

## A Importância da Caracterização Química e Mineralógica do Feldspato para a sua Utilização na Indústria Cerâmica e Vidreira

Sergio Túlio de Pinho Tavares<sup>a,b</sup>, Cristiane Castañeda<sup>\*\*</sup>,

Antônio Carlos Pedrosa Soares<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Centro de Pesquisa Manuel Teixeira da Costa, IGC, UFMG

<sup>b</sup>Fosfertil Mineração

\*e-mail: ccastaneda@igc.ufmg.br

**Resumo:** Foram caracterizadas 21 lavras em pegmatitos graníticos, localizadas no município de Coronel Murta, Minas Gerais, bem como estudos laboratoriais do feldspato potássico de cada uma destas lavras na perspectiva de sua utilização como minério pelas indústrias cerâmica e vidreira. Os resultados dos ensaios cerâmicos mostraram que 99% das amostras submetidas ao teste do botom foram consideradas minérios de primeira qualidade para a indústria cerâmica, enquanto o teste do azulejo aprovou nove das doze amostras avaliadas. As amostras pulverizadas contendo mica, caulim, e mica + caulim mostraram, em geral, teores relativamente baixos em sílica (< 64%) e altos em alumina (> 17%). A amostragem sistemática por zona interna do pegmatito da lavra da Água Santa, principal produtor de feldspato potássico de Coronel Murta, mostrou que este mineral na porção sudeste do corpo pegmatítico é mais rico em  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ , enquanto a parte noroeste do pegmatito apresenta feldspato com maiores teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Além disso, de verificou-se que a porção sudeste deste pegmatito é mais adequada para a produção de vidro B, enquanto a zona intermédia interna a intermédia externa NW é adequada para cerâmica de primeira qualidade. Com base na avaliação positiva do teste do botom, sobre todas as amostras, novas especificações químicas para o feldspato potássico pegmatítico de Coronel Murta podem ser sugeridas, que são:  $\text{SiO}_2 \leq 67$ ;  $\text{TiO}_2 < 0,2$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 17,0$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,15$ ;  $\text{MgO} \leq 0,3$ ;  $\text{CaO} \leq 0,3$ ;  $\text{Na}_2\text{O}$  entre 2,0 e 3,5;  $\text{K}_2\text{O} \geq 12,0$ ; Perda ao Fogo < 0,7;  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \geq 14,0$ . A utilização do teste do azulejo parece ser desnecessária, pois somente aumenta as exigências sobre o minério e restringe a oferta de vários tipos de feldspato que possuem excelente qualidade para uso cerâmico.

**Palavras-chave:** feldspato potássico, pegmatito, indústria cerâmica, vidreira

### 1. Introdução

Feldspato é o grupo mineral mais abundante, constituído por silicato de alumínio que contém variações no teor de K, Na, Ba e Ca entre os seus membros. São encontrados em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, sendo que pegmatito granítico é uma das principais fontes. O grupo do feldspato é subdividido em dois subgrupos: plagioclásios ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) e feldspatos alcalinos ou álcali-feldspatos ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8 - \text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), em função das diferenças dos tipos de álcalis predominantes e estrutura cristalina (Deer et al 1966). Entre eles, os feldspatos alcalinos, microclina e ortoclásio, são as matérias-primas para as indústrias cerâmica e vidreira. Também é usado como carga mineral nas indústrias de tintas, plásticos, borrachas e abrasivos leves, e como insumo na indústria de eletrodos para soldas conforme as suas especificações<sup>4</sup>.

Na produção da cerâmica branca, o feldspato atua como fundente devido seu conteúdo de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ), auxilia no controle do grau de vitrificação do corpo cerâmico devido ao seu alto teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e atua como estabilizante pela presença da alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), impedindo o excesso de fluidez do esmalte quando derretido<sup>9,11,12</sup>. O aumento na quantidade de feldspatos na massa inicial da cerâmica tem agregado qualidade às porcelanas transformando-as semelhantes às rochas ornamentais. O grés porcelanato, por exemplo, é um material mais denso que as cerâmicas brancas usuais, pode ser polido com facilidade e apresenta pequena absorção d'água devido a uma maior porcentagem de feldspato<sup>2,5,11</sup>.

No grupo dos vidros, os feldspatos são a principal fonte de alumina, cuja finalidade é de aumentar a resistência à corrosão química, atuar como estabilizador, melhorar a durabilidade por aumento da

resistência a impacto, dobramento e choque térmico, aumentar a viscosidade durante a formação do vidro e inibir a desvitrificação. Além disso, o conteúdo de álcalis dos feldspatos ajuda na diminuição da ação de fluxo, além de atuar como fundente. A sílica presente é utilizada como vitrificante<sup>9</sup>.

