito para obtenção de agregados para a construção civil, visto que essa rocha contém pouca sílica e, por isso, sua resistência a altas temperaturas é superior à do granito, tradicionalmente utilizado neste segmento.

Nefelina Sienito para a Indústria de Vidro

O vidro é um sólido iônico, com estrutura amorfa, lembrando a de um líquido (Atkins e Jones, 2001; Chang, 2001). A composição e seleção da matéria-prima para manufatura de vidros estão vinculadas, de forma significativa, aos sistemas produtivos dos vidros e ao mercado dos seus produtos. Portanto, as

especificações para a matéria-prima baseiam-se em circunstâncias específicas e econômicas, exigindo rígidos controles das características químicas, físicas, além da ausência de material volátil, materiais refratários e baixo custo de produção.

A manufatura de vidro inclui uma variedade de formulações e produtos, cujos materiais podem ser resumidos em três grupos: vidros de reciclagem, estabilizadores e fluxantes. Estes últimos são óxidos que atuam no vidro a baixas temperaturas, enquanto os estabilizadores são óxidos que imputam ao vidro elevada resistência química.

A nefelina sienito é também utilizada como fonte de alumina na produção do vidro do tipo cal-soda, que é uma combinação de sílica com os óxidos Na_2O e CaO em igual proporção, cerca de 12% em peso para cada composto alcalino. Essa combinação é responsável pela maior parte dos vidros produzidos, com destaque para os vidros planos e para embalagem. Quando se reduzem as proporções de Na_2O e CaO e adiciona-se Ba_2O_3 , obtém-se o chamado vidro de borossilicato, dos quais o pírex é o mais comum. Essa composição resulta em um produto com baixo coeficiente de dilatação térmica, que, por essa razão, é adequado à produção de embalagens para uso em laboratório.

Embora a alumina (Al_2O_3) não seja majoritária na composição da maior parte dos vidros, a sua participação na mistura varia entre 2 e 15% e depende do tipo de vidro a ser obtido. O Al_2O_3 confere aos vidros elevada resistência aos ataques químicos, aumenta a dureza e a durabilidade, acentuando ainda as características de trabalho dos vidros fundidos. Neste contexto, a nefelina sienito é uma importante fonte de alumina (Al_2O_3), além de prover os óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O). O conteúdo de álcalis atua como fluxante, baixando a temperatura de fusão da mistura e, conseqüentemente, reduzindo a quantidade de carbonato de sódio (Na_2CO_3) a ser adicionado. Isso reduz substancialmente, os custos de produção (Kendall, 1993).

A alumina atua ainda como estabilizador, promove a durabilidade pelo aumento da resistência ao impacto, à flexão, ao choque térmico, aumenta a viscosidade durante a formação dos vidros e inibe a desvitrificação. As composições para vidros planos e para embalagens demandam de 1,5 a 2,0% em peso de Al_2O_3 , valor que chega a 15% para certas fibras de vidro. A alumina é o componente majoritário na fabricação da fibra de vidro, tipicamente o vidro aluminossilicato. Por outro lado, nos vidros borossilicatos, além daqueles para tubo de TV e vidros cal-soda, é o menor componente.

Quando há carência na oferta de alumina, soda e potássio, a indústria de vidro utiliza a nefelina sienito, que se transforma numa fonte econômica desses constituintes, em decorrência, dentre outras, das seguintes vantagens:

- (i) baixo ponto de fusão e menor temperatura de trabalho do vidro;
- (ii) redução da viscosidade do vidro fundido e aumento da sua trabalhabilidade;
- (iii) aumento das resistências química e física do vidro;
- (iv) redução do consumo de carbonato de sódio, pelo conteúdo de álcalis;
- (v) fusão mais rápida e elevada produtividade;
- (vi) redução, de forma significativa, do consumo de combustível.

Para ser usado na indústria de vidro, esse insumo mineral deve ter granulometria que varia entre 350 e 74 μm e seu conteúdo de ferro não deve exceder a 0,1% de Fe_2O_3 . Há uma tolerância aos teores mais elevados desse metal, desde que não haja controle rígido do ferro para coloração do vidro, como na produção do vidro verde, âmbar, fibra de vidro, dentre outros. Mesmo assim, o máximo permitido é de 0,35% de Fe_2O_3 (Harben, 1996).

