

## Feldspatos: conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção

H. L. Lira\*, G. A. Neves

Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande

Av. Aprígio Veloso 882, Campina Grande, PB, CEP 58429-900, Brasil

(Recebido em 01/11/2013; aceito em 22/11/2013)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

### Resumo:

Neste trabalho é feito uma revisão sobre feldspatos, onde são apresentados desde sua definição, os diversos tipos de minerais e as séries de plagioclásio que constituem os feldspatos, estrutura cristalina características dos feldspatos. As propriedades físicas e a diferenciação dos feldspatos alcalinos dos plagioclásios, além de suas origens, ocorrências e aplicações. Ainda neste trabalho, é mostrado um panorama sobre as reservas e produção dos feldspatos em nível mundial. Em relação ao Brasil é feita uma análise da produção interna, com dados de importação, exportação e consumo. Finalmente é feita uma apresentação das características dos feldspatos do nordeste do Brasil.

**Palavras-chave:** Feldspatos; revisão; matérias-primas cerâmicas.

### Abstract:

This paper is a review on feldspars, where are presented since its definition, the different types of minerals and the series of plagioclase which constitute the feldspar, crystal structure characteristics of feldspar. The physical properties and the difference between alkali and plagioclase feldspars. Its origins, occurrences and applications. In this work, it is show a panorama on the deposits and feldspar production worldwide. In relation to Brazil is made an analysis of internal production, import, export and data consumption. Finally is made a presentation of the characteristics of feldspar in the northeast of Brazil.

**Keywords:** Feldspar; review; ceramic raw material.

### 1. Introdução e Conceitos

O nome feldspato vem do alemão *feld* = campo + *spath* = pedra e refere-se a um grupo de minerais de aluminossilicato do tipo  $AB_4O_8$  (A=Ca, Na, K e B=Al, Si), com uma relação de Si:Al que variam de 3: 1 a 1: 1. Constituem 60% da crosta terrestre e geralmente são brancos ou claros, com boa clivagem. A literatura especializada sobre os feldspatos constitui uma grande porcentagem da documentação sobre mineralogia. Ocorre em todos os principais tipos de rochas, mas principalmente nas ígneas, o que torna bastante difícil a quantificação de suas reservas. Na classificação das rochas ígneas da International Union of Geological Sciences (IUGS), o feldspato é dividido em dois grupos: o feldspato alcalino e o feldspato plagioclásio. Os feldspatos alcalinos incluem ortoclásio, microclina, sanidina, anortoclásio e os de duas fases misturadas entre si, chamadas de perititas. O feldspato plagioclásio inclui membros da série da solução sólida de albita-anortita. Rigorosamente falando, no entanto, a albita é um feldspato alcalino, bem como um feldspato plagioclásio.

Os feldspatos constituem os grupos de minerais mais abundantes na crosta terrestre (cerca de 60%) e compreendem

os silicatos de alumínio combinados com sódio, potássio, cálcio e, eventualmente, bário.

Os principais minerais são:

- ortoclásio/microclínio -  $(K_2O.Al_2O_3.6SiO_2)$ ;
- albita -  $(Na_2O.Al_2O_3.6SiO_2)$ ;
- anortita -  $(CaO.Al_2O_3.2SiO_2)$ .

As características básicas dos feldspatos estão relacionadas a seguir:

- densidade - 2,54 a 2,76;
- cores - branco, cinza, róseo;
- dureza - 6 a 6,5 (escala Mohs);
- sistema de cristalização - monoclinico, triclinico;
- aspecto ótico - translúcido e transparente (menos freqüente);
- clivagem - perfeita em duas direções formando ângulos de 90°C ou próximo deste valor.

O aspecto ótico e as cores decorrem da existência de grandes volumes de vazios em sua estrutura, o que permite a ocorrência de vários elementos nestes sítios. Como, geralmente, a cor de cada feldspato numa rocha é constante, este é um bom critério para indicação do tipo de mineral

\*Email: [helio@dema.ufcg.edu.br](mailto:helio@dema.ufcg.edu.br) (H. L. Lira)

existente. Os potássicos (ortoclásios) costumam ser róseos e os cálcicos ou sódicos (plagioclásios) brancos [1].

A microclina e o ortoclásio são feldspatos potássicos ( $KAlSi_3O_8$ ), normalmente designado de Or. A albita ( $NaAlSi_3O_8$  — geralmente designada Ab) e anortita ( $CaAl_2Si_2O_8—An$ ) são os finais da série plagioclásio. A sanidina, anortoclásio e as pertitas são feldspatos alcalinos cujas composições químicas situam-se entre Or e Ab [2].

Como pode ser verificada, a solução sólida desempenha um papel importante na formação dos feldspatos. A série dos alcalinos (Or-Ab) apresenta solução sólida completa em altas temperaturas, mas apenas incompleta a baixas temperaturas; envolve a substituição de potássio por sódio. A série de plagioclásio (Ab-An) apresenta essencialmente solução sólida completa tanto em altas como em baixas temperaturas; neste caso ocorre à substituição acoplada de sódio e silício por cálcio e alumínio. O sistema An-Or apresenta tendência de solução sólida limitada [2].