Apesar de constituir uma matéria-prima de grande importância para a indústria cerâmica, a utilização do feldspato potássico tem sido problemática. As principais dificuldades existentes no aproveitamento desse mineral dizem respeito à distância das minas em relação aos pólos industriais<sup>11,12</sup> e a falta de conhecimento das características químicas e mineralógicas e suas variações por parte da indústria. Além disso, as insuficientes classificações químicas realizadas em feldspatos para utilização na indústria cerâmica não discriminam os teores de  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ . Apesar de ambos os óxidos exercerem igualmente a função de fundentes, baixa razão  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  implica em uma menor fluidez da massa cerâmica e conseqüentemente uma distorção da massa durante a queima<sup>9</sup>.

A despeito da abundância do minério de feldspato no Brasil, essas dificuldades têm feito com que fabricantes nacionais de cerâmicas brancas procurem alternativas para substituir o feldspato, empregando outras matérias-primas de ocorrência mais freqüente em centros mais próximos dos pólos industriais<sup>12</sup>.

Este trabalho mostra o exemplo da região de Coronel Murta, município situado no Médio Vale do Rio Jequitinhonha, região nordeste de Minas Gerais e distante aproximadamente 630 km de Belo Horizonte (Figura 1). O feldspato potássico é o bem mineral local mais apreciado pela indústria, devido principalmente ao grande volume de

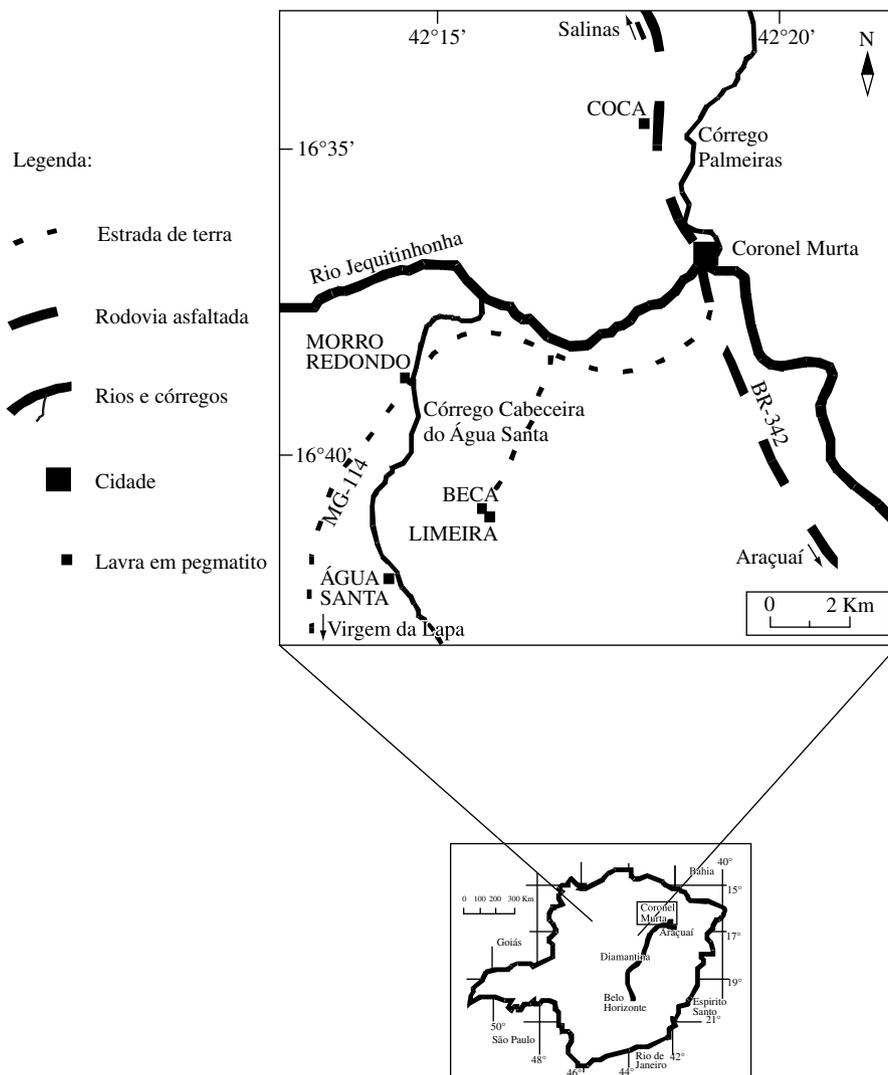


Figura 1. Localização do município de Coronel Murta em Minas Gerais.