Os teores de alumina e álcalis na nefelina sienito devem ser os mais elevados possíveis, isto é, 23 e 14%, respectivamente. Além disso, não deve haver minerais refratários, porque eles resistem ao processo de fusão em temperaturas até 1.600°C e permanece no vidro como pelotas, causando defeitos no produto final e inviabilizando sua comercialização (Harben, 1995). Os produtores de vidros exigem ausência de minerais refratários nas nefelinas sienito, areias feldspáticas e aplitos, que, além disso, não devem conter:

- (i) grãos de quartzo acima de 1,19 mm;
- (ii) caulim ou espinélios com granulometria acima de 0,84 mm;
- (iii) silicatos de alumínio, cianita, mulita, sillimanita, andalusita, com granulometria acima de 0,60 mm;
- (iv) coríndon com granulometria acima de 0,42 mm;
- (v) zircônio, cassiterita e cromita com granulometria acima de 0,25 mm.

Nefelina Sienito para a Indústria Cerâmica

A nefelina sienito empregada na indústria cerâmica forma uma fase vítrea no biscoito, promovendo tanto a vitrificação como a translucidez. É também utilizada como fonte de álcalis e alumina nos esmaltes, além de prover a formação de compostos alcalinos insolúveis em água. O produto, finamente moído, é usado na indústria cerâmica de revestimento, pisos, louças sanitárias e de mesa, em produtos cerâmicos para isolamento elétrico e uso odontológico, entre outras finalidades. A baixa temperatura de fusibilidade e elevada capacidade fluxante permitem a nefelina sienito atuar como um agente vitrificante, contribuindo para a formação de uma fase vítrea que liga outros constituintes da formulação. Isso possibilita baixo conteúdo de fundente no corpo cerâmico, baixa temperatura e menor período de queima. Sua longa faixa de queima resulta numa resistência física mais elevada do produto final. Para cada tipo de produto cerâmico, há uma percentagem em peso da nefelina sienito e outros feldspatos na composição, conforme consta na Tabela 3.

Nefelina sienito é também usada na formulação da maioria dos esmaltes cerâmicos, particularmente por atuar como fluxante nos ciclos de queima rápida e convencional.

Tabela 3 – Faixa percentual de participação dos feldspatos inclusive a nefelina sienito na composição dos produtos cerâmicos.

Produtos	(%)	Produtos	(%)
Louças	17-20	Pb vitrificado	25
Cozinha (louça)	10	Isolante elétrico	25-35
Azulejos	0-11	Pisos	55-60
Porcelana dental	60-80	-	-

Fonte: Singer, citado por Kauffman e Dyk (1994).

Na indústria cerâmica, a nefelina sienito é, em geral, utilizada moída na granulometria abaixo de 74 μm . Ainda assim, há casos de moagem abaixo de 53 ou mesmo 37 μm , dependendo do processo e do produto final a ser obtido.

A ausência de minerais escuros no produto de nefelina sienito resulta num corpo cerâmico uniformemente branco, isto é, sem manchas. Na prática, o comum é misturar o produto de nefelina sienito à argila plástica, caulim, talco, entre outros, de acordo com a mistura ponderada das matérias-primas.

Em certos porcelanatos, a nefelina sienito e os feldspatos podem participar com até 60% em peso da mistura.

Nefelina Sienito Usada na Pigmentação e nas Cargas

O desempenho de um mineral quando empregado como carga está ligado às suas próprias características e àquelas impostas pelo beneficiamento a que o insumo mineral foi submetido. Entre as operações do beneficiamento, destacam-se: moagem, classificação, calcinação, flotação, separação magnética, tratamento de superfície. Das propriedades mais relevantes que se atribuem ao insumo mineral para uso como carga, destacam-se: dureza, granulometria, forma das partículas, cor, índice de refração e propriedades químicas.

Quando finamente moída, a nefelina sienito atua: como carga nas indústrias de tintas (látex e sistemas alcalinos) para uso nas áreas de tráfego intenso; como cobertura primária nas pinturas metálicas; nas madeiras para evitar manchas; nas tintas selantes. As vantagens consistem na alvura elevada, ausência de reatividade, maior valor agregado, melhores facilidades para formular e aplicar.

Nos plásticos, a nefelina sienito é usada como carga na manufatura do carpete de espuma. A vantagem é que ela possui densidade mais baixa que o carbonato de cálcio e o talco.

