

UTILIZAÇÃO DO AMIDO DE MANDIOCA NA FLOTAÇÃO DA FLUORITA

Alexandre Brandão Sartor¹

Guilherme Silva de Souza²

Resumo: A flotação é um processo de separação mineral muito complexo e que envolve muitas variáveis, sendo o seu domínio uma das missões do engenheiro de minas em uma planta de beneficiamento. A escolha dos reagentes representa uma destas variáveis, e alternativas sempre devem ser objeto de pesquisa no sentido de melhorar a eficiência, a flexibilidade e os resultados econômicos deste processo. Este trabalho procurou verificar a viabilidade e o desempenho do uso do amido de mandioca como alternativa ao amido de milho, no processo de beneficiamento de fluorita em uma instalação já existente. Para tanto, foram realizados testes de flotação em flotadores de coluna e de célula de bancada em escala laboratorial, utilizando os mesmos reagentes, concentrações e amostras de minério que são empregados atualmente no processo industrial. Os resultados indicaram a possibilidade do uso do amido de mandioca, apresentando um índice de recuperação da fluorita no concentrado muito semelhante ao amido de milho e com uma economia no custo de aquisição deste insumo.

Palavras-Chave: Fluorita. Flotação. Amido de mandioca. Depressores. Coluna.

1 INTRODUÇÃO

A mineração constitui uma atividade fundamental para a economia de um país. No Brasil, ela foi uma das únicas atividades que não foram afetadas pela pandemia no ano de 2020. Ao contrário, foi observado até um crescimento neste setor, superando todas as expectativas. Aliada às boas práticas de proteção ambiental, a mineração traz emprego, geração de renda e aumento na arrecadação de impostos nas regiões onde é desenvolvida. Regiões estas muitas vezes distantes e carentes de nosso vasto território.

Nosso país é um importante protagonista mundial deste setor, pois detém importantes reservas e é um dos maiores produtores de diversos minerais. Dentre estes, o mineral não-metálico fluorita é um componente indispensável nas indústrias

¹ Graduando em Engenharia de Minas. Ano 2021-2. E-mail: absartor@gmail.com

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

metalúrgica e siderúrgica, para o beneficiamento do aço, e na indústria química, para a fabricação do ácido fluorídrico. Suas principais reservas estão localizadas na Região Sul, nos Estados de Santa Catarina e Paraná.

No presente estudo, será avaliado o desempenho do amido de mandioca como um depressor no processo de flotação da fluorita de uma instalação já existente e em funcionamento, pertencente à Mineração N. Sra. do Carmo, localizada no município de Cerro Azul (PR), que opera já há 15 anos na jazida existente naquela localidade. A motivação para este trabalho vem dos bons resultados que este amido tem apresentando no beneficiamento de diversos minerais, além da maior disponibilidade deste insumo na região. A procura por alternativas de novos tipos de reagentes, que são fundamentais e utilizados diariamente no processo, também constitui um dos objetivos do mesmo.

Uma das estratégias da empresa é investir continuamente na melhoria dos seus processos visando a redução dos custos de produção, mantendo assim, sua competitividade. No beneficiamento mineral, geralmente os valores envolvidos na produção e nos maquinários são muito expressivos, então qualquer pequena otimização obtida resulta em uma economia muito significativa.

Como qualquer bem mineral, a fluorita é um recurso finito, o que implica o dever de quem tem a autorização e os meios para a sua extração, de utilizar as melhores técnicas disponíveis para seu máximo aproveitamento econômico. Também como outros minerais, ela tem seu preço ditado pelo mercado, ressaltando ainda mais a importância da contínua busca por diminuição de custos no seu processamento, tornando esta atividade praticamente a única alternativa para o aumento do lucro dos empreendimentos mineiros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Luz e Lins (2008), a fluorita é um mineral não-metálico, de hábito predominantemente cúbico, possui a fórmula química CaF_2 e sua composição geralmente é de 51% de cálcio e 49% de flúor. Ela é usualmente encontrada na natureza em forma de cristais transparentes a translúcidos, de cores variadas, apresenta clivagem perfeita, traço incolor e brilho vítreo. É o quarto elemento

característico na escala de Mohs, apresentando dureza igual a 4, e possui uma densidade média de 3,18 g/cm³.

2.1 MERCADO

Conforme a publicação de Dalla Costa; Medeiros e Lima (2019), os principais usos comerciais da fluorita estão nos setores de siderurgia, metalurgia, químico e cerâmico. No setor de beneficiamento de metais como o aço, o alumínio, o zinco e o níquel, ela é usada para fluidificar a escória, possibilitando a purificação do metal de interesse. Já no setor químico é a principal fonte de flúor, usada então para fabricar o ácido fluorídrico, sendo este a matéria-prima de diversos outros produtos. No setor cerâmico, ela é usada principalmente na fabricação de vidros opacos e esmaltes.

