



BENEFICIAMENTO DE ALBITA A PARTIR DE FLOTAÇÃO REVERSA E SEPARAÇÃO MAGNÉTICA PARA REMOÇÃO DE MINERAIS CONTAMINANTES

Álvaro Fontanela Benedet¹

Guilherme Silva de Souza²

Resumo: O presente estudo tem como escopo a agregação de valor a um minério de albita (feldspato sódico), proveniente da região nordeste do país, realizando, para tanto, processos de beneficiamento para remoção de minerais deletérios presentes. No que tange ao minério, tem-se que este é amplamente utilizado pela indústria de vidro plano, coloríficos e cerâmica de revestimento (porcelanato). Ainda, consigna-se dizer, que, o referido termo é utilizado para denominar um grupo de minerais constituídos de aluminossilicatos de potássio, sódio e cálcio. O processo de beneficiamento por meio do qual se buscou efetivar a tratativa do estudo, foi realizado à nível laboratorial no Centro Universitário UniSATC; e contou com processo de moagem, separação magnética e flotação. Sendo assim, a partir do processo de beneficiamento, foram confeccionados cones de fusão e análises químicas para a avaliação dos resultados. E, por intermédio desses resultados, foi possível afirmar uma melhora significativa nas características tecnológicas do minério, principalmente no que concerne a cor de queima. Através do processo de separação magnética e flotação da amostra, conseguiu-se uma redução de significativa nos teores de Fe_2O_3 e TiO_2 , respectivamente. Os ganhos em relação a cor de queima, observadas por via da análise visual dos cones de fusão e, ratificadas pelos resultados da análise química, vislumbra um aumento na margem de contribuição do produto, tendo em vista a garantia de sua aplicação na indústria cerâmica de revestimentos, demais massas porcelanizadas, esmaltes e vidro plano.

Palavras-Chave: Feldspato. Albita. Flotação. Separação Magnética.

1 INTRODUÇÃO

A mineração tem participação fundamental no Produto Interno Bruto (PIB) nacional, segundo relatório anual de atividades (julho de 2018 - junho de 2019), elaborado pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), a indústria extrativa representa 3,7% de todo PIB Brasil (IBRAM, 2019).

Um dos minerais utilizados amplamente pela indústria cerâmica trata-se do feldspato. Este é o termo empregado para denominar um grupo de minerais

¹ Graduando em Engenharia de Minas, Centro Universitário UniSATC. E-mail: alvaroxfontanela@live.com

² Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: guilherme.souza@satc.edu.br



constituídos de aluminossilicatos de potássio, sódio e cálcio (LUZ; LINZ; COELHO, 2008, p. 467, *apud* HARVEN, 1994).

Segundo Lira e Neves (2013, p.110), os feldspatos potássicos incluem o ortoclásio e microclínio (principalmente) e os minerais de mistura potássio (K) e sódio (Na), como a sanidina e o anortoclásio, chamadas de pertitas. A série dos plagioclásios (feldspatos calcosódicos) tem como extremos a albita (rica em sódio) e a anortita (rica em cálcio), são minerais isomórficos, os quais cristalizam na mesma forma cristalina (triclínico) e o que os diferencia são os átomos de sódio e de cálcio (conhecidos como minerais de mistura).

As indústrias de vidro plano, coloríficos e cerâmica de revestimentos (porcelanato) são as principais consumidoras de feldspato. Essas demandam especificações físicas e químicas e certo grau de uniformidade em relação à qualidade e garantia de suprimento do produto. O feldspato também é usado nas indústrias de tinta, plástico e borracha.

Buscando agregar valor ao minério, deseja-se definir, à nível de laboratório, um sistema de beneficiamento de uma albita proveniente da região nordeste do país que contém minerais deletérios de ferro e titânio em sua estrutura, considerados indesejáveis pela cor desenvolvida no processo de sinterização.

A relevância da pesquisa está em melhorar a performance tecnológica da albita, o que irá valorizar o minério, criando novos mercados e elevando consideravelmente seu preço de venda.

Assim, o objetivo geral deste trabalho é otimizar as características tecnológicas do minério, cuja jazida está localizada na região nordeste do país, à nível laboratorial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FELDSPATOS

O nome feldspato tem origem no alemão *feld* (campo) e *spath* (pedra) e no grego *spáthe* (lâmina) (RAMOS, 2001).



Depois do quartzo, os feldspatos constituem os minerais mais comuns na crosta terrestre, aparecendo em quase todas as rochas eruptivas e metamórficas, assim como em algumas rochas sedimentares.

Os feldspatos pertencem ao grupo de silicato de alumínio com potássio, sódio, cálcio e, mais raramente, bário, conforme a composição química: $X,Al(Al,Si)SiO_2O_8$, onde X = sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca) e bário (Ba). Pequenas quantidades de lítio (Li), rubídio (Rb), céσιο (Cs) e, estrôncio (Sr) podem ser observadas.

As características gerais dos feldspatos são:

- Dureza (Mohs): 6;
- Cor: variável, sendo a maioria branca, creme ou rosa;
- Peso específico: 2,56 a 2,77;
- Ponto de carga zero (PCZ): 1,4 A 1,6;
- Sistema de cristalização: monoclinico, triclinico;
- Brilho: vítreo;
- Aspecto óptico: translúcido e transparente (CHAVES, 2013, p. 368).

Os feldspatos têm propriedades físicas muito similares entre si, no entanto, devido à sua composição química, se agrupam em: feldspato de potássico (ortoclásio, microclínio, sanidina, adularia), feldspato de bário (celsiana) e a série dos feldspatos calco-sódicos, da albita (Na) até a anortita (Ca) (SEGEMAR, 2000).