A sanidina e anortoclásio são feldspatos alcalino de alta temperatura, e a pertita é seu análogo de baixa temperatura. A sanidina é um feldspato alcalino monofásico; embora freqüentemente descrita quimicamente pela fórmula  $(K, Na)AlSi_3O_8$ , a maioria das espécimes de sanidina analisadas variam entre Or50 e Or80. (Essa designação é usada para especificar as frações dos constituintes. Por exemplo, Or80 indica que o mineral é composto de 80 por cento  $KAlSi_3O_8$  e 20 por cento de  $NaAlSi_3O_8$ ). O anortoclásio é um nome utilizado mais frequentemente para massas de feldspato alcalino aparentemente homogêneo, pelo menos para alguns dos quais são constituídos de lamelas submicroscópicas (camadas) de albita e ortoclásio; suas composições em massa geralmente variam entre Or25 e Or60. As pertitas são constituídas de misturas íntimas entre si de feldspato potássico — microclina ou ortoclásio — e um plagioclásio rico em sódio que ocorre como corpos microscópicos em massas macroscópicas, dentro do feldspato potássico [2].

Muitas pertitas são formadas quando feldspatos potássicos e sódicos de alta temperatura em composições adequadas são resfriados de tal forma que a fase de solução sólida original se separa (isto é, segrega, de forma que um mineral homogêneo se separa em dois ou mais minerais diferentes) para formar uma mistura entre si de duas fases. No entanto, algumas pertitas, parecem terem sido formadas como resultado da substituição parcial de feldspato potássico original pelo sódio. Em qualquer caso, a pertita é o nome aplicado corretamente as misturas íntimas em que o feldspato potássico predomina sobre o plagioclásio, enquanto antipertita é o nome dado as misturas íntimas em que o componente plagioclásio é predominante. As pertitas são comuns, enquanto antipertitas são relativamente raras.

A série plagioclásio é essencialmente contínua em altas e baixas temperaturas. Os nomes dos membros da série designam proporções relativas dos membros finais da serie (Tabela 1). Embora os grãos plagioclásio em algumas rochas sejam essencialmente homogêneos, em muitas delas apresentam-se separadas, isto é, diferentes partes dos grãos individuais têm diferentes teores de Ab e An. Uma explicação para esta separação em plagioclásio formado a partir de

magma pode estar implícito nas informações conhecidas sobre o sistema Ab-An.

Tabela 1. Series de plagioclásio

Mineral	Percentagem de albita	Percentagem de anortita
Albita	100–90	0–10
Oligoclásio	90–70	10–30
Andesina	70–50	30–50
Labradorita	50–30	50–70
Bitownita	30–10	70–90
Anortita	10–0	90–100

Após o arrefecimento, os primeiros cristais que se formam a partir da fusão com a composição X (= An50) terão a composição Y (aproximadamente An83). Com mais resfriamento, em alguns casos, os primeiros cristais e os formados posteriormente vão reagir continuamente com o líquido remanescente, mantendo assim o equilíbrio; quando o líquido se torna totalmente cristalizado, o sistema será composto por cristais homogêneo de plagioclásio. Nos casos em que tal equilíbrio não é mantido durante o resfriamento, o primeiro feldspato e posteriormente os outros formados têm diferentes teores. Por exemplo, podem formar cristais isolados com diferentes teores de An organizados um no topo do outro de maneira que as margens são relativamente ricas em sódio comparado com os primeiros cristais formados, mais ricos em cálcio. A separação resultante pode ser gradual ou bem definida e pode assumir alguma combinação destas características. A Figura 1 mostra os campos de estabilidade dos diferentes tipos de feldspatos.

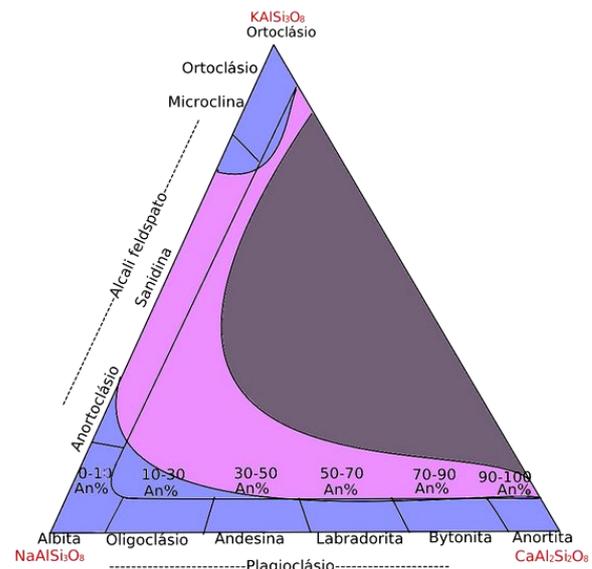


Figura 1. Campos de estabilidade dos diferentes tipos de feldspatos. Área em cinza: não tem presença de feldspato; área em azul: feldspato estável em baixas temperaturas; área em rósea: feldspato estável em altas temperaturas. Fonte: [3]

## 2. Estrutura Cristalina

A sanidina e o ortoclásio são monoclinicos ou quase isso; o feldspato plagioclásio é triclinico. Todos, no entanto, têm a mesma estrutura fundamental: trata-se de uma estrutura tridimensional, contínua, carregada negativamente que é composta de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e de  $\text{AlO}_4$  compartilhados pelos vértices (cada tetraedro consiste em um átomo de silício ou alumínio central ligados a quatro átomos de oxigênio) e carregada positivamente de cátions (tais como, potássio, sódio e/ou cálcio) que ocupam interstícios relativamente grandes na estrutura. Embora a estrutura seja suficientemente elástica para ajustar-se aos diferentes tamanhos de cátions tipo A, o tamanho relativamente grande do potássio confere uma estrutura monoclinica ou com uma simetria apenas monoclinica ligeiramente distorcida, enquanto que cátions menores de sódio e cálcio conferem estruturas distorcidas que têm simetria triclinica.