Cada uma destas aplicações demanda uma especificação de composição química diferente, que basicamente são os teores de fluorita (CaF₂), o mineral útil, e de alguns contaminantes, como a calcita (CaCO₃), o enxofre (S) e sílica (SiO₂). O produto com teor de CaF₂ acima de 97% e baixos teores de calcita e sílica apresenta maior valor econômico, e é especificado comercialmente como grau ácido, que é também aquele com maior procura no mercado mundial. Com teor de CaF₂ entre 60-85% e sílica até 15%, o produto é denominado como grau metalúrgico. Já o produto classificado como grau cerâmico apresenta especificações intermediárias.

China, México, Mongólia e África do Sul são os maiores produtores mundiais de fluorita, atingindo quase 90% do total em 2016, que foi de cerca de 6,4 milhões de toneladas. O Brasil participou com apenas uma pequena parcela deste montante, produzindo cerca de 18 mil toneladas no mesmo ano.

Apesar da pouca expressão na produção mineral brasileira, a fluorita é um componente essencial para os setores descritos acima, não existindo, atualmente, outros minerais que possam substituí-la economicamente nestas aplicações. É considerado, portanto, um mineral estratégico não só pelo Brasil, mas por diversos países industrializados.

2.2 GEOLOGIA

No trabalho de Andreazzini (2005), é descrito a jazida que é explorada pela empresa objeto deste estudo, denominada Mato Preto. Ela fica localizada a 25 km do centro do município de Cerro Azul (PR), na região do Vale do Ribeira, distante cerca de 120 km a nordeste da capital Curitiba. A tonelagem medida é de cerca de 2,65 Mt e apresenta teor de CaF_2 de 60%. Os corpos de minérios têm direção $\text{N}50^\circ\text{-}60^\circ\text{E}$ e se encontram na elevação topográfica 400-535 m.

Já Fujimura et. al. (1988) relatam que o minério está associado a carbonatitos e fenitos potássicos, e sua gênese foi através de substituição hidrotermal e preenchimento de fraturas em zonas de falha. Foram identificadas quatro lentes que somam pelo menos 250m de comprimento e 80m de espessura, que estão encaixadas no carbonatito e intercaladas por diques de fonolito e tinguaitos. Estes diques estão argilizados em função da alteração hidrotermal. Outros minerais associados são a barita, apatita, óxido de ferro e sílica.

2.3 BENEFICIAMENTO

Chaves (2002) esclarece que o beneficiamento consiste na terceira atividade principal no aproveitamento de um bem mineral. A primeira é a descoberta do mesmo no solo ou subsolo, que corresponde às atividades de prospecção, avaliação e planejamento. E a segunda é a operação de lavra, que é a etapa de retirar o minério do solo ou subsolo, e transportá-lo até a instalação de beneficiamento.

Como visto na seção anterior, raramente a substância de interesse encontra-se isolada na natureza. Na grande maioria das vezes, elas estão associadas a minerais que não têm interesse econômico, denominados de *gangas*. O material proveniente da lavra é denominado de *ROM (run-of-mine)*. Ele é alimentado no início do processo de beneficiamento e, após passar por todas as várias operações unitárias, resulta em um concentrado, que é o produto final contendo um alto teor do minério útil, e um rejeito, que é composto na sua maior parte por ganga.

O tratamento de um bem mineral envolve a redução de tamanho, a retirada de contaminantes e a diminuição da umidade a ponto de se obter um produto que possa ser utilizado nas mais diversas indústrias consumidoras, algumas mais

exigentes que requerem muitas especificações físico-químicas, outras mais simples, onde tão somente é exigida uma adequação na granulometria.

As operações são executadas conforme uma linha de produção contínua, muitas vezes operada em turnos sem interrupções todos os dias do ano, e deve ser planejada utilizando uma sequência otimizada, estabelecida num fluxograma, como em qualquer processo industrial. Este roteiro de beneficiamento é determinado para cada minério, de acordo com as características mineralógicas de cada jazida, e também da especificação necessária a ser atendida pelo produto final.

2.4 RECUPERAÇÃO EM MASSA E METALÚRGICA

Chaves (2002) também ressalta que, entre vários parâmetros que podem ser medidos ao longo do processo, dois índices operacionais são considerados os mais importantes para avaliar o desempenho da planta de beneficiamento:

- a recuperação em massa, que é a razão entre a quantidade de concentrado/produto que sai após a etapa de separação sólido-líquido, e a quantidade de material ROM que é alimentada no início da britagem;
- a recuperação metalúrgica, que é a razão entre a quantidade do minério útil que entra no início da britagem, e o que está contido no concentrado/produto, após a etapa de separação sólido-líquido.

Na prática, observa-se que não é possível obter alta recuperação em massa e uma alta recuperação metalúrgica simultaneamente. Cabe ao responsável pela operação da planta encontrar o ponto ótimo em que se consiga um concentrado dentro das especificações com a maior recuperação mássica.