A albita e anortita formam uma serie isomórfica contínua de soluções sólidas em diferentes temperaturas. Esta série é, também, denominada de plagioclásio e varia desde a albita pura, à anortita pura. Segundo a composição relativa de cada um desses, recebe a denominação constante da Tab. 1 (SEGEMAR 2000).

Tabela 1: Série dos plagioclásios.

Plagioclásio	% de Albita	% de Anortita
Albita Na ($AlSi_3O_8$)	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 Ca ($Al_2Si_2O_8$)	10-0	90-100

Fonte: Segemar (2000).



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_2 (sílica). Na fabricação de vidros o feldspato é utilizado como fundente e fonte de alumina (Al_2O_3), álcalis (Na_2O e K_2O) e sílica (SiO_2).

2.2 PLAGIOCLÁSIO

Na classificação das rochas ígneas da *International Union de Geological Sciences* (IUGS), o feldspato é dividido em dois grupos: o feldspato alcalino e o feldspato plagioclásio. O feldspato plagioclásio inclui membros da série da solução sólida de albita-anortita, no entanto, a albita é um feldspato alcalino, bem como um feldspato plagioclásio (LIRA; NEVES, 2013, p. 110).

São minerais isomórficos, ou seja, apresentam a mesma estrutura cristalina e composição química diferente. É um termo usado para a solução sólida que está entre a albita (Ab) ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e a anortita (An) ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).

Exceto em algumas rochas ultramáficas, alcalinas e muito ácidas, os plagioclásios são constituintes essenciais em rochas ígneas, em muitas rochas metamórficas e em sedimentos clásticos imaturos (UFRGS, 2020).

A albita é típica de granitos, pegmatitos graníticos, gnaisses metamórficos e xistos, e arenitos. A anortita é relativamente rara, possui ocorrência típica em gabros, rocha calcária metamórfica e, rocha de alto grau metamórfico (LIRA; NEVES, 2013, p. 114).

2.3 OCORRÊNCIA DOS FELDSPATOS

Os maiores depósitos de feldspatos comerciais de feldspato são encontrados em pegmatitos, rochas graníticas, alaskito, aplitos (variedade de rocha granítica) e em areias de rios, dunas e praias (BETEJTIN, 1970; apud CHAVES, 2013 p.371).

Os pegmatitos são constituídos por feldspato, quartzo e mica, sendo encontrados em grandes cristais e permitindo fácil separação. O pegmatito geralmente



é composto por 60%-70% de feldspato, 25%-30% de quartzo, 5%-10% de mica e 1%-2% de minerais acessórios.

Alaskito é uma rocha (granito pegmatítico) portadora de feldspato de grãos grosseiros com 45% de oligoclásio, 20% de microclínio, 10% de mica-muscovita, 20% de quartzo e o restante de minerais acessórios. No alaskito, ao contrário dos pegmatitos, a distribuição mineral é relativamente uniforme (CHAVE, A. P. 2013, p. 371).

Aplito é uma rocha granítica de granulação fina e com alto teor de feldspatos. Consiste essencialmente de quartzo e ortoclásio. O termo aplito é textural e necessariamente implica uma composição granítica, podendo variar entre o gabro e o granito (CHAVE, A. P. 2013, p. 371-372).

2.4 PRINCIPAIS CONTAMINANTES PRESENTES NOS FELDSPATOS

No beneficiamento de feldspato, além dos processos de britagem e moagem geralmente envolve flotação e separação magnética para remover os minerais acessórios como a mica (biotita, principalmente), granada, ilmenita e quartzo. Dependendo da aplicação, a presença da sílica (na forma de quartzo) não é problema, no entanto em outras, como o porcelanato técnico, requer um feldspato bastante puro (COELHO; LUZ, 2005, p.420, *apud* SALLER, 1999).

Para concentrados de albita com maior alvura, para porcelanato, esmaltes e vidro, emprega-se a separação magnética para remover os minerais que contém ferro, tais como biotita, granada e turmalina. Nesta operação, vem sendo utilizado separador magnético, a seco, de alto gradiente (Gauss), usando separador de rolos. No caso da presença de minerais de rutilo (TiO_2), a sua remoção só é possível através da flotação.

2.5 FELDSPATO NA INDÚSTRIA CERÂMICA

O feldspato usado na indústria de cerâmica (revestimento de piso e parede, louça sanitária, porcelana elétrica, fritas, vidrado e esmalte), como fluxante, tem a função de formar uma fase vítrea no corpo, promovendo uma vitrificação e transluzimento. Os feldspatos são usados no vidrado vitrificado, como fonte de álcalis



e alumínio. Tanto para vidro quanto cerâmica, o feldspato contribui como fonte de SiO_2 (HARBEN, 1995).

A formulação de qualquer cerâmica tradicional é constituída de dois elementos principais: o material plástico, constituído de caulim e outras argilas, e o material não plástico, sílica, feldspato, dentre outros. O constituinte plástico permite que o corpo cerâmico seja moldado. Enquanto os constituintes não plásticos permitem ao corpo cerâmico sua forma, após a queima (COELHO; LUZ, 2005, p. 421, *apud* MOTTER, 2000).

Segundo esse mesmo autor, na indústria cerâmica, os feldspatos sódicos e potássicos apresentam comportamento diferente, durante a queima. Os feldspatos sódicos são caracterizados por apresentar baixo ponto de fusão (em torno de 1.200°C) e por uma fusão abrupta, bem como retração (*shrinkage*) e fusibilidade dependentes da temperatura. A massa fundida do feldspato sódico tem viscosidade mais baixa, por isso, na indústria cerâmica o feldspato sódico é mais propenso à formação de peças empenadas ou deformadas. Por outro lado, os feldspatos potássicos têm um ponto de fusão mais elevado (cerca de 1.250°C) e seu comportamento cerâmico se dá de forma mais progressiva. A massa fundida proveniente do feldspato potássico apresenta maior viscosidade e dessa forma os limites térmicos de trabalho são relativamente mais amplos.