Um aspecto dos feldspatos, especialmente dos potássicos é a organização de sua estrutura. Este fenômeno é indicativo das condições em que foi formado o feldspato e a sua história térmica subsequente. A organização da estrutura do feldspato baseia-se nos tipos de organização do silício e alumínio dentro dos tetraedros diferentes. Ele pode ser caracterizado da seguinte maneira: silício e alumínio têm uma distribuição aleatória dentro dos tetraedros de sanidina, uma organização desordenada; eles têm uma distribuição regular dentro dos tetraedros constituintes de microclina, uma organização ordenada; e são distribuídos apenas parcialmente ordenados dentro dos tetraedros de ortoclásio. A estrutura desordenada de sanidina reflete formação em altas temperaturas, seguido de resfriamento rápido; o elevado grau de organização da microclina reflete um crescimento a baixas temperaturas ou resfriamento muito lento em temperaturas mais elevadas; a ordem parcial do ortoclásio indica formação em temperaturas intermediárias ou formação em altas temperaturas, seguido de resfriamento bastante lento. Com relação a este fenômeno, é também digno de nota é que todos os feldspatos plagioclásio são mais organizados do que o feldspato de potássio independentemente das temperaturas em que foram formados.

Esta Figura 2 mostra a estrutura do mineral feldspático com uma camada única visualizada perpendicular ao seu plano. A estrutura é estendida, girando cada camada sucessiva de  $90^\circ$ . Os feldspatos costumam ter um de cada quatro  $\text{Si}^{4+}$  substituído com  $\text{Al}^{3+}$ . O desequilíbrio de carga resultante é compensado por sódio e/ou íons de potássio. Alguns feldspatos têm metade seu silício substituído por alumínio, com cálcio equilibrando a carga da estrutura. O feldspato é quase tão duro quanto quartzo e é usado, devido a sua composição química, em vidros e em cerâmica, uma vez que o teor de alumínio melhora a estabilidade química e física, enquanto o seu teor de álcalis oferece função de fundente.

Os cristais dos feldspatos comuns tendem a se parecerem; um exame macroscópico da forma do cristal normalmente não pode ser usado para distinguir entre os diversos tipos de feldspatos. O ângulo entre a face que intercepta o eixo b e paralelo a a e c e a face que intercepta o eixo c e paralelo a a e b é de  $90^\circ$  para o feldspato monoclinico e varia de

aproximadamente  $86^\circ$  à  $89^\circ 30'$  para o feldspato triclinico; os desvios em  $90^\circ$  não são facilmente perceptíveis a olho nu. De qualquer maneira, os cristais de feldspato são relativamente raros; quase todos ocorrem em cavidades miarolíticas, em massas de pegmatitos. Na maioria das rochas, os feldspatos alcalinos e plagioclásio ocorrem como grãos de formato irregular com apenas pouca ou nenhuma face de cristal. Esta ausência geral de faces de cristal reflete o fato de que a cristalização destes feldspatos foi interferida pelos minerais previamente formados dentro da mesma massa [4].

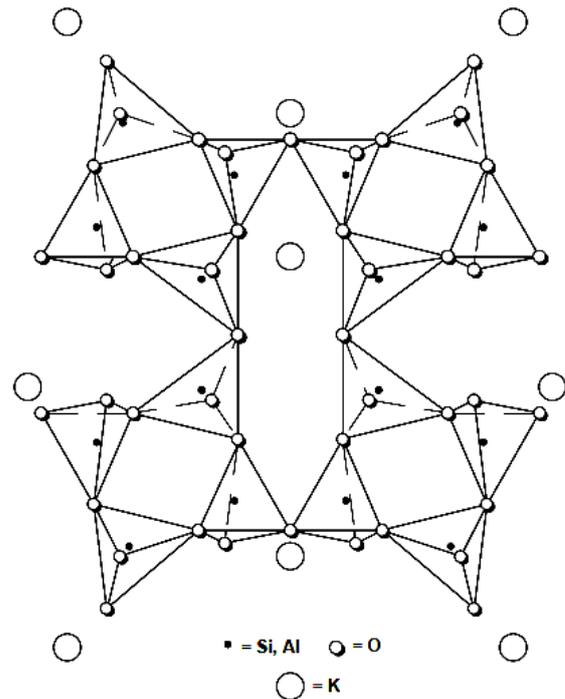


Figura 2. Característica estrutural do mineral feldspático semelhante a um cristal tetraedro de empacotamento denso. Adaptado de: [4]

## 3. Propriedades Físicas

É importante saber distinguir minerais do grupo do feldspato dos outros minerais. No laboratório, é relativamente fácil identificar o feldspato, determinando suas composições químicas, suas estruturas ou suas propriedades ópticas. Em alguns casos, são utilizadas técnicas de coloração. Felizmente, a maioria dos grãos de feldspato também pode ser facilmente identificada por exame macroscópico.

### 3.1. Propriedades comuns no grupo

Os feldspatos podem ter composições químicas e estruturas semelhantes. No entanto eles podem não ter cor inerente, ou seja, podem ser incolor, branco, ou apresentar praticamente qualquer cor se impuro. Em geral, no entanto, o ortoclásio e a microclina têm uma coloração avermelhada que

varia de um rosa pálido a vermelho-tijolo, enquanto que os plagioclásios típicos formam rochas de cores brancas a cinza escura. Os feldspatos podem variar de transparentes a quase opacos, apresentam uma dureza Mohs de aproximadamente 6.

