



CEFET-MG

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

UNIDADE ARAXÁ

ENGENHARIA DE MINAS

MARIA LUIZA CAMARGOS FARIA

**ESTUDO DE UM MÉTODO ALTERNATIVO DE GELATINIZAÇÃO DE
AMIDO NA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO FOSFÁTICO**

ARAXÁ-MG

2021

MARIA LUIZA CAMARGOS FARIA

**ESTUDO DE UM MÉTODO ALTERNATIVO DE GELATINIZAÇÃO DE
AMIDO NA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO FOSFÁTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Dra. Michelly dos Santos Oliveira
Coorientador: Dr. Mario Guimarães Junior

ARAXÁ-MG

2021

MARIA LUIZA CAMARGOS FARIA

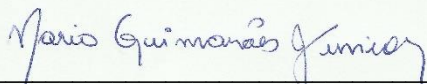
**ESTUDO DE UM MÉTODO ALTERNATIVO DE GELATINIZAÇÃO DE
AMIDO NA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO FOSFÁTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito
parcial para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Minas.

Data de Defesa: Araxá, 20 de abril de 2021.



Orientadora: Dra. MICHELLY DOS SANTOS OLIVEIRA
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá



Coorientador: Dr. MARIO GUIMARÃES JUNIOR
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá



Avaliador: Dr. FÁBIO DE SÃO JOSÉ
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá



Avaliador: Me. LEANDRO HENRIQUE SANTOS
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer à Deus, por todas as vitórias concedidas e por ter me dado saúde para vivenciar isso tudo até este momento.

Em seguida, agradeço imensamente à minha família, aos meus pais Selma e Miguel, por todo sacrifício feito visando meu bem estar e por me apoiarem em meus sonhos. Aos meus irmãos, Michel, Tiago e Jhonatan, por sempre demonstrarem apoio e carinho quando precisei e por estimularem tanto meus estudos.

À minha noiva, Ráira Luiza, pelo companheirismo, amor, cuidado e alegria transmitida durante todo esse percurso.

Agradeço à professora Dra. Michelly dos Santos Oliveira por ter me apoiado, por todo conhecimento disponibilizado durante o curso de Engenharia de Minas e pela orientação necessária para que este trabalho fosse realizado. Também agradeço imensamente pela atenção, paciência e compreensão nos momentos delicados, sou muito grata por esta amizade.

Ao meu coorientador Mario Guimarães Junior pelo apoio na realização da pesquisa, pelas aulas de conhecimento durante a realização dos testes e pela orientação recebida.

Meu muito obrigada aos meus colegas de laboratório Dener Duarte e Amanda Cordeiro que me ajudaram nessa pesquisa para a realização de todos os ensaios.

Aos meus amigos dentro e fora do CEFET-MG, que me transmitiram apoio no decorrer desta trajetória e auxiliaram de alguma forma para o meu desenvolvimento.

RESUMO

A produção de fertilizantes fosfatados apresenta uma constante ascensão, devido ao crescente aumento da população mundial e da demanda por alimentos. Tal ascensão promove o maior investimento em estudos que visam a otimização dos processos de concentração do minério fosfático via flotação, uma vez que o elemento químico fósforo corresponde ao principal componente do mineral apatita obtido a partir do beneficiamento da rocha fosfática. Tendo em vista a procura por potencializar a seletividade de separação entre os minerais ganga/apatita e a necessidade por uma mineração mais sustentável, o objetivo deste trabalho consistiu em avaliar o uso de um método alternativo de gelatinização de amido na flotação de minério fosfático. Para alcançar este objetivo, foi realizada a gelatinização de seis espécimes de amido (A1 a A6) por efeito térmico, seguida de ensaios de flotação. Estes mesmos amidos foram armazenados e reutilizados para outros dois ensaios de flotação, com objetivo de avaliar indícios de retrogradação durante dois e quatro dias de armazenamento. Este fenômeno faz com que as cadeias constituintes na molécula voltem a se associarem em uma estrutura mais ordenada com o passar do tempo. A partir dos resultados de recuperação mássica para os ensaios no primeiro dia, foi observado que os amidos A2 e A5 obtiveram os maiores valores iguais a 26,24% e 25,50%, respectivamente. No segundo dia de armazenamento, os amidos A2 e A5 novamente se sobressaíram, cujo valores foram 26,12% e 27,86%, respectivamente. E no quarto dia de armazenamento, os amidos A5 e A3 tiveram destaque, obtendo valores iguais à 30,04% e 25,38%, respectivamente. Enquanto isso, o amido A6 produziu os piores resultados nos três casos, demonstrando que houve a depressão da ganga e da apatita. Perante a análise do grau de retrogradação dos amidos, conclui-se que o amido de batata residual (A5) sofreu a influência deste fenômeno, uma vez que as recuperações mássicas aumentaram no decorrer dos dias, porém a mesma análise não pôde ser feita perante os outros casos. Tal limitação se deve ao fato que os amidos de milho utilizado no processo de flotação industrial (A1), de milho comercial (A2) e o de mandioca modificado (A3) não obtiveram um padrão evolutivo, e os amidos de milho comercial waxy (A4) e o de arroz hidrolisado (A6) apresentaram um comportamento reverso do esperado, resultando em uma diminuição da recuperação mássica no decorrer dos dias. Comparando os dois métodos de gelatinização, por efeito térmico e por adição de soda, a rota de enfoque do trabalho provou ser a mais econômica.