Segundo panorama realizado pela ANCAFER (2020, p.22), o Brasil é um dos principais “*players*” do mercado mundial de revestimentos cerâmicos. Ocupa a terceira posição em produção e a segunda posição em consumo no mundo, além de ser o sexto no ranking das exportações. Em 2018, foram produzidos 871,9 milhões de m^2 para uma capacidade instalada de 1.161 milhões de m^2 . As vendas no mercado interno atingiram 769,2 milhões de m^2 e 100,5 milhões foram destinados ao mercado externo.

2.6 BENEFICIAMENTO DE FELDSPATO

Em geral, o beneficiamento de feldspatos é feito a partir de pegmatitos ou de granitos pegmatíticos, como no caso do alaskito, em que se tem por objetivo a separação dos minerais constituintes das rochas pegmatíticas, ou seja, o feldspato, a mica, o quartzo, os minerais pesados e os minerais portadores de ferro. As operações unitárias normalmente empregadas são britagem e moagem, separação por tamanho



(peneiramento e classificação) e concentração (gravítica, magnética e flotação) (CHAVES, 2013, p. 375-376, *apud* MANSER, 1973; BRAGA, 1999; SALLER, 1999).

2.6.1 Flotação

Todas as técnicas de separação mineral têm como base uma propriedade física ou química que diferencia as espécies presentes. Como propriedade diferenciadora, a flotação utiliza o grau de hidrofobicidade das partículas. Essa característica está relacionada à afinidade que as partículas apresentam com a água (CHAVES, 2006; OLIVEIRA, 2016).

A flotação consiste na introdução de bolhas de ar em uma fase aquosa com partículas sólidas heterogêneas em suspensão. A separação se dá à medida que as partículas mais hidrofóbicas se aderem às bolhas, formando uma espuma, que será removida do sistema. As partículas mais hidrofílicas, por sua vez, irão interagir com a água (MASSI et al., 2008).

A seletividade do processo de flotação baseia-se no fato de que a superfície de diferentes espécies minerais podem apresentar distintos graus de hidrofobicidade. O conceito de hidrofobicidade de uma partícula está associado à sua umectabilidade ou “molhabilidade” pela água. Partículas mais hidrofóbicas são menos ávidas por água. O conceito oposto à hidrofobicidade é designado como hidrofiliidade (CHAVES, 2013, p. 11).

Os compostos químicos dividem-se entre polares e apolares. A importância da polaridade está no fato de que há afinidade entre substâncias ambas polares ou ambas apolares, não havendo, geralmente, afinidade entre uma substância polar e outra apolar.

Nos sistemas de flotação, a fase líquida é sempre a água, uma espécie polar, e a fase gasosa é quase sempre o ar, constituído basicamente por moléculas apolares. Uma substância hidrofóbica pode agora ser mais bem caracterizada como aquela cuja superfície é essencialmente não polar, tendo maior afinidade com o ar do que com a água. Por outro lado, uma substância hidrofílica é aquela cuja superfície é polar, possuindo maior afinidade com a água do que com o ar.

Entre os minerais encontrados na natureza, muito poucos são naturalmente hidrofóbicos, sendo eles, grafita (C), molibdenita (MoS_2), talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$),



pirofilita ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), alguns carvões (C), e ouro nativo livre de prata (Au). A separação entre partículas naturalmente hidrofóbicas e partículas naturalmente hidrofílicas é teoricamente possível fazendo-se passar um fluxo de ar através de uma suspensão aquosa que contenha as duas espécies. As partículas hidrofóbicas seriam carregadas pelas bolhas de ar e as hidrofílicas permaneceriam em suspensão (CHAVES, A. P. 2013, p.11-12).

O pequeno número de minerais naturalmente hidrofóbicos seria indicativo de uma gama restrita de aplicações da flotação. Sua vastíssima aplicação industrial decorre do fato de que minerais naturalmente hidrofílicos podem ter sua superfície tornada hidrofóbica por meio da adsorção (concentração na interface) de reagentes conhecidos como coletores. Em outras palavras, a propriedade diferenciadora pode ser induzida (CHAVES, A. P. 2013, p.12).

Segundo Tabosa (2007, p.15), a operação de flotação é complexa, envolvendo três fases (sólido, líquido e gás) com muitos subprocessos e interações. O processo de flotação é compreendido por basicamente três mecanismos:

- Colisão e adesão seletiva de partículas a bolhas de ar (flotação “real” – *true flotation*);
- Resistência ao cisalhamento e transferência de partículas à zona de espuma;
- Resistência da unidade bolha-partícula na espuma e transferência ao concentrado.

A adesão de partículas às bolhas de ar é o mecanismo mais importante e é responsável pela maior quantidade de partículas que são reportadas ao concentrado, mecanismo esse denominado flotação “real” (*true flotation*). Embora a flotação “real” seja o mecanismo dominante na recuperação seletiva de partículas minerais, a eficiência de separação entre o mineral de interesse e a ganga é também dependente do grau de resistência da unidade bolha-partícula ao cisalhamento dentro da célula e a resistência dessa unidade na espuma e posterior transferência ao concentrado.