A clivagem em 90° ou perto disso distingue o feldspato de todas as outras rochas minerais comuns exceto halita e as piroxenas. A dureza (21/2) e o sabor salgado da halita faz a distinção entre elas. A cor cinza para preta das rochas piroxenas comuns, que contrasta nitidamente com o branco ou ligeiramente tingido de tons de listras dos feldspatos — incluindo as que são de cor escura — oferece uma maneira simples de distinguir entre estes minerais, mesmo aqueles que são semelhantes em aparência.

### 3.2. Identificação de feldspato específico

Os feldspatos alcalinos podem ser distinguidos dos feldspatos plagioclásios, porque a maioria dos grãos da albita, nos plagioclásios, se manifesta por linhas paralelas em certas superfícies de clivagem, enquanto que os grãos de feldspatos alcalinos não apresentam esta característica. Este critério, no entanto, não é absoluto. Felizmente, essa semelhança raramente é confusa quando da análise exaustiva de vários exemplos.

Outra propriedade que às vezes é usada para distinguir entre feldspato alcalino e plagioclásio é seus valores de densidade. O valor ideal para o feldspato alcalino ricos em potássio é 2,56, que é menor do que para os plagioclásios (ou seja, 2,62 para albita).

A sanidina geralmente se distingue fácil dos outros feldspatos alcalinos porque ela normalmente se aparenta vitrosa, ou seja, tende a ser incolor e transparente. A microclina e o ortoclásio, pelo contrário, são tipicamente brancos, cinza claro ou cor de salmão e translúcidos, exceto pela sua variedade verde, normalmente chamado de amazonita. A microclina raramente pode ser distinguida do ortoclásio por meios macroscópicos.

No passado, muita microclina era confundida com ortoclásio por causa da suposição incorreta de que todas microclinas eram verdes. Hoje, geólogos prudentes identificam feldspato potássico, exceto sanidinas, simplesmente como alcalinos, ou em alguns casos como potássicos, ao descrever rochas feldspáticas ao exame macroscópico. Ou seja, eles não fazem uma distinção entre microclina e ortoclásio até provarem a sua identidade, determinando, por exemplo, suas propriedades ópticas. Após exame macroscópico, anortoclásio também geralmente é identificado apenas como um feldspato alcalino exceto por aqueles que estão familiarizados com as rochas conhecidas por conter anortoclásio.

Os plagioclásios raramente podem ser identificados como uma espécie por meios macroscópicos. No entanto, algumas regras gerais podem ser empregadas: feldspatos plagioclásios branco ou esbranquiçado que exibem uma iridescência azulada (as chamadas peristeritas) que têm ao todo composições de albita, mesmo que eles sejam de crescimento submicroscópico de 70% de An<sub>2</sub> e 30% de An<sub>25</sub>; e plagioclásios de cor escura que exibem iridescência de

tonalidades como laranja, amarelo, verde ou azul (labradoritas). Além disso, as identidades dos minerais associados tendem a indicar o teor de An-Ab aproximada do feldspato plagioclásio—por exemplo, a biotita mais comumente segue albita ou oligoclásio. A hornblenda costuma ocorrer com a andesina. As piroxenas, augita e/ou hiperstênio, normalmente acompanham a labradorita ou bytownita.

### 4. Origens e Ocorrências

Os feldspatos ocorrem em todas as classes de rochas. Eles são amplamente distribuídos em rochas ígneas, que indicam que eles são formados pela cristalização de magma. O intemperismo físico das rochas feldspato por rolamento pode resultar em sedimentos e rochas sedimentares que contêm feldspato. No entanto, esta é uma ocorrência rara, porque na maioria dos ambientes do feldspato tende a ser alterado para outras substâncias, como as argilas e os argilominerais. Eles também podem ser encontrados em muitas rochas metamórficas formadas a partir de rochas precursoras que continham os feldspatos e/ou elementos químicos necessários para sua formação. Além disso, os feldspatos ocorrem em veios e em pegmatitos, aparentemente depositados por fluidos e com sedimentos e solos, e que foram provavelmente depositados por águas subterrâneas. Algumas das ocorrências típicas para as espécies individuais são dadas na Tabela 2.

### 5. Aplicações

Os feldspatos formam um dos mais importantes grupos de minerais, estando presentes em cerca de 60% da crosta terrestre, podendo ser encontrados em quase todas as rochas eruptivas e metamórficas, assim como em algumas rochas sedimentares. Pertencem ao grupo dos aluminossilicatos de potássio, sódio, cálcio e mais raramente bário, sendo que o primeiro tem grande aplicação na indústria cerâmica, particularmente na produção de pisos, revestimentos e porcelanas, além de usos em vidros, esmaltes, polidores, sabão, prótese dentária, construção civil e sinalização de estradas.

Os feldspatos alcalinos são mais comercializáveis do que os feldspatos plagioclásios. A albita é usada em cerâmica. O feldspato rico em larvikita e algumas anortisitas são empregados em interiores e exteriores de construção civil.

Em adição, vários feldspatos são usados com pedras preciosas. Por exemplo, variedades que apresentam opalescência são vendidas como pedras preciosas. Espectrolita é o nome comercial da labradorita com faixas fortemente coloridas.

A pedra do sol (oligoclásio ou ortoclásio) é normalmente apresenta cor de amarela para laranja até marrom, com um brilho dourado. Este efeito parece ser devido às reflexões das inclusões de hematita vermelha. Amazonita, apresenta diversas tonalidades de verde (microclina), é usada como material ornamental.