reservas e facilidade de extração. Entretanto, não há nenhum tipo de controle sistemático do feldspato extraído de corpos pegmatíticos da área. Muitas vezes esse minério contém impurezas como inclusões de quartzo, schorlita e muscovita, somente separáveis por processos de tratamento de minérios. Isso acontece quando explora o feldspato das zonas externas do corpo pegmatítico. Este quadro faz com que a indústria faça restrições à comercialização dessa matéria-prima extraída nos pegmatitos de Coronel Murta. Atualmente, a única empresa que explora minerais industriais nesse município é a LUFÍ Mineração e Beneficiamento, com uma produção bruta de 4000 a 4500 t (dados de produção da empresa LUFÍ entre janeiro e abril de 2003) por mês de feldspatos potássicos extraídos de um único corpo pegmatítico: a Lavra da Água Santa.

## 2. Metodologia

Para a determinação da viabilidade técnica da utilização do feldspato sódico-potássico de Coronel Murta, foram coletadas 72 amostras provenientes de zonas internas de pegmatitos de 21 lavras. Foram realizadas

- Caracterizações Mineralógica Macro e Microscópica;
- Ensaios cerâmicos como os testes do botom e azulejo, e ava-

liações industriais incluindo teste visual de cor. Finalmente foram feitas; e

- Análises químicas por Fluorescência de raios X e Perda ao Fogo. As amostras foram agrupadas por lavra para facilitar o tratamento dos dados analíticos.

A caracterização mineralógica fez-se através da descrição dos aspectos macroscópicos e microscópicos dos feldspatos amostrados. O estudo macroscópico, realizados nos laboratórios do CPMTC-IGC, consistiu na determinação das seguintes propriedades físicas dos feldspatos: cor, brilho na superfície, clivagem, macropertita, grau de alteração intempérica, presença de inclusões e outras características. A descrição microscópica objetivou principalmente determinar a morfologia das lamelas de albita bem como a caracterização da alteração. Os tipos de pertita foram caracterizados de acordo com Deer<sup>3</sup>.

Os ensaios cerâmicos de queima e piroexpansão foram executados nos fornos MVFLA da empresa LUFÍ Mineração e Beneficiamento Ltda., localizada em Coronel Murta. Foram realizados os testes do botom, para avaliar a cor, aumento de volume e porosidade do minério após a queima, e do azulejo, para determinação de sua transparência. A piroexpansão consiste em fundir a amostra de feldspato pulverizado e misturado ou não com *frita* FMT-2331 da empresa Matthey Cerâmica Ltda na proporção de 2/3 a uma temperatura de cerca de

1000 a 1100 °C<sup>-1</sup>. Este processo permite identificar a cor da amostra a após a sua queima, determinar a variação de volume e a presença de bolhas no material pós-queima (grau de coesão).

O teste visual de cor constitui uma avaliação industrial a ser realizada antes da preparação dos ensaios cerâmicos, ou seja, utilizando-se o minério pulverizado antes deste ser submetido a queima. Para este teste, separou-se uma pequena quantidade de minério moído (menos de 50 g) e colocou sobre uma folha branca de papel sulfite, facilmente encontrada em papelarias, que atua como fundo branco para ressaltar a tonalidade do minério. Então, comparou-se a cor deste com as tabelas de cores. Para melhor resultado, propõe-se o uso de catálogos de tintas das marcas Coralit e Suvinil, disponíveis em qualquer casa de materiais de construção. Este teste visual de cor, que foi realizado no CPMTIC-IGC-UFGG, também pode auxiliar na avaliação da alteração intempérica através da cor observada. O pó utilizado nesta avaliação pode ser usado normalmente nos ensaios de queima.

Análises químicas em cristais pulverizados foram feitas em Espectrômetro de fluorescência de raios X, em equipamento *Sequential X-Ray Spectrometer* modelo SRS-3000 da marca SIEMENS, em rotina no CPMTIC-IGC-UFGG as amostras foram pulverizadas até atingir um tamanho menor que 0,5 mm.

### 3. Resultados e Discussões

#### 3.1. Caracterização mineralógica

O feldspato é cinza nas lavras da Fazenda Boa Vista e Zé Matão, enquanto pode ser creme a salmão no Morro da Serra e Morro Redondo. Nas lavras do Beca e Valdivino P. Rodrigues ocorre feldspato também de cor creme, provavelmente devido à forte alteração intempérica nesses pegmatitos. O feldspato predominantemente branco é encontrado nas lavras: Fábio de Aires e Cido de Quinha, Mário Alberto, Perobeiros, e Fazenda Cacimba. As outras lavras como Coca, Limeira e Água Santa produzem feldspato branco a gelo ou creme. Todas as amostras de feldspato com brilho terroso e/ou clivagem fraca exibem acentuada alteração intempérica.