O processo de flotação por espumas é a modalidade mais utilizada na tecnologia mineral para concentração de minerais e apresenta termos técnicos específicos para definir a maneira ou “*modus operandi*” de como a flotação está sendo conduzida. A seguir, algumas definições dos processos mais usuais de flotação (CHAVES; FILHO; BRAGA, 2010, p.469, *apud* BERALDO, 1983).



- Flotação direta: é quando os minerais de interesse são flotados e separados nas espumas. Os minerais de ganga acompanham o fluxo da polpa mineral.
- Flotação reversa: é quando os minerais de ganga são flotados e os minerais de interesse permanecem na polpa mineral.
- Flotação coletiva (*bulk flotation*): é quando um grupo de minerais com características semelhantes são flotados em conjunto.
- Flotação seletiva: é quando uma única espécie mineral é flotada.
- Flotação instantânea (*flash flotation*): é quando a flotação é realizada em intervalos de tempo curto, logo após a moagem. As partículas mistas (não liberadas) retornam ao moinho para uma nova etapa de moagem e, a seguir, são novamente flotadas.

2.6.1.1 Flotação de feldspato no Brasil

A flotação de feldspatos no Brasil, principalmente nas regiões sul e sudeste, tem sido estudada como alternativa para produção de concentrados de melhor qualidade a partir de rochas da região, uma vez que o custo de transporte tem encarecido muito o feldspato originário da região nordeste do país.

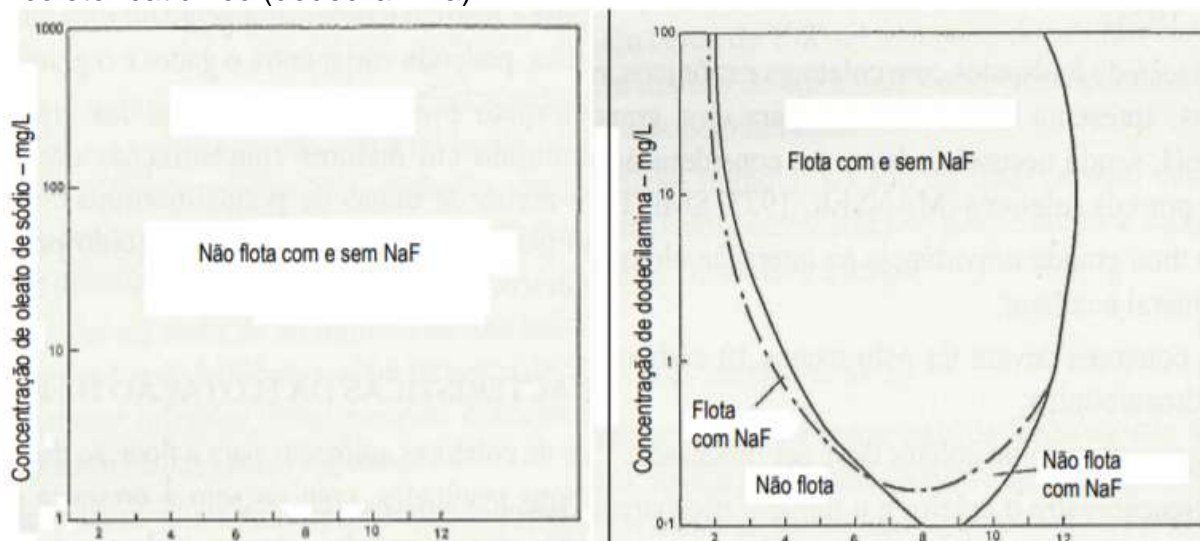
Informações não publicadas, geradas a partir de estudos recentemente realizados, indicam a viabilidade técnica de empreendimentos para a obtenção de concentrados de feldspatos em Minas Gerais, e até mesmo de um empreendimento em atividade em Santa Catarina (CHAVES, A. P. 2013, p.368).

O uso de coletores aniônicos para a flotação de feldspatos não apresenta bons resultados, com ou sem a presença de ativadores (MANSER, 1973).

A flotação de feldspatos com coletores catiônicos, notadamente as aminas, apresenta bons resultados para uma grande faixa de valores de pH.

O diagrama da flotação da albita (feldspato sódico) com coletor aniônico e coletor catiônico mostrado na Figura 1 é típico para a maioria dos feldspatos.

Figura 1: Diagrama da flotação de albita com coletor aniônico (oleato de sódio e coletor catiônico (dodecilamina).



Fonte: King (1982).

O flúor na forma de HF, íon fluoreto ou H_2SiF_6 , tem sido largamente utilizado como agente modificador na flotação de feldspatos, funcionando como ativador na separação feldspatos/quartzo com coletores catiônicos em PH ácido (KING, 1982; BRAGA, 1999).

2.6.2 Separação magnética

Materiais magnéticos, que atuam como magnetos e são capazes de atrair minerais de ferro, são conhecidos desde os primórdios da civilização. No entanto, a prática da separação magnética só foi reconhecida no século XIX (SAMPAIO et al, 2018, p.341, *apud* SVOBODA; FUJITA, 2003).

A separação magnética é uma técnica ambientalmente amigável e pode ser usada tanto a seco como a úmido, viabilizando o seu uso em regiões áridas ou onde há disponibilidade de água. O método a seco é usado, em geral, para minérios de granulometria grossa e o método a úmido para aqueles de granulometrias mais finas. Na história da separação magnética verificam-se avanços em ambos os métodos, sem contar a utilização da tecnologia dos supercondutores, que abriu um novo horizonte na área de processamento de minérios (SAMPAIO et al, 2018, p. 341, *apud* LAWVER ; HOPSTOCK, 1974; MIHALK, 1979; NORRGRAN, 1990; SVOBODA; FUJITA, 2003).