Palavras-chave: Fosfato. Flotação. Depressor. Amido. Retrogradação.

ABSTRACT

The production of phosphate fertilizers is steadily rising, due to the growing increase in the world population and the demand for food. This rise promotes greater investment in studies aimed at optimizing the processes of concentration of phosphate ore via flotation, since the chemical element phosphorus corresponds to the main component of the apatite mineral obtained from the processing of phosphate rock. In view of the quest to enhance the selectivity of gangue / apatite mineral separation and the need for more sustainable mining, the objective of this work is to evaluate the use of an alternative starch gelatinization method in the phosphate ore flotation. To achieve this objective, gelatinization of six starch specimens (A1 to A6) was performed by thermal effect, followed by flotation tests. These same starches were stored and reused for two other flotation tests, in order to evaluate signs of retrogradation during two and four days of storage. This phenomenon causes the constituent chains in the molecule to re-associate in a more orderly structure over time. From the results of mass recovery for the tests on the first day, it was observed that starches A2 and A5 obtained the highest values equal to 26.24% and 25.50%, respectively. On the second day of storage, starches A2 and A5 again stood out, whose values were 26.12% and 27.86%, respectively. And on the fourth day of storage, starches A5 and A3 stood out, obtaining values equal to 30.04% and 25.38%, respectively. Meanwhile, A6 starch produced the worst results in all three cases, demonstrating that there was a depression in gangue and apatite. Given the analysis of the degree of retrogradation of starches, it is concluded that the residual potato starch (A5) was influenced by this phenomenon, since the mass recoveries increased over the days, however the same analysis could not be done before the other cases. This limitation is due to the fact that the corn starches used in the industrial flotation process (A1), commercial corn (A2) and modified cassava (A3) did not obtain an evolutionary pattern, and the waxy commercial corn starches (A4) and hydrolyzed rice (A6) dissipation a reverse behavior of the expected, recovering in a decrease in mass recovery over the days. Comparing the two gelatinization methods, by thermal effect and by addition of soda, the approach route of the work proved to be the most economical.

Keywords: Phosphate. Flotation. Depressant. Starch. Retrogradation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mineral apatita.....	15
Figura 2 - Estrutura de uma molécula heteropolar.	20
Figura 3 - Esquematização de um sistema de flotação contendo partículas hidrofobizadas e partículas hidrofílicas.....	20
Figura 4 - Estruturas dos monômeros de glicose.....	24
Figura 5 - Representação da estrutura química da amilose e amilopectina.	25
Figura 6 - Influência do tratamento hidrotérmico com excesso de água sobre o estado de amido.....	28
Figura 7 - Esquema de bancos de células mecânicas.	31
Figura 8 - Desenho esquemático das células pneumáticas.	32
Figura 9 - Representação esquemática da coluna de flotação.	34
Figura 10 - Solução de coletor preparada.	37
Figura 11 - Aquecimento do depressor e acompanhamento do gasto energético vinculado.	39
Figura 12 - Célula de flotação Denver.	40
Figura 13 - Processo de retirada da espuma mineralizada.	41
Figura 14 - Custo energético durante a gelatinização dos amidos.....	44
Figura 15 - Amidos gelatinizados por adição de soda cáustica.....	45
Figura 16 - Amidos gelatinizados por efeito térmico.....	46
Figura 17 - Aparência dos amidos gelatinizados para os testes 2 e 3.....	46
Figura 18 - Comparativo das recuperações mássicas média entre os três testes. ...	52