Destaca-se a ausência de macropertita em apenas dois feldspatos provenientes de pegmatitos homogêneos, exceto na lavra do Zé Matão que também explora um corpo homogêneo, e cujo feldspato exibe macropertita espaçada e contínua. Todas as outras lavras apresentam feldspato com macropertita espaçada e contínua. Porém, esta feição pode ser difusa nas lavras de Beca, Taquaral e Morro Redondo, ou crenulada em Coca e Limeira.

Não há inclusões minerais no feldspato das lavras Juazeiro, Luiz de Zé Francisca, Coca e Perobeiros. Ocorrem dendritos de Mn principalmente nas fazendas Boa Vista e Cacimba. O feldspato é quebradiço em Valdivino P. Rodrigues e Miguel Pedro devido a forte caulnização. As inclusões mais comuns nas outras lavras são de quartzo, muscovita e schorlita. A sericita ocorre em feldspato de: Morro da Serra, Alto da Copasa, Fábio de Aires e Cido de Quinha, Mário Alberto, Valdivino P. Rodrigues, Zé Matão, Beca, Limeira, Água Santa, Morro Redondo e Fazenda Turmalina.

O feldspato das lavras de Luiz de Zé Francisca, Coca e Perobeiros apresenta alteração intempérica incipiente, enquanto que em Juazeiro, Joel V. Alves e Fazenda Cacimba o intemperismo é fraco. Nestas lavras que sofreram baixo grau de intemperismo, este fator não influencia na cor do feldspato. As alterações intempéricas medianas ocorrem no feldspato das lavras: Alto da Copasa, Mário Alberto, Zé Matão, Beca, Limeira, Água Santa, Morro Redondo e Fazenda Turmalina. As lavras de Morro da Serra, Fábio de Aires e Cido de Quinha, Valdivino P. Rodrigues, e Miguel Pedro exploram feldspato com acentuada alteração intempérica. O caulim é produto do intemperismo do feldspato de todas as lavras. As lavras de Juazeiro, Luiz de Zé Francisca, Coca e Perobeiros, que registram os

menores graus de alteração, possuem também o feldspato mais livre de inclusões minerais.

Foram selecionadas dez amostras de feldspato potássico de acordo com suas características macroscópicas e também pela sua importância econômica para a confecção das lâminas delgadas com o objetivo de caracterizar e classificar as pertitas. O feldspato de Água Santa apresenta pertita interligada, assim como em Coca. A pertita é do tipo barras espaçadas na lavra dos Perobeiros. Na Fazenda Boa Vista os feldspatos exibem pertita contínua em barras ou filetes. Já o feldspato da lavra do Beca exibe um comportamento aleatório dos tipos de pertita, que pode ocorrer como lamelas e barras contínuas, ou como vênulas e filetes descontínuos. Esse caráter heterogêneo do tipo de pertita em Beca é coerente com a descrição macroscópica que detectou a presença de macropertitas difusas no feldspato dessa lavra.

#### 3.2. Ensaios cerâmicos e avaliações industriais

Segundo o teste visual de cor as amostras apresentam-se nas cores branco, gelo, areia, palha, marfim, champagne e pêssego. Sendo assim, foram utilizadas 10 cores em cada cartela. É importante ressaltar que após a comparação com a cartela de tintas muitas amostras tiveram a sua avaliação de cor modificada.

O teste do botom certificou que nenhuma das amostras coletadas apresentou piroexpansão, bem como a presença de bolhas ou poros em sua superfície. Em relação a cor pós-queima, apenas três amostras foram reprovadas (AGF-4A, ST-082-VR e ST-086-BV) por apresentarem cor mais escura. Todas as outras foram consideradas de 1ª qualidade para indústria cerâmica por profissionais da empresa, que adota o produto do botom com parâmetro qualificador.

O teste do azulejo foi aplicado a algumas amostras de feldspato das lavras de Água Santa e Beca. Todas as amostras apresentaram cor de queima branca, enquanto três amostras da Água Santa (AGF-4A, AGF-6A e AGF-7A) mostraram-se transparentes após a queima (Tabela 1). Desta forma, estas três amostras foram reprovadas no teste do azulejo e consideradas inadequadas para a produção de cerâmica de 1ª qualidade.