Para uso em cargas, o produto de nefelina sienito deve também possuir alvura elevada, cerca de 96-98%, o que implica um conteúdo significativamente baixo de minerais escuros. No Canadá, são comercializados produtos com granulometria abaixo de 4,5 μm , índice médio de refração de 1,53, absorção em óleo de 22 a 29%.

Nefelina Sienito Usada como Fonte de Alumina, Carbonatos de Metais Alcalinos e Insumo na Produção de Cimento *Portland*.

A nefelina sienito é usada na Rússia para extrair alumina e, em maior parte, alumínio metálico. O processo também inclui a recuperação dos carbonatos de sódio e potássio, cujo resíduo é aproveitado na produção de cimento *portland*. O processo de obtenção do alumínio metálico, com base em nefelina sienito, ainda não se tornou uma alternativa viável, uma vez que o metal extraído de bauxita continua mais competitivo, em termos de processo e custo de produção.

6. ESPECIFICAÇÕES

Os produtos de nefelina sienito são comercializados segundo os valores das suas unidades fluxantes (isto é, o total de Al_2O_3 mais o conteúdo de álcalis) e com preço mais elevado do que o dos derivados do feldspato. Esse custo, entretanto, é compensado pela economia no consumo de fluxante, particularmente o carbonato de sódio. Geralmente, a escolha de uma determinada matéria-prima leva em conta as vantagens e desvantagens técnicas, muito embora prevaleça como critério o custo total de toda matéria-prima utilizada. É o caso das indústrias de vidro e cerâmica, esta última com mais flexibilidade do que a primeira.

Suprir o mercado das indústrias de vidros e cerâmica com produtos competitivos exige atenção especial na obtenção de produtos que contenham sempre as mesmas características físicas e químicas. Essas características variam entre regiões e países, advindas, entre outros, dos seguintes fatores:

- (i) origem e/ou natureza da matéria-prima, além do tipo de beneficiamento empregado;
- (ii) tipos de produtos a serem manufaturados e dos seus índices de sofisticação;
- (iii) processos de produção dos bens de consumo fabricados com base nesses insumos minerais.

Cada particularidade confere à matéria-prima uma característica especial. Portanto, a mesma matéria-prima pode conter características diferentes, quando beneficiada por métodos distintos, embora haja o compromisso de se obter o mesmo produto final. A usual substituição de uma matéria-prima por outra de natureza diferente conduz a especificações completamente diferentes, o que deve ser evitado. Desse modo, a uniformidade no fornecimento de matéria-prima com características químicas e físicas constantes constitui o principal desafio dos fornecedores de insumos minerais para as indústrias cerâmica, de vidro etc.

Nas indústrias de cerâmica e de vidros, impurezas refratárias, tais como zircão e coríndon, são extremamente indesejáveis. Isso decorre das suas elevadas temperaturas de fusão, que fazem esses materiais permanecerem inalterados, após o tratamento térmico a que foram submetidos, o que causa sérias imperfeições ao produto final. Outras impurezas indesejáveis à indústria cerâmica são os minerais que emitem gases CO_2 ou SO_2 , tais como calcita, cancrinita, sodalita e pirita, dos quais se exige ausência ou limites próximos de

zero na composição das massas cerâmicas. O flúor, na forma de fluorita, causa dificuldade na vitrificação, em ambos os processos, cerâmico e de vidros, por isso, reservam-se cuidados especiais na sua utilização (Kendall, 1993).

Para disponibilizar no mercado produtos uniformes, em termos de características químicas e físicas, os consumidores elaboraram um conjunto de especificações para os produtos comerciais de nefelina sienito, resumidas e ilustradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Análises químicas de um produto de nefelina sienito e suas características físicas, bem como as especificações para um produto comercial, valores em percentagens, de nefelina sienito praticadas no Canadá e na Noruega.