2.5 FLOTAÇÃO

Luz; Sampaio e França (2010) explicam que, após a obtenção da polpa contendo o minério liberado, é necessário proceder a separação deste minério e a ganga. Esta etapa é denominada de concentração. Isso se faz aproveitando-se as propriedades diferenciadoras específicas de cada material, como cor, densidade,

suscetibilidade magnética, hidrofobia, as quais possibilitam que ocorra a citada separação e resultam, assim, na obtenção de um produto dentro das especificações exigidas. O maior objetivo é a obtenção de um concentrado com o menor teor possível de material indesejado, e de um rejeito que tenha o menor teor possível de mineral útil.

Há diversos métodos de concentração existentes, cada qual adequado para as características de cada minério e de sua jazida. Na mineração do caso-base, somente o método de flotação é utilizado na etapa de concentração. Isto devido ao fato de que a flotação é adequada quando não há muita diferença de densidade entre o minério e a ganga, e quando a granulometria de liberação é pequena, justamente o que ocorre na empresa N. Sra. do Carmo.

Ela é um processo de separação feita numa suspensão em água condicionadas em tanques, chamadas células. A polpa é alimentada e entra em contato com bolhas de ar, e a substância que não possui afinidade com a água é arrastada por estas bolhas, formando uma espuma na superfície da célula. A substância que possui maior afinidade com a água decanta, e assim é possível a separação.

Normalmente, a técnica de flotação é empregada utilizando-se várias células agrupadas, cada qual regulada para atingir, no final do circuito, o máximo de recuperação. São as células tipo *rougher*, que recebem a polpa vinda da cominuição, as células *cleaner*, que priorizam a recuperação metalúrgica, e as células *scavenger* que tentam recuperar o máximo de teor do mineral útil antes do material ser descartado.

Uma outra característica importante da flotação é o uso de reagentes para melhorar o desempenho da separação. São coletores, depressores, espumantes que devem ser adicionados ao processo e controlados de acordo com o minério alimentado. Estes reagentes devem passar por uma etapa de condicionamento, antes de iniciar a flotação propriamente dita, onde será fornecido tempo para que as partículas minerais tenham alta probabilidade de entrar em contato com os reagentes. O controle do pH nesta etapa é muito importante, pois algumas reações químicas entre o minério, ganga e os reagentes só ocorrem se a polpa está mais alcalina ou mais básica, dependendo do caso.

2.6 DEPRESSORES

Hadzeriga e Giannini (1988) apresentam que os depressores são a classe de reagentes que têm como objetivo evitar a ação dos coletores, ou seja, ele adere às partículas do mineral que se deseja que afunde na célula de flotação, melhorando substancialmente o desempenho do processo. Basicamente, eles eliminam a flotabilidade de um mineral.

Os amidos são comumente utilizados na indústria mineral no beneficiamento de minérios como depressores devido a sua extensa disponibilidade em quase todas as regiões do mundo, o que também resulta no baixo custo, e por não apresentarem problemas com poluição, pois são biodegradáveis. Estes fatores o indicam como uma primeira escolha na definição dos reagentes para um determinado processo de flotação.

A molécula de amido é composta por duas frações distintas: a amilose, composta por cadeias mais lineares e a amilopectina, composta por cadeias ramificadas. De acordo com o cereal, raiz ou tubérculo de onde é obtido, como milho, batata, mandioca, arroz, trigo, a composição varia entre 22 a 26% de amilose, e 74 a 76% de amilopectina. Na célula de flotação, estas moléculas aderem-se à partícula, recobrando sua superfície, tornando-as molháveis, e provocando a sua decantação.

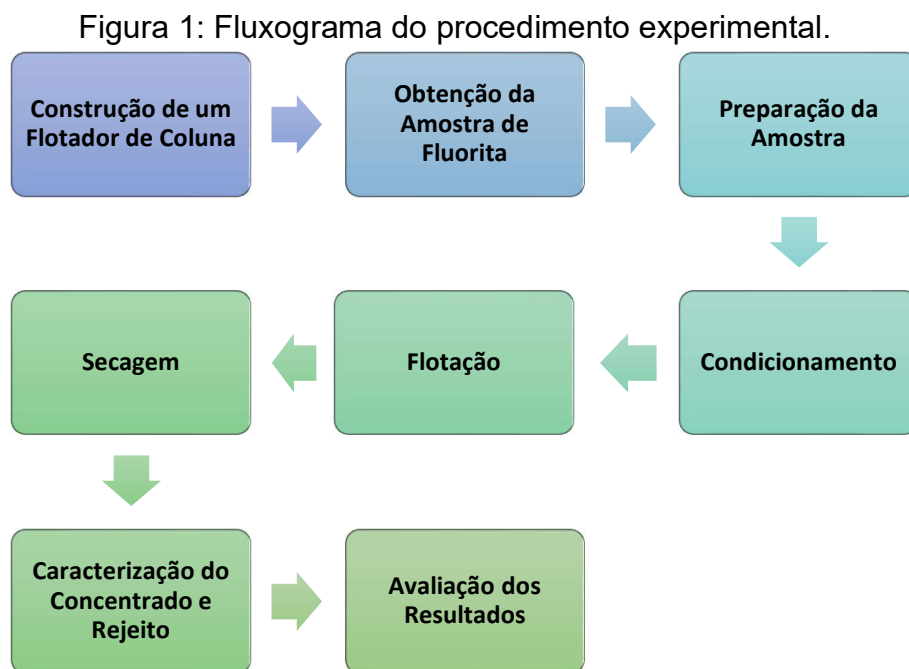
Bulatovic (2014) explica que os amidos são usados na flotação da fluorita para a separação de diversos minerais de ganga, como sílica, calcita, barita, e óxidos de ferro. Além dos amidos, uma combinação com os também depressores silicato de sódio e quebracho melhoram o resultado da flotação.