De acordo com os dados da Tabela 1, a amostra AGF-4A foi reprovada no teste do botom por tornar-se cinza depois de submetida a queima a 1100 °C. O teste do azulejo reprovou, além daquela amostra, as amostras AGF-6A e AGF-7A por exibirem cor de queima transparente. Neste caso, 75% das amostras submetidas ao teste do azulejo (nove amostras de um total de doze) foram consideradas adequadas para a produção de cerâmica de 1ª qualidade.

#### 3.3. Análises químicas

Para o tratamento dos dados adquiridos por fluorescência de raios-X e perda ao fogo (P.F.), foram feitas comparações com as especificações usadas pelas indústrias cerâmica e vidreira. Os parâmetros utilizados para a indústria cerâmica estão apresentados no trabalho de Silva<sup>10</sup>, enquanto que os da indústria vidreira são aqueles estabelecidos pela ABIVIDRO. Estes últimos parâmetros apresentam intervalo definido (valores máximos e mínimos) para os óxidos principais (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O etc) e discriminam apenas duas variedades de vidros. Sendo assim, a Tabela 2 lista as especificações químicas utilizadas para classificação do feldspato das lavras de Coronel Murta.

Para melhor tratamento dos dados, dividiram-se as amostras em cinco conjuntos: Água Santa, Beca, Coca, Limeira (por serem as lavras de maior produção ou de maiores reservas) e Outras Lavras. Nesta última categoria foram agrupadas todas as outras amostras. No caso da Água Santa foi possível agrupar as vinte e nove amostras desta lavra de acordo com a zona interna do pegmatito. Um maior detalhamento a respeito destas análises químicas encontra-se na dissertação de mestrado do primeiro autor Pinho-Tavares<sup>7</sup> e no trabalho de Pinho-Tavares et al. (submetido)<sup>8</sup>.

**Tabela 1.** Ensaios cerâmicos de queima a 1100 °C das amostras de feldspato potássico das lavras da Água Santa e Beca para produção de botons e azulejos. AGF = Água Santa, BE= Beca.

Zona	Amostra	Botom	Azulejo
Zona mural SE	AGF-1A	branco	branco
	AGF-2A	branco	branco
	AGF-4A	gelo (cinza claro)	transparente
Zona intermédia externa SE	AGF-5A	branco	branco
	AGF-6A	branco	transparente
	AGF-7A	branco	transparente
	AGF-3B	branco	branco
Zona intermédia interna	AGF-4B	branco	branco
	AGF-1B	branco	branco
	AGF-2B	branco	branco
Zona intermédia	AGF-1C	branco	branco
	BE-3A	branco	branco

**Tabela 2.** Principais especificações em porcentagens para o uso do feldspato na fabricação de cerâmicas de 1ª e 2ª qualidades e de vidros dos tipos A e B. P.F. = perda ao fogo máxima (Silva<sup>10</sup>, site da ABIVIDRO; modificado pelo autor).

Produto	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	P.F.
Cerâmica 1ª	≤ 67	< 0,2	> 18	≤ 0,1	≤ 0,3	≤ 0,3	-	-	≥ 13,0	0,5
Cerâmica 2ª	<< 71	-	≥ 15	≤ 0,51	-	-	-	-	≥ 10,0	1,0
Vidro A	64,5-65,5	-	18,5-19,5	< 0,1	-	< 0,2	2,5-3,5	11,5-12,5	14,0-16,0	0,5
Vidro B	66,0-68,0	-	15,0-17,0	< 0,3	-	< 0,5	2,5-3,5	9,0-11,0	11,5-14,5	1,0

Para cada um dos dez parâmetros químicos diagnosticados pelas análises foi construído um gráfico de linhas no qual é mostrado o limite das indústrias para aquela variável (de acordo com a Tabela 2). Quase todas as amostras são compatíveis com cerâmica de 1ª qualidade em relação ao teor de SiO<sub>2</sub>. Estas análises mostraram que dentre as 29 amostras apenas três apresentaram valores superiores ao máximo permitido para a cerâmica de 1ª qualidade, mas aceitáveis para cerâmica de 2ª qualidade. Quanto aos produtos destinados às indústrias vidreiras, sete amostras enquadram-se na classe de vidros A, enquanto apenas três atendem à classe de vidros B. Todas as amostras apresentam menos de 0,05% de TiO<sub>2</sub>, o que as classifica como aptas para cerâmica de 1ª qualidade cujo valor máximo admitido é 0,2% TiO<sub>2</sub>.