Minerais ferromagnéticos compreendem aqueles que são fortemente atraídos pelo ímã comum. O exemplo mais conhecido é a magnetita. Os paramagnéticos são fracamente atraídos e o exemplo clássico é a hematita. Os minerais diamagnéticos possuem susceptibilidade magnética negativa e, portanto, são repelidos quando submetidos a um campo magnético. Entre outros, se destacam: quartzo, cerussita, magnesita, calcita, barita, fluorita, esfalerita, etc.

O campo de aplicação da separação magnética é muito amplo. É usada na concentração de vários minerais ferrosos e não ferrosos, na remoção de impurezas magnéticas contidas nos minerais industriais, na purificação de águas residuais, na remoção e reciclagem de metais contidos em resíduos industriais, etc. (SAMPAIO et al, 2018, p.342, *apud* SVOBODA; FUJITA, 2003).

O desenvolvimento da separação magnética evoluiu para uma tecnologia que permite separar, desde materiais fortemente magnéticos a fracamente magnéticos, mesmo que sob a forma de partículas finamente dispersas. Isso resultou no desenvolvimento da separação magnética de alta intensidade (*high intensity magnetic separation* – HIMS) e da separação magnética de alto gradiente (*high gradient magnetic separation* – HGMS), que usa eletromagnetos resistentes (baixa condutividade), supercondutores ou magnetos permanentes.

A utilização e aprimoramento dos ímãs, em particular os de terras-raras, resultando na melhoria de suas propriedades magnéticas, contribuiu para inovar na área da tecnologia de separação magnética. Outro desenvolvimento que contribuiu também para inovação tecnológica foi a introdução de matrizes (placas com ranhuras ou metal expandido, malhas, bolas, etc.), no campo magnético dos separadores. Essas matrizes, quando magnetizadas, geram um gradiente magnético local, resultando em maior força magnética que atua sobre a partícula (SAMPAIO et al, 2018, p.342, *apud* SVOBODA; FUJITA, 2003; METSO, 2015).

As diferenças de susceptibilidade magnética dos minerais são exploradas na separação magnética, de maneira que as partículas com elevada susceptibilidade magnética respondem prontamente ao campo magnético. Como o campo magnético influencia na separação magnética dos diferentes minerais, o controle da intensidade de campo magnético permite uma separação seletiva das partículas minerais com diferentes valores de susceptibilidade magnética. Baixas intensidades de campo magnético (abaixo de 5.000 Gauss) são capazes de separar minerais com elevada



susceptibilidade magnética, enquanto altas intensidades (acima de 15.000 Gauss) são necessárias para separar minerais com valores de susceptibilidade magnética baixos. O controle da intensidade do campo pode ser efetuado pelo emprego de eletroímãs, fazendo variar a corrente elétrica (SAMPAIO et al, 2018, p.346, *apud* STEINBERG et al., 2014).

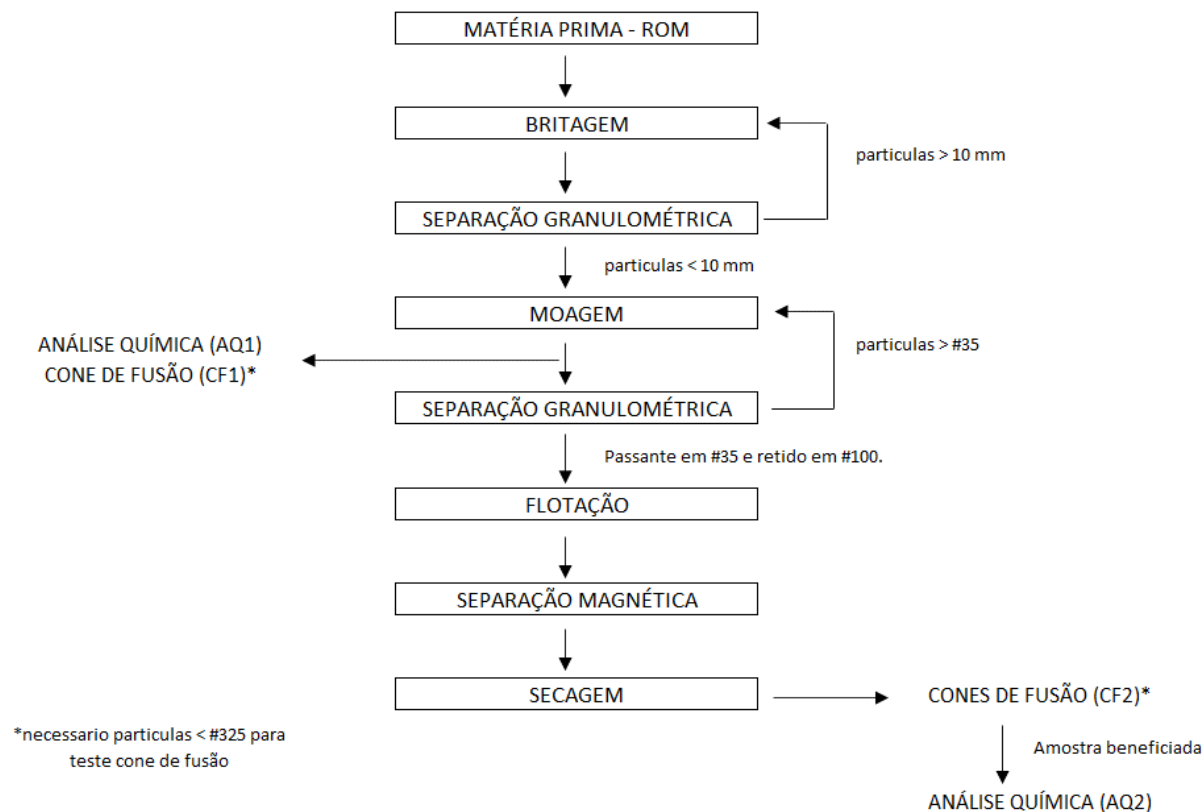
2.6.1.2 Variáveis que afetam o processo de separação magnética