Análise típica de um produto de nefelina sienito e suas características físicas							
Composto	(%)	Características Físicas					
		Densidade		2,61			
SiO ₂	61,40	Granulometria					
Al ₂ O ₃	22,74	aberturas (µm)		% retida			
Fe ₂ O ₃	0,06	147		0,01			
CaO	0,70	104		0,04			
MgO	traços	74		0,45			
Na ₂ O	9,54	53		1,40			
K ₂ O	4,95	43		3,10			
P.F.	0,60	-43		95,00			
Análises químicas típicas de nefelina sienito comercializada no Canadá e na Noruega							
Composto	Noruega	Noruega	Canadá	Canadá	Canadá	Noruega	Canadá
SiO ₂	57,00	56,50	60,30	59,70	60,70	57,00	59,99
Al ₂ O ₃	23,80	22,50	23,70	23,50	23,30	23,80	23,7
Fe ₂ O ₃	0,10	0,40	0,10	0,40	0,07	0,12	0,08
TiO ₂	0,10	-	-	-	-	-	0,001
CaO	1,30	2,50	0,30	0,50	0,70	1,10	0,37
Na ₂ O	7,90	7,50	10,40	10,20	9,80	7,80	10,60
K ₂ O	9,00	8,20	5,00	5,00	4,60	9,10	4,80
MgO	-	-	Traços	0,10	0,10	-	0,20
BaO	0,30	-	-	-	-	0,30	-
SrO	0,30	-	-	-	-	0,30	-
P ₂ O ₅	0,10	-	-	-	-	-	-
F	< 40 ppm	< 40 ppm	-	-	-	< 40 ppm	-
Cl (S/H ₂ O)	< 0,15 ppm	-	-	-	-	< 18 ppm	-
Cl (Total)	< 100 ppm	< 100 ppm	-	-	-	< 75 ppm	-
PF	1,2	-	0,30	0,60	0,70	-	0,37

S/H₂O = solúvel em água; PF = perda ao fogo. Fontes: Kendall (1993) e Harben (1995).

Para atender a tais especificações, é necessário um sistema rígido de monitoramento, começando com as sondagens geológicas, passando pelo circuito de beneficiamento com vários pontos de controle, incluindo determinações de Al_2O_3 , Na, K, CaO, MgO, Fe_2O_3 , entre outros. Além disso, análises granulométricas até a faixa ultrafina são imprescindíveis. Finalmente, cone de fusão e determinações da alvura a seco do produto final são necessárias como requisitos adicionais no controle do processo.

7. MINERAIS E MATERIAIS ALTERNATIVOS

O fonólito é o equivalente vulcânico da nefelina sienito, comercializado na França, Alemanha, República Tcheca, Canadá etc. No Brasil, esse bem mineral é explorado comercialmente em Lages, Santa Catarina, onde foi testado como fundente em substituição à nefelina sienito nos processos cerâmicos de revestimento (Braga, 1999). Os fonólitos, em geral, são portadores de minerais de ferro com teores mais elevados, comparados àqueles da nefelina sienito. De algum modo, esse fato dificulta o emprego dos fonólitos em substituição às nefelinas sienitos. Há casos, no entanto, em que a substituição torna-se possível, principalmente, nos processos cerâmicos.

8. MERCADOS

Consumo

A nefelina sienito produzida no Canadá ou Noruega é utilizada de forma intensiva na indústria de vidro, consumindo cerca de 70% da produção de ambos os países. Na Noruega, 28% da produção é destinada para o setor cerâmico e 2% é utilizada como carga mineral. No Canadá, 15% da produção é destinada para a produção de cerâmicas e 15% é utilizada como carga mineral. A maioria da produção da Rússia é utilizada na produção de alumina/alumínio.

Exportações

O Canadá e a Noruega são os principais exportadores de nefelina sienito, enquanto os Estados Unidos é o principal importador. A maioria da produção de nefelina sienito nos demais países é utilizada para atender à demanda interna. Não existem informações sobre as exportações de nefelina sienito pela Rússia. Os dados contidos na Tabela 5 referem-se aos valores das exportações de nefelina sienito do Canadá e da Noruega (UN COMTRADE).

Tabela 5 – Exportações de nefelina sienito do Canadá e da Noruega.