As análises de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> das amostras das zonas mural e intermédia da porção SE são mais pobres em alumínio que às da zona intermédia e intermédia externa da porção NW do corpo pegmatítico. Nesta relação, as amostras à SE são compatíveis com o vidro B, enquanto às mais a NW servem para vidro A. Treze amostras localizadas nas zonas mural NW, intermédias interna e externa NW são adequadas para produção de cerâmica de 1ª qualidade. O gráfico para Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mostra a porção NW mais enriquecida em Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que a parte SE. Portanto, as amostras compatíveis com vidro A e cerâmica de 1ª qualidade estão na zona intermédia interna, externa SE e mural SE, enquanto que as demais estão aptas para vidro B e cerâmica de 2ª qualidade.

Todas as amostras apresentam valores adequados de MgO para a cerâmica de 1ª qualidade. Todos os valores estão abaixo de 0,1%, exceto para uma amostra da zona intermédia externa NW com 0,2% de MgO. A zona intermédia interna mostra amostras com menos de 0,04% de MgO. Quanto ao CaO, quase todas as amostras enquadram-se nos parâmetros do vidro A e cerâmica de 1ª qualidade, exceto duas amostras da zona intermédia interna que apresentaram teores quase 10 vezes acima da média para Água Santa. A zona mural SE é um pouco mais empobrecida em CaO.

A grande maioria das amostras enquadra-se nos vidros A e B quanto ao teor de Na<sub>2</sub>O. Os teores médios variam de 3,0 a 3,5% de Na<sub>2</sub>O. Apenas três amostras exibem valores acima de 4,5% de Na<sub>2</sub>O e se encontram nas zonas mural e intermédia externa SE. Em relação ao K<sub>2</sub>O, a grande maioria das amostras apresenta teores compatíveis com o vidro A. O gráfico mostra que as zonas intermédias externas são pobres em K<sub>2</sub>O em relação às zonas murais e intermédia interna. Apenas uma amostra enquadra-se no vidro B.

Apenas duas amostras apresentam valores de perda ao fogo (P.F.) satisfatórios para cerâmica de 1ª qualidade e vidro A. Todas as outras amostras são compatíveis com vidro B e cerâmica de 2ª qualidade. Comparando-se estes valores de P.F. com o valor de 0,72% H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> considerado para uma microclina micropertítica de pegmatito<sup>3</sup>, pode-se admitir este valor como parâmetro máximo aceitável para cerâmica de 1ª qualidade e vidro A, teríamos 24 das 29 amostras em compatibilidade com estes segmentos industriais.

Segundo os dados de Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O todas as amostras são compatíveis com cerâmica de 1ª qualidade. Apenas uma amostra é adequada à produção de vidro B, enquanto quase vinte amostras são adequadas para vidro A.

A análise geral dos dados dos óxidos do feldspato da Água Santa mostra que a porção SE do pegmatito é mais rica em SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O, enquanto a parte mais a NW do corpo pegmatítico apresenta feldspato com maiores valores em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Quanto aos segmentos industriais, pode-se dizer que segundo os dados de SiO<sub>2</sub>, e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a porção SE é mais adequada para a produção de vidro B, enquanto a zona intermédia interna a intermédia externa NW é adequada para cerâmica de 1ª qualidade.

#### 4. Discussões e Conclusões

A indústria cerâmica não estabelece especificações químicas para o feldspato potássico. O que se observa é que cada empresa tem seus

próprios parâmetros baseando-se em testes e resultados anteriores. Desta forma, as especificações químicas dos feldspatos existentes não são resultados de investigações científicas, mas de métodos muitas vezes empíricos. Tal fato é corroborado pelo fato de que os dados químicos do feldspato são parâmetros subordinados aos ensaios cerâmicos como teste de queima para produção de botons, cones e/ou azulejos.

No caso do teste do botom, o principal aspecto a ser considerado é a piroexpansão. O minério feldspático é considerado de boa qualidade quando não ocorre expansão e não há formação de poros por escape de voláteis quando submetido à queima. Um valor elevado de perda ao fogo indica que há grande escape de voláteis e fluidos da estrutura do mineral-minério. Essa grande taxa de escape de fluidos pode causar danos à estrutura da cerâmica, uma vez que os fluidos saem a medida que a temperatura vai aumentando e quando o minério já não apresenta estrutura cristalina, tornando-se um material amorfo. Entretanto, em qualquer das setenta e duas amostras analisadas não ocorreu expansão nem a formação de poros na superfície do botom. Sendo assim, valores inferiores a 0,98% de perda ao fogo para feldspato potássico de Coronel Murta não provocam alterações macroscópicas na estrutura deste mineral.