A elaboração detalhada das variáveis operacionais para o processo de separação magnética não é trivial, uma vez que as mesmas estão ligadas ao tipo de separador ou ao próprio método de separação. De um modo geral, não existe um conjunto genérico de variáveis que permita o controle operacional da separação magnética. Por exemplo, as variáveis empregadas no controle da separação magnética a úmido de alta intensidade não são as mesmas que controlam a separação magnética a seco de alta intensidade. Por essas razões, é levado em conta, como principais variáveis da separação magnética, a intensidade do campo magnético e a alimentação de partículas minerais no sistema (SAMPAIO *et al.*, 2018, p.359).

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A Figura 2 apresenta o fluxograma das etapas de processos realizados.

Figura 2: Fluxograma processo de beneficiamento de albita em escala laboratorial.



Fonte: do Autor (2020).

O processo de cominuição, beneficiamento e testes cone de fusão foram realizados no laboratório de beneficiamento do Centro Universitário UniSATC, localizado no município de Criciúma – SC. As análises químicas foram realizadas pelo Laboratório de Cerâmica e Construção Civil do SENAI com sede também no município de Criciúma – SC.

O material proveniente da moagem foi encaminhado para análise química (AQ1) como forma de conhecer a composição química e a presença de possíveis contaminantes na amostra inicial. Uma parte da amostra foi coletada para realização do teste cone de fusão (CF1). Conhecendo-se o resultado da análise química, foi preparado uma amostra (retido em #100 mesh), que foi submetida ao ensaio de flotação reversa e separação magnética.

Após os ensaios de beneficiamento, foi confeccionado o cone de fusão (CF2), com objetivo de se conhecer o resultado em termo de cor de queima e fusibilidade, e por consequência, se a malha apresentou um grau de liberação satisfatório. A partir do resultado do cone de fusão (CF2), realizou-se a segunda análise química (AQ2), referente a amostra beneficiada.



3.1 BRITAGEM

Submeteu-se a amostra do material “in natura” à britagem primária em um britador mandíbula de bancada com abertura na posição aberta (APA) de 2 polegadas (2”) e abertura na posição fechada (APF) de 0,75 polegadas (3/4”).

O material objeto deste estudo entrou no britador com uma granulometria inferior a 1 polegada. Após a britagem, classificou-se o material em uma peneira com abertura de 10 mm, onde o material retido voltou ao britador, enquanto o material passante foi direcionado para próxima etapa da cominuição.

3.2 MOAGEM

O material proveniente do processo de britagem foi submetido à moagem em moinho de jarros com esferas de alumina. O moinho trabalha com alumina para evitar contaminação do processo na amostra.

O minério foi cominuído durante 3 minutos, posteriormente passando por uma separação granulométrica para a obtenção de uma amostra com granulometria passante em #35 mesh e retido em #100 mesh.

3.3 FLOTAÇÃO REVERSA

Foi pesado e separado 1.000 gramas da amostra proveniente do processo de moagem e submetida ao processo de flotação, utilizou-se um flotador de bancada WEMCO modelo FB 001. Anteriormente ao processo de flotação foi realizada a medicação do pH da polpa por meio de papel indicador, obtendo-se, com isso, valor próximo ao de 7 (ph Natural).

Realizou-se a flotação da seguinte forma:

- Adicionou-se 3,5 litros de polpa do minério (28,6% de sólidos) no recipiente do flotador;
- Ligou-se o rotor do flotador para dispersão da polpa durante 60 segundos;
- Adicionou-se a dosagem de reagentes na polpa, sendo 3 ml de “*tall oil*” (3 kg/Tonelada) e 1,5 ml de “*Methyl isobutyl carbinol*” MIBC (1,5 Kg/Tonelada);

- Condicionou-se a polpa junto com os reagentes durante 60 segundos;
- Liberou-se a válvula de ar e foi aplicado ar comprimido (após condicionamento) para início da flotação;
- Durante 2 minutos foi realizado o processo de flotação, retirando o material flotado por transbordo da espuma.
- O material não flotado (deprimido) foi submetido à próxima etapa de beneficiamento (separação magnética) no próprio recipiente do flotador.

Figura 3: Flotador de bancadas utilizado no processo.



Fonte: do Autor (2020)

3.4 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

No material deprimido do processo de flotação foi realizado a separação magnética via úmido, o processo ocorre na polpa em dispersão durante 2 minutos com o auxílio de um ímã de terras raras com intensidade magnética de 10.000 Gauss. Foi realizado o processo até que não houve mais separação magnética visível no ímã, esse processo levou cerca de 3 minutos.

Figura 4: Processo de separação magnética



Fonte: do Autor (2020)

3.5 SECAGEM

A polpa da amostra processada foi colocada em um recipiente para a decantação natural do minério durante 2 horas. Após esse desaguamento realizou-se a secagem das amostras em uma estufa digital com faixa de trabalho de até 200 °C durante 24 horas, para atingir umidade zero.