País Ano	Canadá		Noruega	
	Quantidade (t)	Preço US\$	Quantidade (t)	Preço US\$
2007	508.777	66.157.283	378.855	53.497.213
2006	534.299	55.833.708	372.833	47.909.785
2005	445.076	54.714.245	370.721	46.433.573
2004	476.245	47.400.473	396.519	48.057.303
2003	430.193	43.121.686	384.145	42.352.612

Transporte e Distribuição

Como todos os outros produtos industrializados, o frete é um fator crítico para a competitividade da nefelina sienito, perante os demais minerais substitutos. Os custos relativos ao frete são decisivos na viabilização econômica de novos depósitos. A maior parte da produção de nefelina sienito para uso na indústria de vidros é fornecida acondicionada em embalagens especiais e o transporte feito por trens. A Unimin, no Canadá, utiliza caminhões do tipo silo para evitar contaminação do produto. Na Noruega, toda a nefelina sienito é transportada por navios, embora, em outros países, o transporte seja realizado por caminhões, trens ou navios.

Materiais Substitutos

Para aplicações na indústria cerâmica ou vidreira, o feldspato é o principal concorrente para a nefelina sienito, embora as areias de aplito e de quartzo-feldspato possam ser usadas em alguns casos. A escolha entre o feldspato e a nefelina sienito, pela indústria de vidros ou de cerâmicas, é função do preço que é função dos custos relativos ao frete. Nos Estados Unidos, o feldspato da Geórgia e da Carolina do Norte e o aplito da Virgínia substituem com sucesso a nefelina sienito importada. O uso crescente de recipientes plásticos em substituição ao vidro tem afetado a demanda pelas matérias-primas minerais. Vários minerais industriais podem ser substitutos da nefelina sienito no uso como carga: carbonato de cálcio, caulim, feldspato, sílica e talco. A utilização da nefelina sienito na produção de alumina, em substituição à bauxita, não é competitiva, e a maioria da produção de alumina no mundo é feita pelo processo Bayer, utilizando bauxita (McLEMORE, 2006).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATKINS, P. e JONES L. (2001). *Princípios de Química*. Bookman, Porto Alegre. 914p., p. 691-734.
- BRAGA, P. F. A.; SAMPAIO, J. A. e LEAL FILHO, L. S. (1998). Estudos de beneficiamento de feldspato em rochas alcalinas. In: XVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Água de São Pedro-SP. Anais, p. 509-518.
- BRAGA, P. F. A (1999). Desenvolvimento de Processo para o Aproveitamento do Feldspato Contido em Finos de Pedreira de Nefelina Sienito. Tese de Mestrado. Programa de Engenharia Mineral. Escola Politécnica/USP. 112p.
- CHANG, R. (2001). *Química*, 5ª Edição. McGraw-Hill. 1117p., p. 496-519.
- FRANÇA, S. C. A. e SAMPAIO, J. (2002). Obtenção de feldspato a partir de finos de pedreira de nefelina sienito e utilização como insumo para a indústria cerâmica. In: XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Recife, Anais, p. 651-656.
- GUILLET, R. G. (1994). Nepheline Syenite. In: *Industrial Minerals and Rocks*, 6th Edition, D. D. Carr (Senior Editor), Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, p. 711- 730.
- HARBEN, P. W. (1995) *The Industrial Minerals HandyBook II*. 253p. Metal Bolletin PLC. London, p. 183-186.
- HARBEN, P. W. (1996). Bauxite. In: *Industrial Minerals – A Global Geology*. 462p., p. 175-185.
- HARBEN, P. W. (2002) *The Industrial Minerals HandyBook: A Guide to Markets, Specifications and Prices*. 4th edition. London: Industrial Minerals Information.
- KAUFFMAN, R. A. e DYK, D. V. (1994). Feldspars. In: *Industrial Minerals and Rocks*, 6th Edition, D. D. Carr (Senior Editor), Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, p. 473-481.
- KENDALL, T. (1993). Feldspar & nepheline syenite – The alumina providers. In: *Raw Materials for Glass & Ceramics Industries*. IM Glass & Ceramic Survey.

KLIEN C. e CORNELIUS S. HURLBUT, JR. (1985). Manual of Mineralogy after James D. Dana. John Wiley & Sons, Inc. New York.

McLEMORE V. T. (2006). Nepheline Syenite. In: Industrial Mineral and Rocks, 7th Edition, Kogel, J. E., Trivedi, N.C., Barker, J. M. and Krukowsk, S. T. (Seniors Editors), Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, p. 653-670.

ROGERS, W. (2002). Feldspar and nepheline syenite 2001. North American Minerals News (January): 8-12.

UN COMTRADE, United Nations Commodity Trade Statistics Database (<http://comtrade.un.org/db/>).