A sanidina como fenocristais (grandes cristais perceptíveis) ocorre em rochas ígneas extrusivas fêlsicas

como riolito e traquito. Indica que as rochas foram resfriadas rapidamente após a erupção. A sanidina também é diagnóstica como rocha metamórfica de alta temperatura como um indicador de fácies metamórfica sanidinita ou hornfels.

Tabela 2. Algumas ocorrências típicas dos feldspatos

Feldspatos Potássicos*	
sanidina	rochas vulcânicas ricas em potássio e com pequenas intrusões na superfície —por exemplo, riolitas, traquitas
ortoclásio	rochas ricas em potássio – por exemplo, granitos, granodioritas, riolitas e traquitas; e sienitos**; gnaises metamórficas e xistos e arenitos
microclina	pegmatitos graníticos, veios hidrotermais; granitos, granodioritos e sienitos**; rochas metamórficas; arenitos e conglomerados
Feldspatos Plagioclásio	
albita	granitos; pegmatitos graníticos; gnaises metamórficos e xistos; arenitos
oligoclásio	granodioritas e monzonitas; arenitos; rochas metamórficas de grau moderado
andesina	dioritos; andesitas; rochas metamórficas de grau moderado, especialmente anfíbolitas
labradorita	gabros e anortositas***; diabásios e basaltos
bytownita	gabros e anortositas***; diabásios e basaltos
anortita	gabros; rocha calcária metamórfica impure; e rocha de alto grau metamórfica

\*Incluindo pertitas. Além disso, anortoclásio ocorre apenas em alguns sienitos bastante anormais (por exemplo, larvikita) e adularia — transparente, de incolor para branca, comumente feldspato potássico opalescente com um pseudo hábito romboédrico— ocorre em algumas veias hidrotermais de baixa temperatura. \*\* Sienitos típicos que consistem em quase 90 por cento de feldspato alcalino. \*\*\* Anortositas típicas compostas por cerca de 90 por cento de plagioclásio feldspático.

O ortoclásio é o principal constituinte de rochas ígneas intrusivas félsicas como o granito, granodiorito e sienitos. Também pode ocorrer em alguns xistos metamórficas pelíticos e gnaises. A microclina, também encontrada em rochas graníticas e pegmatitos, está presente em rochas sedimentares, como arenitos e conglomerados. Pode ocorrer também em rochas metamórficas.

A albita é comumente encontrada em granitos, sienitos, riolitos e traquitas. A albita é comum em pegmatitos e pode trocar a microclina anteriormente formada como cleavelandita. Também é comum em rochas metamórficas de baixa qualidade que variam de zeólita a fácies xisto-verde.

O oligoclásio é característico de granodioritos e monzonitos. Também pode ter um brilho devido a inclusões de hematita, onde é chamado pedra do sol. O oligoclásio é encontrada em rochas metamórficas formadas sob condições de temperatura moderada como fácies anfíbolito.

Certos feldspatos são menos comuns. A anortita é encontrada somente em gabros, embora seja comum em algumas rochas metamórficas de alto grau como fácies

granulito. Muitas pedras calcárias metamorfoseadas também contêm anortita. Bytownita também só é encontrada em gabros, embora a labradorita é encontrada em gabros, basaltos e anortositas. A labradorita costuma ser iridescente. Esta qualidade torna desejável para interior e exterior de construção civil. Por outro lado, a andesina é rara, exceto em andesitas e dioritas.

Os feldspatos também são usados em como materiais cerâmicos em restaurações dentárias por possuírem características estéticas semelhantes ao dente natural, alta resistência à degradação química na cavidade bucal e, principalmente, por serem biocompatíveis. Muitas das cerâmicas dentárias são vitrocerâmicas, isto é, possuem uma fase constituída por grãos finos e policristalinos envolvidos por uma matriz vítrea. As fases cristalinas numa vitrocerâmica podem ser: apatita, dissilicato de lítio, mica, leucita, entre outros. As vitrocerâmicas feldspáticas reforçadas com leucita utilizam o feldspato como matéria-prima básica.

A indústria da porcelana elétrica tem usado bastante as porcelanas feldspáticas feitas de argila, quartzo e feldspato. O feldspato atua como um fundente e o quartzo confere rigidez para o corpo cerâmico. No entanto, o quartzo residual não reagido afeta negativamente as propriedades termomecânicas devido ao desenvolvimento das tensões internas na fase vítrea durante a fase de transformação [5].

Uma série de formulações feitas com feldspato para aplicação em esmaltes de porcelana transparente é citada por [6]. Neste trabalho foi feita uma racionalização de esmaltes, a partir de um grande número relativo de diferentes composições para a indústria de porcelana de feldspato. Foi estudado o intervalo de variação a partir da composição na forma de óxidos para produzir um esmalte de porcelana feldspato transparente.

Rambaldi [7] estudaram composições para grés porcelanato mostrando ser estes produtos um avanço desenvolvido no setor de revestimentos cerâmicos. A mistura especial de matérias-primas (com composição típica, com 25 – 30% de caulim e argilas “Ball clays”, 50 – 60% de feldspato e 5 a 10% de areia de quartzo) e com temperaturas de queima elevadas, torna possível obter uma cerâmica densa, caracterizada por propriedades físicas e mecânicas muito elevadas.