Rocha et. al. (2019) avaliaram o desempenho do amido de mandioca como depressor no beneficiamento de um rejeito de minério de ferro, e o mesmo apresentou recuperação metalúrgica superior ao de milho.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental realizado para avaliar o desempenho do amido de mandioca na flotação da fluorita está representado na Fig. 1 na página seguinte. As etapas de construção do flotador, preparação da amostra, condicionamento, flotação e secagem foram realizadas no laboratório da UniSATC. A

caracterização inicial da amostra, do concentrado e do rejeito foram realizadas no laboratório da empresa.



Fonte: Do autor (2021)

Foram feitos oito testes com a mesma amostra, resumidos no Qd. 1 abaixo. No primeiro, foi utilizado o amido de milho, como acontece atualmente na empresa, para servir como caso-base. No segundo, terceiro e quarto testes, foram variadas as concentrações do amido de mandioca, mantendo os outros parâmetros. No quinto e no sexto teste, foram variadas as granulometrias da amostra. Por fim, no sétimo e no oitavo teste, foi analisada a flotação em um flotador de célula de bancada.

Quadro 1: Testes de flotação.

Testes	Flotador	Depressor	Concentração	% sólidos	Granulometria	
1	Mi455col	Coluna	Milho	455 g/t	20%-10%	da amostra
2	Ma355col	Coluna	Mandioca	355 g/t	20%-10%	da amostra
3	Ma455col	Coluna	Mandioca	455 g/t	20%-10%	da amostra
4	Ma555col	Coluna	Mandioca	555 g/t	20%-10%	da amostra
5	Ma455col-200	Coluna	Mandioca	455 g/t	60%-40%	passante #200
6	Ma455col-100	Coluna	Mandioca	455 g/t	60%-40%	passante #100
7	Ma455cel	Célula	Mandioca	455 g/t	60%-40%	da amostra
8	Mi455cel	Célula	Milho	455 g/t	60%-40%	da amostra

Fonte: Do autor (2021)

3.1 CONSTRUÇÃO DE UM FLOTADOR DE COLUNA

Para a execução dos testes, foi construída e montada no laboratório de beneficiamento de minérios da UniSATC uma célula de flotação de coluna em escala laboratorial, ilustrada na Fig. 2 abaixo. Equipamento semelhante a este existe em escala industrial na planta de beneficiamento da Mineração N. Sra. do Carmo.

Figura 2: Flotador de coluna construído.



Fonte: Do autor (2021)

Ele consiste em um tubo transparente de 64 mm de diâmetro interno, 3 mm de espessura e 2 m de altura, o que possibilita a total visualização do processo de flotação no seu interior. Há também três reservatórios feitos de bombonas de material plástico conectados ao mesmo: o de polpa, o de concentrado, e o de rejeito. O reservatório de polpa é fixo à parede em uma altura de cerca de 2,5 m em relação ao piso do laboratório, e é conectado a 1,33 m de altura em relação à base do tubo.

A alimentação da polpa e a vazão do rejeito são controladas através de registros de esfera. Para a formação de bolhas, foram utilizados uma pedra porosa fixada na porção inferior da coluna e ar comprimido, com a vazão de ar controlada por um fluxômetro. O material flotado transborda na parte superior do tubo, é coletado em uma bandeja e segue por gravidade para o reservatório de concentrado. Já o rejeito, o que não foi flotado pelo processo, é coletado no reservatório na parte inferior.

3.2 OBTENÇÃO E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

A amostra foi obtida junto à empresa em forma de polpa, retirada logo antes de entrar na etapa de condicionamento. O material é 100% passante na malha 60 *mesh*, possui um teor médio de 31% de CaF₂, e apresenta 60% de concentração de sólidos, números obtidos segundo as análises que são feitas diariamente na produção.

Ao iniciar o processo de preparação da amostra, foi identificado que a mesma sedimentou e não foi possível mais retornar ao seu estado de polpa. Assim, foi optado por secar a amostra e retornar para a condição de polpa somente na etapa de condicionamento. Para tanto, a mesma foi drenada e seca a 110 °C por 2 horas em uma estufa CienlaB CE-220/81-IE.

Após retirada a umidade, a amostra foi quarteada em um quarteador do tipo Jones até que se totalizasse a quantidade de 30 kg de material seco, que foi a quantidade estimada para a realização de todos os testes. O equipamento utilizado para a pesagem foi uma balança digital Marte AD2000.