3.6 CONE DE FUSÃO

Para realizar os cones de fusão foi necessário que o minério fosse cominuído até a malha #325 mesh. Foi realizado da seguinte forma:

- Cominuído a amostra até malha #325 mesh;
- Conformado em um molde cônico com diâmetro da base e altura de 35 mm;
- O cone conformado pelo molde foi sinterizado em forno de sinterização (modelo Timer One VRC) à 1.280°C com taxa de aquecimento de 5 °C/min e patamar de queima de 6 minutos;

3.7 ANÁLISE QUÍMICA



Realizou-se as análises químicas por Fluorescência de Raios X (FRX) em duas amostras, a primeira no material *in natura* após o processo de moagem (AQ1), e a segunda no material beneficiado (AQ2). Com esses resultados foi possível avaliar o desempenho do beneficiamento comparando as análises químicas do material antes e depois do beneficiamento.

3.8 COLORIMETRIA

A Tabela 2 apresenta os resultados das coordenadas colorimétricas.

Tabela 2: Resultados colorimétricos

Amostras	L*	a*	b*
Beneficiado	70,92	0,56	4,71
Não Beneficiado	60,72	2,09	5,14

Fonte: do Autor (2020)

Conforme demonstra na Tabela 2, a amostra beneficiada apresenta um melhor resultado em termos de cor de queima, o valor de L* foi de 70,92 enquanto na amostra não beneficiada foi de 60,72.

3.9 BALANÇO DE MASSAS

A massa da amostra inicial foi de 1.000 g, após o processo de beneficiamento e secagem foi realizado a pesagem da massa, que resultou em 860 g de material beneficiado e 140 g de rejeito gerado pelo processo de flotação e separação magnética. O processo de beneficiamento resultou em uma recuperação de 86% em massa.

Tabela 3: Balanço de massa.

Amostra inicial	100%
Massa de rejeito (flotação e separação magnética)	14%
Massa final do produto beneficiado	86%

Fonte: do Autor (2020)

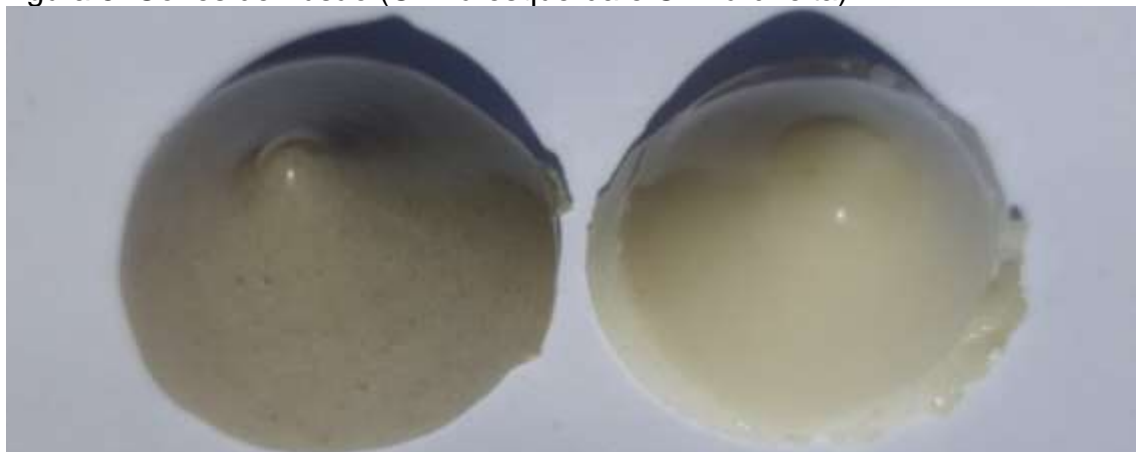
Conforme demonstra a Tabela 3, o produto gerado através do beneficiamento representa 86% em massa da amostra inicial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o processo de beneficiamento, foram realizados testes onde foi definido a dosagem de reagentes e a malha ideal para o processo de flotação, o estudo de artigos relacionados à feldspatos e sistemas de beneficiamento para minerais cerâmicos ajudaram na realização dos testes, definindo assim os parâmetros ideais para a flotação reversa da albita, objeto de estudo desse artigo.

Com os resultados dos cones de fusão, pode-se perceber através de sua cor uma melhora significativa na amostra beneficiada, o cone não beneficiado (CF1) apresentou uma coloração cinza com pequenas pintas escuras (aspectos relacionados à presença de ferro na amostra), já o cone de fusão do mineral beneficiado (CF2) apresentou cor bege claro, representando bem a eliminação dos minerais contaminantes.

Figura 5: Cones de Fusão (CF1 à esquerda e CF2 à direita)



Fonte: do Autor (2020).

A Tabela 4 apresenta os resultados das análises químicas das amostras de albita antes e após o beneficiamento.



Tabela 4: Análises Químicas

Elementos	Albita Bruta (%)	Albita Beneficiada (%)
SiO ₂	66,880	67,200
Al ₂ O ₃	19,670	18,530
Fe ₂ O ₃	0,747	0,256
TiO ₂	0,156	0,110
CaO	0,410	0,510
MgO	0,050	0,060
K ₂ O	0,570	0,600
Na ₂ O	10,360	11,360
P.F.	0,660	0,530

Fonte: do Autor (2020).

Os resultados das análises químicas por Fluorescência de Raios X (FRX) confirmam a análise feita visualmente através do cone de fusão, podendo observar especificamente a redução dos teores dos minerais deletérios presentes na amostra.

Observa-se, principalmente, a redução de Fe₂O₃ e TiO₂. O processo de separação magnética foi o principal responsável pela redução do teor de Fe₂O₃, que teve uma redução de 66% (teor reduzido de 0,747% para 0,256%), já o processo de flotação reversa, foi responsável pela redução do teor de TiO₂ em cerca de 30% (redução do teor de 0,156% para 0,110%).