Recentemente Beall [8] estudou a aplicação de feldspatos Sr–Ba como vitrocerâmicos para substratos de semicondutores de silício. Esses vitrocerâmicos podem ser feitos para coincidir com a expansão térmica do silício ( $\sim 35 \times 10^{-10} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) e com temperaturas de uso acima do ponto de fusão do silício. Os substratos podem ser revestidos com silício fundido que poderia ser subsequentemente cristalizado logo abaixo de seu ponto de fusão, cerca de 1415 oC. Por causa da habilidade de coincidir com a expansão térmica do carreto de silício e do nitreto de silício, estes feldspatos vitrocerâmicos podem ser úteis como materiais para unir estas cerâmicas de alta temperatura. Os refratários feldspáticos vitrocerâmicos de Sr–Ba também podem ser considerados como material adequado para moldes de precisão para fundição de metal fundido, talvez em temperaturas até mesmo superior a 1450°C, necessárias para algumas superligas. A

natureza de grãos finos e não-porosidade das vitrocerâmicas permitem superfície de alta qualidade, e a forma do molde pode ser muito próxima da colagem original do vidro.

## 6. Reservas e Produção dos Feldspatos

### 6.1. Reservas e produção

Os feldspatos por serem formados por silicatos de alumínio contendo diferentes proporções de cálcio, potássio e sódio, ocorrem em rochas pegmatíticas, associados a diversos outros minerais, torna-se difícil a quantificação com precisão de suas reservas, que são abundantes em todos os países produtores.

A Tabela 3 mostra os dados de 2008 de reservas e produção dos feldspatos em todo o mundo. A produção mundial de feldspato em 2008 atingiu 18,3 milhões de toneladas e os maiores produtores foram: Itália (23,0%), Turquia (20,8%), China (11,0%), Tailândia (4,4%), Japão (3,8%) e França (3,6%) [9].

Tabela 3. Reservas e Produção Mundiais de Feldspatos

Discriminação	Reservas <sup>(1)</sup>		Produção <sup>(2)</sup> (10 <sup>3</sup> t)		
	(10 <sup>6</sup> t)		2007 <sup>(r)</sup>	2008 <sup>(p)</sup>	%
Países	2008 <sup>(p)</sup>	2007 <sup>(r)</sup>	2008 <sup>(p)</sup>		
Brasil	425,7	166	122	0,7	
Itália	...	4.200	4.200	23,0	
Turquia	...	3.800	3.800	20,8	
China	...	2.000	2.000	11,0	
Tailândia	...	1.000	800	4,4	
Japão	...	750	700	3,8	
França	...	650	650	3,6	
Estados Unidos	...	730	600	3,3	
Espanha	...	600	600	3,3	
República Tcheca	68.000	490	490	2,7	
México	...	460	440	2,4	
República da Coreia	...	399	400	2,2	
Egito	...	350	350	1,9	
Polônia	87.000	350	350	1,9	
Argentina	...	170	290	1,6	
Iran	21.000	260	260	1,4	
Malásia	...	150	250	1,4	
Venezuela	...	200	200	1,1	
Alemanha	...	171	170	0,9	
Índia	...	160	160	0,9	
Portugal	...	130	130	0,7	
Outros Países	...	950	1.300	7,1	
TOTAL	Abundantes	18.136	18.262	100,0	

Fonte: [9]

Atualmente, a produção mundial de feldspato é dominada por Itália, Turquia, China e Tailândia e apesar de ter sido afetada pela reciclagem do vidro e pela competição com recipientes de metal, plástico e papel, a indústria de feldspato

continua crescendo, principalmente devido a uma busca por minerais industriais com qualidade cada vez maior. O Brasil se encaixa nesse contexto como importador de matéria prima e exportador significativo de revestimentos cerâmicos.

O Brasil possui uma das maiores reservas mundiais de granitos (superiores a 1.500.000.000 m<sup>3</sup>), sendo a extração realizada diretamente dos maciços rochosos, bem como dos matacões isolados sobre existentes. A lavra extensiva de matacões ainda é realizada no sul do País, e o aproveitamento dos blocos obtidos raramente supera 50% do material extraído, gerando um volume significativo de resíduos que consequentemente acabam impactando o meio ambiente. Em virtude de suas características mineralógicas e petrográficas, alguns granitos apresentam concentrações expressivas de feldspatos passíveis de recuperação e utilização na indústria cerâmica, tanto na composição de massas quanto na formulação de esmaltes [10]. Oficialmente as reservas conhecidas são da ordem de 79,3 milhões de toneladas, destacando-se o Estado de Minas Gerais (53,1%) e o Estado de São Paulo (37,4%). Outros Estados como Bahia, Ceará, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte e Santa Catarina são também detentores de reservas de feldspato.

Já as reservas (medidas + indicadas) oficialmente conhecidas são da ordem de 425,7 milhões de toneladas, distribuídas entre os estados do Paraná (33,7%), Rio de Janeiro (18,1%), Minas Gerais (16,7%), São Paulo (8,3%), Paraíba (7,5%), Rio Grande do Norte (7,4%), Tocantins (3,7%), Bahia (2,6%) e Santa Catarina (2,0%).

Os principais estados brasileiros produtores de feldspato (somando as produções bruta e beneficiada) são: Paraná, Minas Gerais, São Paulo, Santa Catarina, Paraíba e Rio Grande do Norte [11].

As principais empresas produtoras de feldspato atuantes no mercado são: Mineração São Luiz Ltda., Tavares Pinheiro Industrial Ltda. e Tech Roch Mineração Ltda. (SP); Ibirama Mineração Ltda.; MIVAL – Mineração Vale do Rio Tijucas Ltda. e Mineração Portobello Ltda. (SC); Mineração Ubacira Ltda. (RN); Mineração Jundu Ltda. (SP e MG); José Valmor Facher (PB); Marc Mineração Indústria e Comércio e INCEPA Revestimentos Cerâmicos Ltda. (PR); Mineração Brasil Ltda., JP Mineração Ltda., Arqueana de Minérios e Metais Ltda. e K2 Mineração e Exportação Ltda. (MG) [11].