Para os testes **Ma455col-200** e **Ma455col-100**, conforme detalhado anteriormente no Qd. 1, foi utilizado a célula de coluna e amido de mandioca, e a amostra foi previamente peneirada nas granulometrias 100% passante em 200 e 100 *mesh*, respectivamente.

3.3 CONDICIONAMENTO E FLOTAÇÃO

Sempre quando foi possível, os parâmetros da flotação e do condicionamento foram definidos procurando-se manter a equivalência com o processo industrial da empresa, variando-se somente o tipo de amido utilizado.

Todos os testes foram realizados em temperatura ambiente, somente em uma etapa de flotação e usando a água tratada pela concessionária local, que é a Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN). O pH da polpa foi controlado em cada etapa do condicionamento e mantido entre 9,5 e 10,0, através da adição de soda cáustica (5% p/v). No flotador de coluna, a vazão do ar para geração de bolhas foi de 5 l/min e a vazão de alimentação da polpa foi de 6 l/min. O condicionamento foi realizado num flotador de célula de bancada Wemco FB 001 a 600 rpm.

Após um teste preliminar utilizando a concentração de 60% de sólidos no condicionamento e 40% na polpa, como acontece atualmente na empresa, observou-se que o material apresentou rápida sedimentação no flotador de coluna e gerou entupimentos, impossibilitando a realização do procedimento com estes parâmetros. Assim, baseando-se no estudo de Brum (2004), optou-se por reduzir para 20% o percentual de sólidos no condicionamento e 10% na flotação nos testes **Mi455col**, **Ma355col**, **Ma455col**, **Ma555col**. Para estes testes, houve também a necessidade de adicionar um espumante no processo para ocorrer a flotação na coluna.

O procedimento executado para os testes realizados no flotador de coluna, seguiu as etapas descritas a seguir:

- iniciar o condicionamento no flotador de célula de bancada, adicionando a amostra de minério e mais a quantidade correspondente de água de acordo com o percentual de sólidos do teste para a etapa de condicionamento;
- adicionar o depressor silicato de sódio (440 g/t), manter por 5 minutos;
- adicionar o depressor amido na concentração correspondente ao teste, manter por 10 minutos;
- adicionar o depressor quebracho (320 g/t), manter por 5 minutos;
- adicionar o coletor *tall oil* (300 g/t), manter por 5 minutos;
- para os testes **Mi455col**, **Ma355col**, **Ma455col**, **Ma555col**, adicionar o espumante Metilisobutilcarbinol (MIBC) (440 g/t), manter por 3 minutos;
- adicionar a quantidade correspondente de água de acordo com o percentual de sólidos do teste para a etapa de flotação;
- alimentar a polpa condicionada no reservatório do flotador de coluna;

- para os testes **Mi455col**, **Ma355col**, **Ma455col**, **Ma555col** ligar a entrada de ar e regular para 6 l/min no fluxômetro, o que corresponde a uma velocidade superficial de 3,1 cm/s na coluna. Para os testes **Ma455col-200** e **Ma455col-100** a velocidade do ar é 3 l/min o que corresponde a 1,55 cm/s na coluna.

- iniciar a flotação, abrindo totalmente o registro para a alimentação da polpa, o que para este equipamento equivale a 5 l/min ou uma velocidade superficial de 2,6 cm/s,

- ao mesmo tempo, abrir levemente o registro de material afundado, em uma vazão aproximada de 2,5 l/min (velocidade superficial de 1,3 cm/s), de modo a manter o nível constante da interface polpa-espuma. Manter a polpa sempre em agitação;

- flotar até não haver mais espuma na parte superior do tubo, recolher o material flotado no respectivo reservatório;

- abrir totalmente o registro da parte inferior e recolher o material afundado no respectivo reservatório;

- lavar todo o equipamento com água corrente.

Já o procedimento executado para os testes **Ma455cel** e **Mi455cel**, realizados no flotador de célula de bancada, seguiu as etapas descritas a seguir:

- iniciar o condicionamento, adicionando no reservatório do flotador Wemco 1.000g da amostra de minério e mais 0,66 litros de água, formando a polpa com 60% de sólidos;

- adicionar o depressor silicato de sódio (440 g/t), manter por 5 minutos;

- adicionar amido correspondente (455 g/t), manter por 10 minutos;

- adicionar o depressor quebracho (320 g/t), manter por 5 minutos;

- adicionar o coletor *tall oil* (300 g/t), manter por 5 minutos;

- adicionar 1,84 litros de água para diluir a polpa para 40% de sólidos;

- iniciar a flotação e manter por 3 minutos. Recolher o material flotado na bandeja;

- recolher o material afundado no reservatório;

- lavar todo o equipamento com água corrente.

3.4 SECAGEM E CARACTERIZAÇÃO DO CONCENTRADO E AFUNDADO

O concentrado e o rejeito resultantes dos testes foram colocados em recipientes e secados na estufa, com temperatura de 110°C durante duas horas. Após a secagem, eles foram devidamente identificados de acordo com o respectivo teste e acondicionados em embalagens adequadas.