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Características de amido em função da fonte vegetal.	25
Tabela 2 - Temperaturas de gelatinização de diversas fontes de amido.	28
Tabela 3 - Temperaturas de gelatinização utilizadas para os seis espécimes de amido.	38
Tabela 4 - Parâmetros para os ensaios de flotação.	41
Tabela 5 - Variáveis obtidas pelo equipamento wattímetro.....	43
Tabela 6 - Resultados de recuperação mássica e quantidade utilizada de NaOH para o teste 1.....	48
Tabela 7 - Resultados de recuperação mássica e quantidade utilizada de NaOH para o teste 2.....	49
Tabela 8 - Resultados de recuperação mássica e quantidade utilizada de NaOH para o teste 3.....	50
Quadro 1 - Grupo da apatita.....	14

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais S.A.
ETR	Elementos de Terras Raras
ICC	International Association for Cereal Science and Technology
RVU	Rapid Visco Units

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Fósforo	13
2.2	Mineral Apatita	14
2.3	Origem e Tipos de Depósitos Fosfáticos	15
2.4	Flotação no Tratamento de Minérios	16
2.4.1	REAGENTES	19
2.4.1.1	<i>Coletores</i>	19
2.4.1.2	<i>Espumantes</i>	21
2.4.1.3	<i>Modificadores ou Reguladores</i>	23
2.5	Equipamentos de flotação	29
2.5.1	CÉLULAS MECÂNICAS	29
2.5.2	CÉLULAS PNEUMÁTICAS	31
2.5.3	COLONAS DE FLOTAÇÃO	32
3	METODOLOGIA	36
3.1	Ensaio de flotação	36
3.1.1	PREPARAÇÃO DOS REAGENTES	36
3.1.1.1	<i>Saponificação do óleo vegetal</i>	37
3.1.1.2	<i>Gelatinização dos amidos</i>	38
3.1.2	CONDICIONAMENTO E FLOTAÇÃO	39
3.2	Avaliação dos resultados	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	Gasto energético para preparação do amido	43
4.2	Amidos Gelatinizados	45
4.3	Ensaio de flotação	47
4.3.1	ANÁLISE QUANTITATIVA	47
4.3.2	ANÁLISE DA RETROGRADAÇÃO	51
5	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O elemento químico fósforo está distribuído abundantemente no planeta Terra normalmente na forma de sais, conhecidos como fosfato. Porém, este elemento não se encontra livre na natureza, já que se trata de um composto muito reativo, mesmo em baixas temperaturas. O fósforo, em conjunto com o nitrogênio e o potássio, atua diretamente como um dos macronutrientes essenciais à vida das plantas, além de ser imprescindível para o desempenho das funções vitais dos seres vivos. A escassez deste elemento no ser humano promove a inibição do crescimento, falta de apetite, perda de fertilidade, dentre outros. Logo, o fósforo é substancial à vida e à hábil evolução da agricultura (OLIVEIRA, 2007; LAPIDO-LOUREIRO *et al.*, 2008).

Os minérios de fósforo, conhecido também como rochas fosfáticas, estão localizados em distintos ambientes geológicos, sendo os mais comuns os fosfatos de cálcio do grupo da apatia. Estes minérios podem ser empregados diretamente ou depois do processamento mineral realizado na fabricação de produtos comerciais. As aplicações primárias ocorrem na agricultura, como fertilizante e como ração animal (LAPIDO-LOUREIRO *et al.*, 2008).

Com o passar do tempo há o aumento da demanda por alimentos decorrente do crescimento da população mundial, fazendo com que a produção mundial de rochas fosfáticas aumente significativamente. A fim de satisfazer tal necessidade, ocorre a redução na qualidade dos minérios à medida em que os depósitos de teores mais elevados são lavrados, logo, os minérios complexos e de baixo teor passam a sobressair. Portanto, o investimento em estudos que visam o desenvolvimento tecnológico das rotas de beneficiamento torna-se cada vez mais fundamental, a fim de viabilizar economicamente o aproveitamento destes depósitos.

O beneficiamento de minérios de fosfato por flotação tem se destacado como a operação unitária mais importante, uma vez que nenhum método alternativo conseguiu atingir avanços tão significativos dentro do âmbito metalúrgico. Tal destaque desta técnica se deve ao descobrimento de novos reagentes e a otimização de novas tecnologias (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006; WILLS, 1981). Nesta operação, a espécie mineral de interesse é separada da ganga em função das propriedades de hidrofobicidade e hidrofiliabilidade. O mecanismo de separação ocorre quando as partículas hidrofóbicas ou hidrofobizadas por meio da adição de reagentes aderem-se às bolhas de ar e atravessam um caminho ascendente, enquanto as partículas

hidrofílicas permanecem na fase aquosa até serem removidas pelo fundo do equipamento (OLIVEIRA, 2004).