### 6.2. Produção interna

Os dados de produção de feldspato no Brasil são bastante imprecisos. Os pegmatitos são lavrados para diversas substâncias minerais como quartzo, gemas, berilo, lítio, etc., as quais muitas vezes constituem o principal objeto da lavra. Sempre que isso ocorre o feldspato é obtido por catação no rejeito do beneficiamento. Essa produção geralmente não é registrada nas estatísticas.

A produção bruta de feldspato proveniente de lavras regulares em 2008 foi de 142.863t, representando uma queda de 21,6% ante a produção de 2007 (182.168t). O Estado do Paraná foi responsável por 78,2% da produção bruta, seguido por Minas Gerais (10,2%); São Paulo (5,5%); Paraíba (3,2%);

Bahia (1,5%) e Santa Catarina (1,5%). O Estado de Santa Catarina, que foi o 2º maior produtor em 2007, teve sua produção reduzida em virtude da paralisação por razões técnico/econômica da lavra de feldspato da empresa Mineração Vale do Rio Tijucas Ltda. (MIVAL) durante todo o ano-base de 2008.

As empresas que obtiveram as maiores produções foram: Incepa Revestimentos Cerâmicos Ltda., da Roca Brasil Ltda. (PR) – 57,7%; Marc Mineração, Indústria e Comércio Ltda. (PR) – 20,5%; Tech Rock Mineração Ltda. (SP) – 3,6%; Mineração de Feldspato Ourofinense Ltda. (MG) – 3,3%; Mineração Thomazini Ltda. (MG) – 2,13%. A produção beneficiada totalizou 121.952t, sendo assim distribuída: Paraná: 91,3%; São Paulo: 6,4% e Paraíba: 2,3%.

### 6.3. Importação e Exportação

De acordo com os dados da Secretaria de Comércio Exterior do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – SECEX/MDIC, em 2008 foram importadas 2.085t de feldspato, com um valor FOB de US\$ 371.000,00 e um preço médio de US\$ 173,94/t. Os principais países de origem foram: Espanha (56%); México (22%); Canadá (15%); China (5%) e Alemanha (1%).

Em 2008, segundo dados da Secretaria de Comércio Exterior do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e

Comércio Exterior – SECEX/MDIC, as exportações brasileiras de feldspato totalizaram 7.204t, quantidade 33% superior a observada em 2007 (5.419t). O preço médio subiu de US\$ 274,77/t em 2007 para US\$ 348,97 em 2008, representando um acréscimo de 27,0%. Os principais países importadores foram: Itália (71%), Argentina (13%), China (8%), Colômbia (3%) e República Dominicana (1%).

### 6.4. Consumo

As indústrias de cerâmica e vidro são os principais consumidores de feldspato no Brasil. Na indústria cerâmica o feldspato atua como fundente (diminuindo a temperatura de fusão), além de fornecer SiO<sub>2</sub> (sílica). Na fabricação de vidros o feldspato é utilizado como fundente e fonte de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), álcalis (Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O) e sílica (SiO<sub>2</sub>). O feldspato é também usado como carga mineral nas indústrias de tintas, plásticos, borrachas e abrasivos leves, e como insumo na indústria de eletrodos para soldas. O consumo de feldspato na indústria de vidro vem diminuindo devido ao uso de produtos substitutos e ao aumento da reciclagem. Os feldspatos podem ser substituídos em várias de suas aplicações por agalmatolito, areia feldspática, argila, escória de alto-forno, filito, nefelina sienito, pirofilita e talco.

Tabela 4. Dados de produção, importação, exportação, consumo aparente e preços dos feldspatos de 2006-2008

Discriminação		2006 <sup>(r)</sup>	2007 <sup>(r)</sup>	2008 <sup>(p)</sup>
Produção <sup>(1)</sup>	Bruta (t)	166.418	182.168	142.863
	Beneficiada (t)	71.785	166.089	121.952
Importação	(t)	14	12	2.085
	US\$-FOB	12.000	28.000	371.000
Exportação	(t)	8.501	5.419	7.204
	(US\$-FOB)	1.751.000	1.489.000	2.514.000
Consumo Aparente <sup>(2)</sup>	Beneficiada (t)	63.298	160.682	116.833
	Bruto <sup>(3)</sup> (R\$/t-FOB)	86,87	122,36	108,97
Preços	Beneficiado <sup>(3)</sup> (R\$/t-FOB)	166,43	155,16	137,88
	Exportação <sup>(4)</sup> (US\$/t-FOB)	205,98	274,77	348,98

Fontes: DNPM-DIDEM, MDIC-SECEX

Notas: <sup>(1)</sup> Produção de empresas detentoras de concessão de lavra; <sup>(2)</sup> Produção + Importação – Exportação; <sup>(3)</sup> Preço médio-FOB, mercado interno; <sup>(4)</sup> Preço médio do feldspato exportado; <sup>(p)</sup>Dados preliminares; <sup>(r)</sup>Dados revisados.