Tanto o concentrado como o material afundado foram encaminhados novamente para a empresa e caracterizados no laboratório existente, seguindo o mesmo método utilizado para o controle da produção no local. Um total de dezesseis amostras foram analisadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como observado na Fig. 3 abaixo, pode-se visualmente observar que, em todos os testes, o concentrado é de granulometria mais fina do que o afundado. Além disso, como o material sedimentou muito rapidamente e os testes geraram muito mais material afundado do que flotado, constata-se que a amostra possui granulometria grosseira. Esta rápida sedimentação limitou o uso do equipamento para avaliar a recuperação mássica nos testes, então buscou-se avaliar somente a recuperação do teor da fluorita nos concentrados.

Figura 3: Afundado (à esquerda) e flotado (à direita).



Fonte: Do autor (2021)

4.1 RESULTADO E AVALIAÇÃO DOS TESTES

As análises recebidas pela empresa de todos os rejeitos e concentrados encontram-se resumidas no Qd. 2 abaixo. De uma maneira geral, eles indicaram que o desempenho do amido de mandioca foi semelhante ao amido de milho.

Quadro 2: Testes de flotação.

Testes		CaF ₂	PF	SiO ₂	CaCO ₃	R ₂ O ₃
Mi455col	Rejeito	36,55	4,70	32,08	4,32	22,35
	Concentrado	69,55	2,54	12,81	3,48	11,62
Ma355col	Rejeito	32,42	4,89	37,08	3,76	21,85
	Concentrado	58,78	3,42	18,67	3,32	15,81
Ma455col	Rejeito	34,59	4,92	33,25	4,03	23,21
	Concentrado	34,48	5,33	33,36	3,62	23,21
Ma555col	Rejeito	29,81	4,68	38,04	3,24	24,23
	Concentrado	68,45	2,95	12,21	4,01	12,38
Ma455col-200	Rejeito	39,44	4,55	28,74	2,61	24,66
	Concentrado	88,85	1,81	2,38	1,54	5,42
Ma455col-100	Rejeito	32,22	4,76	34,13	2,92	25,97
	Concentrado	81,61	2,25	6,37	2,08	7,69
Ma455cel	Rejeito	36,50	4,67	34,38	3,47	20,98
	Concentrado	84,10	2,55	4,33	2,83	6,19
Mi455cel	Rejeito	35,33	4,14	32,83	3,32	24,38
	Concentrado	87,31	1,68	3,24	1,82	5,95

Fonte: Do autor (2021)

O teste **Mi455col** procurou representar a situação atual no processo da empresa, onde é utilizado o amido de milho como depressor na etapa *rougher* de flotação, em célula de coluna. O resultado no flotador do laboratório foi menor, cerca de 69,55% de CaF₂ no concentrado, enquanto na empresa já se atinge 75-80% nesta etapa.

No teste **Ma355col**, onde a concentração do amido de mandioca foi cerca de 22% menor que a do caso-base, houve uma redução de cerca de 15% no teor de fluorita no concentrado, e aumento do teor dos principais contaminantes (SiO₂, CaCO₃ e o restante dos óxidos R₂O₃) fato este indesejável no processo de beneficiamento.

Já no teste **Ma455col**, a concentração do amido de mandioca foi a mesma do amido de milho no caso-base, e os resultados indicaram que os teores no

concentrado foram muito menores, indicando um possível problema na realização deste teste.

Com o aumento da concentração do amido de mandioca no teste **Ma555col** para 555 g/t, 22% maior que a do amido de milho no teste **Mi455col**, observou-se um resultado no teor de fluorita do concentrado praticamente igual, e decréscimo do mesmo no material afundado. Isso indica que houve um aumento na seletividade das partículas de ganga devido ao aumento na concentração do depressor na etapa de condicionamento, aumentando também a eficiência do coletor em ressaltar a hidrofobicidade das partículas de minério.

Uma foto mostrando a zona de limpeza, a interface polpa-espuma e o coletor de espuma no flotor de coluna está na Fig. 4 abaixo.

Figura 4: Flotação no flotor de coluna.



Fonte: Do autor (2021)

Nos testes **Ma455col-200** e **Ma455col-100** buscou-se avaliar a variável granulometria do minério no desempenho na flotação em coluna. Assim, foi utilizada a fração 100% passante em 200 *mesh* e 100% passante em 100 *mesh*, respectivamente, e ambas apresentaram um desempenho muito superior ao caso-base, com a mesma concentração do amido de mandioca. Os valores do teor de CaF_2 no concentrado foram cerca de 28% e 17% maiores. Conseqüentemente, houve

também a redução dos contaminantes, sendo o teste **Ma455col-200** o que apresentou os melhores resultados entre todos os realizados. Luz; Sampaio e França (2010) evidenciam que este processo é, por padrão, indicado para granulometrias finas e ultrafinas. A menor granulometria dos testes possibilitou também o uso de um percentual de sólidos maior no condicionamento e flotação, de 60% e 40%, conforme é utilizado na empresa.