O teste do azulejo é mais rigoroso que o do botom, uma vez que pode reprovar minérios qualificados no ensaio cerâmico anterior. Entretanto, a determinação da transparência de um feldspato potássico por uma película menor de 0,5 cm de espessura é uma medida exagerada para avaliar um critério essencialmente estético. Desta forma, a utilização do teste do azulejo para se determinar com maior precisão a cor de queima do feldspato parece ser uma exigência desnecessária, pois a diferença de coloração observada nos azulejos não é perceptível nos botons. Portanto, o teste do azulejo somente aumenta as exigências sobre o minério e restringe ao mercado vários tipos de feldspato que possuem excelente qualidade para o uso cerâmico.

As especificações químicas não são muito rígidas na indústria cerâmica uma vez que o teste determinante é o de queima para produção dos botons e cones. Dentre as setenta e duas amostras de feldspato analisadas, apenas uma foi reprovada pelos padrões da indústria cerâmica de 1ª qualidade. Na medida em que o teste do botom certificou a qualidade de praticamente todas as amostras, torna-se plausível o procedimento de relevar para segundo plano as especificações químicas. Porém, é importante ressaltar que o teste do botom é baseado em critérios subjetivos, como a visão humana na determinação da cor e variação do volume.

Desta forma, o estabelecimento de parâmetros químicos para a utilização do feldspato na indústria cerâmica é critério importante para potencializar a atividade mineraria. Analisando os dados químicos pode-se fazer algumas considerações a respeito das especificações químicas para o uso do feldspato na indústria cerâmica de 1ª qualidade, adequando os limites de caracterização dos padrões industriais tendo em vista a certificação dada pelo teste cerâmico do botom.

Neste sentido, verifica-se que limite máximo de 67% de SiO<sub>2</sub> é coerente, pois o teor médio admitido para feldspato potássico é 64-65%. Valores inferiores a 64% SiO<sub>2</sub> em feldspato das lavras de Coronel Murta indicam a presença de mica e/ou caulim. As especificações para TiO<sub>2</sub> também são adequadas, visto que o teor médio encontrado no feldspato de Coronel Murta é 0,02-0,04%. Como a função do TiO<sub>2</sub> é opacificante, ou seja, é estética e não estrutural, o limite máximo de 0,2% TiO<sub>2</sub> pode ser flexível de acordo com a cor de queima obtida através do teste do botom. Em relação ao Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, apesar da literatura admitir feldspato

potássico com teor médio entre 18,5 e 19,1%, os feldspatos de Coronel Murta apresentaram teores em torno de 17 e 18%, sendo que o teste do botom qualificou feldspato com até 16% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Porém, como a alumina exerce a função de estabilizante, é mais prudente reduzir o limite mínimo de 18 para 17% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e não 16%.

Os parâmetros para ferro são os mais problemáticos, a amostra que apresentou 0,12% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, tornou-se cinza após a queima. Entretanto, outras trinta e cinco amostras com mais de 0,1% deste óxido, atingindo a 0,25%, foram aprovadas no mesmo teste do botom. Neste caso, o limite máximo pode ser ampliado para 0,15 ou 0,18%. O grande embate é que Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é um corante que pode retirar a principal característica da cerâmica branca, que é a cor. Portanto, para o Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o resultado do teste do botom terá maior importância que os dados químicos.

As especificações para MgO e CaO são apropriados, uma vez que ambos os limites máximos (que são iguais em 0,3%) são superiores a média dos teores de MgO e CaO observados nos feldspatos estudados. Para os teores de Na<sub>2</sub>O, as especificações utilizadas para produção de vidro A são também adequadas para a indústria cerâmica de 1ª qualidade, com o valor mínimo podendo ser 2,0 ou 2,5%, mas com restrições a valores superiores a 3,5%, pois o sódio diminui a viscosidade do fluido cerâmico, o que pode causar distorções no produto final. Em relação ao K<sub>2</sub>O, o valor mínimo pode ser de 12% de forma a garantir que o feldspato usado na cerâmica de 1ª qualidade tenha a razão K/Na mínima em torno de 3,5.