### 6.5. Características dos feldspatos do Nordeste

Os pegmatitos são as principais fontes comerciais de feldspato da região Nordeste. Os pegmatitos da região de Borborema-Seridó, localizados nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, são constituídos basicamente por minerais de quartzo, feldspato, mica, caulim, entre outros [1]. A região do semi-árido possui importantes reservas de feldspato distribuídas no norte de Minas Gerais, sudeste da Bahia, Ceará e Paraíba, em pegmatitos distribuídos nas províncias oriental do Brasil, Borborema-Seridó e Solonópole-Quixeramobim [12].

A província pegmatítica da região Borborema-Seridó localiza-se nos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte. Cerca de quatrocentos corpos pegmatíticos encontram-se

encaixados em micaxistos, quartzitos e gnaisses do Grupo Seridó e, em proporções bem menores, nos gnaisses e migmatitos do complexo gnáissico-migmatítico. Os pegmatitos, na maioria, são mineralizados em tantalita/columbita, berílio, cassiterita, turmalinas, águas-marinhas, espodumênio, micas, feldspatos, quartzo, caulim, entre outros. No pegmatito localizado no município de Currais Novos (mineração Ubadeira), são encontrados os seguintes minerais: quartzo, feldspatos, micas, berilo, turmalina e, eventualmente, a tantalita, aparentemente sem valor comercial. O beneficiamento de feldspato geralmente fundamenta-se na flotação e separação magnética para remover os minerais acessórios, tais como a mica, granada, ilmenita e quartzo. No caso de pegmatito e de areia feldspática, o quartzo é aproveitado como co-produto. Em

algumas aplicações, a existência de sílica (quartzo) é vantajosa, no entanto em outras requer um feldspato bastante puro. Os métodos de exploração e lavra até então empregados na região Borborema-Seridó são rudimentares, não há o emprego de técnicas de engenharia de minas. As técnicas de concentração utilizadas são também rudimentares e consistem apenas em uma catação manual na frente de lavra.

O principal processo de beneficiamento destes pegmatitos é a flotação, que proporciona a separação, em escala industrial, dos minerais (feldspato, quartzo e mica) com descarte das impurezas, como os minerais de ferro. O este feldspato pode ser utilizado na produção de material vitrocerâmico reforçado com leucita. A composição química da amostra bruta pegmatito e do feldspato da região Borborema-Seridó (RN) estão mostrados nas tabelas 3 e 5, respectivamente [13]. A amostra bruta do pegmatito contém basicamente sílica e alumina como óxidos principais, contendo ainda considerável teor de sódio e potássio, e em menores proporções óxido de cálcio e ferro, além de outros óxidos. Depois do processo de beneficiamento verifica-se uma redução significativa de óxido de ferro, mostrando ser efetivo o processo de flotação e separação magnética para remoção de minerais acessórios.

Tabela 5. Composição química da amostra bruta do pegmatito da região Borborema-Seridó (RN)

Componentes	% (em peso)	Componentes	% (em peso)
SiO <sub>2</sub>	69,22	CaO	0,34
TiO <sub>2</sub>	0,02	MgO	0,08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,34	Na <sub>2</sub> O	8,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	K <sub>2</sub> O	3,25
MnO	0,01	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,34
Perda ao fogo	0,29	-	-

Fonte: [13]

Tabela 6. Composições químicas (% em peso) do feldspato da região de Borborema-Seridó

Feldspato	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Total
	63,00	16,95	7,54	3,34	0,04	90,87

Fonte: [13]

## Referências

[1] Sílvia C. A. França, T. O., J. A. Sampaio, Ed. Aproveitamento de Feldspato Pegmatítico da Região

Borborema-Seridó para Produção de Vitrocerâmica Feldspática Reforçada com Leucita. Série Rochas e Minerais Industriais. Rio de Janeiro, Cetem/MCT, 2008.

- [2] Feldspar. Feldspar. Encyclopædia Britannica. E. B. Online, 2010.
- [3] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b0/Feldspar\\_stability.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b0/Feldspar_stability.jpg).
- [4] Ciullo, P. A., Ed. Industrial minerals and their uses: a handbook and formulary. New Jersey, Noyes Publications, 1996.
- [5] Maity, S., Sarkar, B. K. Development of high-strength whiteware bodies. Journal of the European Ceramic Society, v. 16, n. 10, p. 1083-1088, 1996.
- [6] Dumitrache, R. L., Teoreanu, I. Limit molecular formulas and target formulas determination for feldspar porcelain glazes." Journal of the European Ceramic Society, v. 27, n. 2-3, p.1697-1701, 2007.
- [7] Rambaldi, E., Esposito, L. Recycling of polishing porcelain stoneware residues in ceramic tiles. Journal of the European Ceramic Society, v. 27, n. 12, p. 3509-3515, 2007.
- [8] Beall, G. H. Refractory glass-ceramics based on alkaline earth aluminosilicates. Journal of the European Ceramic Society, v. 29, n. 7, p. 1211-1219, 2009.
- [9] Joaquim, L. G. (2010). Sumário Mineral - 2009. DNPM/MME, 2010.
- [10] Dutra, R. Rochas Ornamentais - Feldspato e Quartzo. II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 2008.
- [11] Jesus, C. A. G. Sumário Mineral Brasileiro 2006 – Feldspato. DNPM/MME. Arquivo digital 1(1): 4, 2006.
- [12] Perlatti, R. E., Ed. Mineração no semiárido brasileiro. Brasília, DF, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2009.
- [13] Sampaio, C. N., Ed. Aproveitamento de feldspato pegmatítico da região Borborema-Seridó para produção de vitrocerâmica feldspática reforçada com leucita. Série Rochas e Minerais Industriais -SRMI - 13. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2008.