Foi também estudado o comportamento da flotação em um flotador de célula de bancada nos testes **Ma455cel** e **Mi455cel**. Devido à característica deste flotador, o problema de sedimentação não foi preponderante para o andamento do teste, pois o condicionamento e flotação estavam sempre sob agitação e a polpa não precisou ser transportada através de tubulações e conexões. Conforme os dois testes anteriores, também foram utilizadas concentrações de 60% e 40% de sólidos nos processos de condicionamento e flotação. Os resultados destes testes, onde variou-se somente o tipo de amido, foram muito semelhantes.

Uma foto mostrando o flotador de célula de bancada já na etapa de flotação está na Fig. 5 abaixo.

Figura 5: Flotação na célula de bancada.



Fonte: Do autor (2021)

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA

Brum (2004), também estudou o mesmo minério da mesma empresa em flotações em célula de coluna, analisando diversas variáveis, e obteve os resultados expostos no Qd. 3 abaixo, para flotação com 10% de sólidos, granulometria normal do processo e concentrações próximas ao dos testes deste trabalho.

Quadro 3: Resultados dos testes de flotação no trabalho de Brum (2004).

Flotador	CaF ₂	SiO ₂	CaCO ₃
Célula bancada	75-83%	4,8-5,2%	2,5-4,5%
Coluna	84-88%	2,1-3,1%	2,8-3,6%

Fonte: Do autor (2021)

Comparando-se os resultados dos Qd. 2 e 3, percebe-se que o trabalho de Brum (2004) conseguiu melhores resultados nos testes de flotação de coluna, quando comparados aos testes **Mi455col**, **Ma355col**, **Ma455col** e **Ma555col**, obtendo maiores teores de fluorita no concentrado e menores contaminantes. Já nos testes **Ma455col-200** e **Ma455col-100** em que foram reduzidas as granulometrias, e os testes **Ma455cel** e **Mi455cel** que foram feitos em flotador de célula de bancada, os valores resultantes são melhores nos testes realizados na UniSATC.

Uma outra análise pode ser feita, considerando a especificação de um dos produtos da Mineração N. Sra. do Carmo, denominado F60B, o qual tem a especificação informada no Qd. 4 abaixo:

Quadro 4: Especificações do produto F60B.

CaF ₂	PF	SiO ₂	CaCO ₃	R ₂ O ₃
90,0%	2,5%	4,0%	2,5%	1,0%

Fonte: Do autor (2021)

O teste **Ma455col-200** apresentou resultados muito próximos a estas especificações, somente utilizando uma etapa de flotação.

4.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA PRELIMINAR

Com os resultados positivos nos testes utilizando o amido de mandioca, principalmente nos testes de flotação de célula de bancada em que o seu desempenho

foi muito semelhante ao amido de milho, prosseguiu-se com uma avaliação econômica preliminar para mensurar a economia na aquisição deste insumo pela empresa. Salienta-se, entretanto, que uma verificação final através de um teste industrial deve ser realizada, para avaliação do desempenho do amido de mandioca na planta de beneficiamento instalada na empresa.

O Paraná é o segundo Estado que mais produz mandioca no Brasil, atrás apenas do Pará, evidenciando a grande disponibilidade deste insumo para a empresa na região. Os preços dos amidos de milho e mandioca atualmente são R\$ 10,80/kg e R\$ 10,00/kg, respectivamente.

No processo atual da Mineração N. Sra. do Carmo, 12 t/h de minério são submetidos ao processo de flotação, durante 24 horas por dia, totalizando 8.640 t/mês. Utilizando a concentração de 455 g/t de amido, precisamos de 3.931 kg/mês, assim temos o custo mensal de R\$ 42.456,96 usando milho e R\$ 39.312,00 usando mandioca. A economia anual seria R\$ 37.739,52.

4.4 PROJETOS FUTUROS E MELHORIAS

Ressalta-se aqui, que estes foram os primeiros testes que foram realizados no equipamento construído. Há a necessidade de se conhecer melhor o processo, e realizar um número maior de testes, incluindo com outras amostras de minérios, e sempre comparando com os testes em escala industrial, até que se possa ter resultados mais precisos.

O parâmetro que merece atenção especial no seu controle é a granulometria do minério a ser flotado. Materiais muito grossos não produzem bons resultados devido à velocidade de sedimentação. A utilização de uma bomba para fazer recircular o rejeito e transformar o processo em um circuito fechado e a adição de água de lavagem no topo da coluna também torna o equipamento mais próximo à condição real, permitindo inclusive a realização de um balanço de massa adequado.

É necessário também realizar uma análise química para verificar os teores de fluorita e ganga na amostra inicial, para obter um importante parâmetro de controle do processo de flotação, a recuperação metalúrgica. A informação de que o teor é 31% é uma média que é utilizada no processo industrial da empresa, e foi a considerada neste trabalho para avaliar o desempenho dos testes.