CONCLUSÕES

O beneficiamento de feldspatos é um processo necessário para a melhoria da qualidade técnica do minério e tem por objetivo a retirada dos minerais deletérios que contém ferro e titânio na estrutura, elementos estes que prejudicam a cor de produtos submetidos ao processo de sinterização, como é o caso do gres porcelanto, esmaltes e vidro plano.

A albita, objeto de estudo deste artigo, apresenta minerais contaminantes em sua estrutura como a biotita e minerais de lítio, sendo necessário processos de beneficiamento para a retirada dos mesmos, através da retirada dos minerais contaminantes, obtem-se a valorização das características tecnológicas do minério, aumentando a gama de aplicações e, por consequência, elevando consideravelmente o valor de venda do produto.



Com a análise visual dos cones de fusão foi possível observar uma melhora significativa na qualidade do minério, principalmente no que se refere a sua cor de queima. Os resultados das análises químicas ratificam a melhoria nas características tecnológicas da albita processada com uma redução significativa dos teores de Fe_2O_3 e TiO_2 . A partir do processo de separação magnética, obteve-se uma redução de 66% no teor de Fe_2O_3 , e através do processo de flotação reversa, uma redução de 30% no teor de TiO_2 .

Com os ganhos de qualidade da albita beneficiada, obtidos através dos processos de separação magnética e flotação, pode-se vislumbrar um aumento de 30% à 35% na margem de contribuição na venda do produto.

REFERÊNCIAS

ANFACER – Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento. **Panorama 2020**. Disponível em: www.anfacer.org.br/brasil. Acesso em: 11 de abril de 2020.

BETEJTIN, A. **Curso de Mineralogia**. Moscou: Editorial Mir, 1970.

BRAGA, P. F. A. **Desenvolvimento de processo para o aproveitamento do feldspato contido em finos de pedra de nefelina sienito**. Dissertação (Mestrado) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

CHAVES, A. P. **A Flotação no Brasil**, 3. ed. rev. E ampl. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. (coleção teoria e pratica do tratamento de minérios; v.4).

CHAVES, A. P. **Separação Densitária**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. (coleção teoria e pratica do tratamento de minérios; v.6).

CHAVES A. P.; FILHO, L. S. L.; BRAGA P. F. A. **Tratamento de Minérios - Flotação** – Rio de Janeiro, CETEM, 5^o ed. 2010, p.462-513.

DANA, J. D. **Manual de Mineralogia**, vol.2, Rio de Janeiro: Editora do Livro Técnico AS. 1970. p.536-556.

HACIFAZLIOGLU, H.; KURSUN, I.; TERZI, M. **Beneficiation of Low-grade Feldspar Ore Using Cyclojet Flotation Cell, Conventional Cell and Magnetic Separator** – Physicochemical Problems of Mineral Processing. Istanbul University. Avcilar, Istanbul. 2011. p.381-392. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5277/ppmp120205>.

HARBEN, P. W. **The Industrial Mineral Handy Book**. A Guide to Markets. Specifications, &Prices, 2. Ed., Editor O. W. HARBEN. 1995. p62-65.



IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração, **Relatório Anual de Atividades**, julho de 2018 – junho de 2019. Disponível em: <http://portaldaminerao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2019/07/relatorio-anual-2018-2019.pdf>.

KING, R. P. **Principles of flotation**. Johannesburg: SAIMM, 1982.

LIRA, H. L.; NEVES, G. A. **Feldspatos; conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção**. Revista eletrônica de materiais e processos, v.8.3, p.110-117. 2013. Disponível em: www.dema.ufcg.edu.br.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas e Minerais Industriais, usos e especificações – CETEM**, 2^o ed rev. e ampl. p. 314-666. 2005.

MANSEER, R. M. **Handbook of silicate flotation**. Stevenage: Warren Spring Laboratory, 1973.

MASSI, L. et al., **Fundamentos e Aplicações da Flotação como Técnica de Separação de Misturas**. Química nova na escola. São Paulo, 2008

MOTA, J. F. M. *et al.* **Raw materials for porcelainized stoneware tiles**. Tile & Brick Int., vol. 18, n.6, 2002, p.358-363.

MOTTER, B. **Feldspar for the sanitaryware industry**. In: **Industrial Minerals**, n.390, March 2000, p.81-87.

RAMOS, J. R. **Balanço Mineral Brasileiro – Feldspato**. Brasília: DNPM, 2001.

SAMPAIO J. A. **Tratamento de Minérios – Separação Magnética e Eletrostática – Rio de Janeiro, CETEM**, 6^o ed. 2018, p.339-379.

SEGEMAR. **Feldspato y Mica**, SEGEMAR-Serviço Geológico Mineiro Argentino, INTEMIN-Instituto de Tecnologia Mineral, IGRM – Instituto de Geologia y Recursos Minerales, Publicación Técnica SEGEMAR – UNSAM n.5, março, 2000 p.91.

TABOSA, E. O. **Flotação com reciclo de concentrados (FRC) para recuperação de finos de minérios: fundamentos e aplicações**. 2007. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

UFRGS. **Plagioclásio – NaAlSi₃O₈ até CaAl₂Si₂O₈**, 2020. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/minmicro/Plagiocl%C3%A1sio.pdf>.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao orientador eng. Guilherme Silva de Souza por todos os ensinamentos passados durante a elaboração deste artigo.



Ao Geólogo Marcio Luiz Geremias, que disponibilizou as amostras do material de estudo e esteve sempre à disposição; e ao Centro Universitário UniSATC, que disponibilizou o laboratório de beneficiamento onde foram realizados os procedimentos experimentais.