Os valores máximos de 0,5% para perda ao fogo (P.F.) admitidos para o feldspato para a sua utilização nos segmentos de cerâmica 1ª e vidro A constituem limites muito rigorosos e incompatíveis com a estrutura cristalina dos feldspatos potássicos. Isso é corroborado pelo fato de menos de 10% das amostras analisadas apresentarem-se abaixo dos 0,5% P.F. Visto que o valor de H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> observado para uma microclina micropertítica de pegmatito é de 0,72%<sup>3</sup>, e utilizando este mesmo valor como parâmetro máximo aceitável para cerâmica 1ª e vidro A, mais de 80% das amostras estaria em compatibilidade com estes segmentos industriais. Como foi constatado pelo teste do botom, nenhuma das amostras apresentou expansão ou formação de bolhas após a queima a 1100 °C, nem mesmo aqueles cujo valor de P.F. atingiu 0,9%. Com base nesses fatos, um feldspato de 1ª qualidade com aceitação para produção de cerâmica 1ª e vidro A pode apresentar um valor de 0,7% P.F. sem haver comprometimento da qualidade do produto final.

As especificações para Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O em feldspato de Coronel Murta pode ser modificada para admitir 14% de álcalis como limite mínimo, uma vez que há grande predomínio dos feldspatos pertíticos nos pegmatitos de Coronel Murta.

Desta forma, as especificações químicas do feldspato de Coronel Murta para uso na indústria cerâmica de 1ª qualidade propostas neste trabalho podem ser resumidas na Tabela 3.

A caracterização mineralógica, geológica e química dos feldspatos representa a melhor solução para aproveitamento desse mineral na indústria cerâmica e também em outras (vidros, tintas, abrasivos etc). O conhecimento amplo das propriedades do minério feldspático constitui um pilar fundamental para o desenvolvimento de uma mineração adequada desse bem mineral de grande importância para diversos ramos da indústria nacional.

A região de Coronel Murta, bem como todo o nordeste brasileiro produtor de feldspato potássico pegmatítico, necessita de maior inser-

**Tabela 3.** Especificações químicas propostas, em porcentagens, para o uso do feldspato na fabricação de cerâmica de 1ª qualidade.

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P.F.	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O
Silva et al. (1996)	≤ 67,0	< 0,2	> 18,0	≤ 0,1	≤ 0,3	≤ 0,3	-	-	< 0,5	≥ 13,0
Presente trabalho	≤ 67,0	< 0,2	> 17,0	≤ 0,15?	≤ 0,3	≤ 0,3	2,0 a 3,5	≥ 12,0	< 0,7	≥ 14,0

ção mercadológica para que o minério, principalmente o de qualidade inferior, tenha destino diferente das pilhas de rejeitos ou das inúmeras tentativas de blendagem com minérios de alta qualidade.

## Referências

1. Almada M. M. & Vicek T. F. Pilhas de homogeneização: uma nova visão para feldspato cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 4, p. 31-34, 2000.
2. Coelho J. M., Suslick S. B., Souza M. C. A. F. Uma abordagem sobre a indústria de feldspato no Brasil. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 1, p. 37-42, 2000.
3. Deer W. A., Howie R. A. & Zussman J. **An introduction to the rock forming minerals**. 1 ed. London: Longman Scientific & Tecnical, 1966. 689 p.
4. Manning D. A. C. **Introduction to Industrial Minerals**. 1 ed. London: Chapman & Hall, 1955. 254 p.
5. Moreira M. D. **Aplicações dos Minerais e Rochas Industriais**. 1 ed. Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Bahia-Sergipe, 1994. p. 17-20.
6. Novaes de Oliveira A. P. Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 6, p. 37-47, 2000.
7. Pinho-Tavares S. **O feldspato industrial de Coronel Murta, MG: caracterização de lavras em pegmatitos e do feldspato potássico na perspectiva de aplicações à indústria cerâmica e vidreira**. 2004. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica), IGC-UFMG, 2004.
8. Pinho-Tavares S.; Castañeda, C.; Pedrosa-Soares, A. C. **O Feldspato Industrial de Coronel Murta, MG e a Perspectiva de Aplicações à Indústria Cerâmica e Vidreira**. RBG (submetido)
9. Robbins J. Feldspar and nepheline syenite: filling a need? **Industrial Minerals**, n. 228, p. 69-101, setp., 1986.
10. Silva E. F. A., Cunha J. C., Marinho M. M. **Pegmatitos da região de Itambé, Bahia: geologia e potencialidade econômica**. Salvador CBPM. 30 p. 1996 (Série Arquivos Abertos; 10).
11. Sotério J., Matsura L., Melchiades F. G., Boschi A. O. **Desenvolvimento de uma massa de grés porcelanato utilizando agalmatolito**. 2002. Tese de Doutorado. DEMa/UFSCar, 2002.
12. Zanon B. JR., Fonseca M., Melchiades F. G., Boschi A. O. **Matérias primas fundentes para a indústria cerâmica**. 2002. Tese de Doutorado. DEMa/UFSCar, 2002.