Sugere-se também a utilização de outros tipos de amidos e outras combinações de reagentes, sempre com o objetivo de redução de custos e aumento de teores no concentrado. Da mesma forma, deve-se estudar realizar os testes em duas ou mais etapas, utilizando tanto o flotador de coluna como o convencional, como ocorre nos circuitos clássicos de beneficiamento com flotação. Espera-se assim, um aumento no teor no concentrado final.

Com relação a melhorias no equipamento, uma sugestão é adicionar uma base cônica no fundo dos reservatórios de polpa e na bandeja de captura de espuma do flotado, para melhorar o escoamento e evitar o acúmulo de material sedimentado. A segunda sugestão é adicionar um equipamento motorizado para realizar o condicionamento diretamente no reservatório de polpa, evitando o transporte de polpa de um lugar para outro, e também evitando a sedimentação no momento do teste.

Deve-se também estudar se a pedra porosa instalada no equipamento está produzindo bolhas na quantidade e no tamanho requeridos pelo processo, também uma variável muito importante na flotação de bens minerais. Além disso, outro fator que pode influenciar na formação de bolhas é a água utilizada no processo. A empresa capta a água para seu processo de um rio local, a qual não é tratada por concessionária como a utilizada nos testes deste trabalho.

5 CONCLUSÕES

A demanda por alimentos vai crescer muito nos próximos anos, e os amidos utilizados na mineração são apenas o mercado secundário para os mesmos. Os testes com amido de mandioca mostraram para a empresa que ele pode ser usado quase sem nenhuma alteração nos procedimentos em seu processo industrial, diante de um cenário de uma possível falta ou aumento no custo de aquisição do amido de milho.

Além disso, os testes indicaram que, com os preços atuais, há a possibilidade de uma economia na compra deste amido, em relação ao de milho. Neste caso, mais importante que o aspecto financeiro é o conhecimento que existe a possibilidade de uso de mais de um tipo de insumo no processo, promovendo a flexibilidade do processo quando necessária.

O teste que mostrou melhor desempenho foi o **Ma455col-200**, realizado numa granulometria 100% passante em 200 *mesh*, onde o teor de fluorita no

concentrado aumentou 28% em relação ao caso-base. Ainda, este teste apresentou resultado muito próximo das especificações de um dos produtos da empresa, utilizando somente uma etapa de flotação.

Testes no flotador de célula de bancada também apresentaram resultados significativos mesmo sem peneiramento da amostra, aumentando 21% o teor de concentrado de fluorita no caso do amido de mandioca, evidenciando a necessidade de se avaliar a utilização da célula de flotação tradicional na etapa *rougher*.

Uma última observação é que os teores de fluorita nos rejeitos de todos os testes ainda estão muito elevados, maiores que 30%, indicando a necessidade de mais etapas de flotação para um melhor aproveitamento.

REFERÊNCIAS

ANDREAZZINI, M. J. **Geoquímica do Flúor em Águas e Sedimentos Fluviais da Região de Cerro Azul, Estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Pós-Graduação em Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2005. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/287186/1/Andreazzini_MariaJimena_M.pdf. Acesso em 15 abr. 2021.

BRUM, I. A. S. **Concentração de Partículas Minerai s Grossas de Fluorita em Coluna de Flotação**. Tese (Doutorado em Engenharia) – PPGEM/UFRGS. Porto Alegre (RS), 2004. 119p.

BULATOVIC, S. M. **Handbook of Flotation Reagents**. 1ª Edição. Amsterdam: Editora Elsevier, 2014, v. 3.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. 2ª Edição. São Paulo: Editora Signus, 2002, v. 1.

DALLA COSTA, M. M. (Coord.); MEDEIROS, K. A. (Coord.), LIMA, T. M. (Coord.). **Sumário Mineral**. Brasília: ANM, 2019. 201p.

FUJIMURA, F. et al. **Projeto Fluorita Mineração Del Rey**. In: XIII ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA. São Paulo: APEMI/ABM, 1988, v. 1, p. 547-565.

HADZERIGA, P.; GIANNINI, R. **Amidos como Reagente na Indústria Mineral – Pequena Revisão**. In: XIII ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E HIDROMETALURGIA. São Paulo: APEMI/ABM, 1988.

LUZ, A. B. (Ed.); SAMPAIO, J. A. (Ed.), FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965p.

LUZ, A. B. (Ed.); LINS, F. A. F. (Ed.). **Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações**. 2ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990p.

ROCHA, G. M. et. al. **Caracterização Tecnológica e Avaliação de Depressores na Flotação de Rejeito de Minério de Ferro**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo: ABM, 2019, v. 16, n. 1, p. 68-74.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer de modo especial aos professores Guilherme de Souza e André Smaniotto, que orientaram na parte técnica da flotação e à professora Pâmela Milak que auxiliou na formatação e elaboração de toda documentação envolvendo o projeto. Também ao apoio do pessoal da Min. N. Sra. do Carmo, ao colega Olvacir Spricigo, que ajudou na realização dos testes e ao pessoal de manutenção da UniSATC, que sempre foi muito prestativo na montagem do equipamento.