De modo a promover a seletividade na operação de concentração do minério fosfático, é extremamente importante que se providencie reagentes capazes de atingir resultados satisfatórios, entre eles, os denominados depressores. Estes atuam na superfície dos minerais de ganga, aumentando sua hidratação e impossibilitando, dessa forma, a adsorção do coletor. Na flotação direta de minério fosfático ígneo com ganga carbonatada é utilizado principalmente o amido como depressor (SOUZA *et al.*, 2014).

A preparação do depressor ocorre por meio da gelatinização do amido tencionando sua solubilidade. Este processo pode ocorrer por efeito térmico ou por adição de hidróxido de sódio, sendo o último citado o mais comumente utilizado na indústria mineral.

Tendo em vista a necessidade de lidar com a baixa de teores do minério fosfático relacionada à gradativa presença de minerais de ganga e, além de promover uma mineração mais sustentável incentivando a diminuição da proporção amido/NaOH, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficácia de uma rota alternativa para gelatinização do amido empregado como depressor na flotação de minério fosfático ultrafino. Além disso, comparar o custo financeiro durante o processo de gelatinização para as duas rotas supracitadas.

O amido gelatinizado, após armazenamento e resfriamento, fica sujeito à retrogradação. Este fenômeno faz com que as cadeias constituintes da molécula voltem a se associarem em uma estrutura mais ordenada com o passar do tempo. Diante do exposto, o presente trabalho também teve como objetivo avaliar os indícios de retrogradação em função do tempo.

Este trabalho apresenta uma fundamentação teórica a respeito do minério fosfático, mineral apatita, os reagentes e equipamentos de flotação, bem como as técnicas alternativas de gelatinização do amido e sua retrogradação. Posteriormente, traz a metodologia empregada nos ensaios de flotação, como a gelatinização dos amidos e os parâmetros utilizados para a operação de flotação. E por fim, são apresentados os resultados obtidos e discussão relacionada com outros trabalhos presentes na literatura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados conceitos pertinentes para o entendimento do trabalho, como: minérios fosfáticos, fundamentos da flotação, gelatinização e retrogradação do amido e os equipamentos da flotação.

2.1 Fósforo

A descoberta do fósforo foi um marco na história da Química, já que corresponde ao primeiro elemento químico encontrado com registro histórico. Foi isolado, pela primeira vez em 1669, pelo alquimista alemão Henning Brand através da evaporação da urina humana. O nome fósforo é derivado da palavra grega *phosphoros* (*phós*, “luz” e *phóros*, “transportador”) que significa “possui brilho”, devido a sua propriedade de fosforescência (OLIVEIRA, 2007).

O fósforo, representado pelo símbolo “P”, é um dos integrantes do grupo V da Tabela Periódica dos Elementos e possui número atômico 15. É o 12º elemento mais abundante na crosta terrestre, geralmente distribuído na forma de sais denominados fosfatos. É um composto não metálico e impossível de ser encontrado de forma livre na natureza, por ser muito reativo inclusive em baixas temperaturas (SOUZA e FONSECA, 2010).

Juntamente com o nitrogênio e o potássio, o fósforo corresponde a um dos macronutrientes imprescindíveis à vida vegetal e animal. Nos seres vivos animais, está presente nos ossos e nos dentes, além de fazer parte da urina, do sangue e de outros líquidos corporais. No caso das plantas, tem participação ativa nos processos de respiração e fotossíntese, atuando no armazenamento e fornecimento de energia, na transferência de material genético e no metabolismo de açúcares. É fundamental para que a planta cresça e reproduza-se, incentivando o desenvolvimento inicial, o crescimento da raiz e do vegetal (OLIVEIRA, 2007; LAPIDO-LOUREIRO *et al.*, 2008).

As inúmeras aplicações desse elemento que determinam a demanda pela apatita, um dos minerais constituintes da rocha fosfática. É utilizado prevalentemente para a produção de fertilizantes, mas também é útil nas indústrias de alimentos e bebidas, ração animal, sabões e detergentes (LAPIDO-LOUREIRO *et al.*, 2008).

2.2 Mineral Apatita

A apatita, considerada como a principal fonte natural de fósforo, pode ser identificada em diversos ambientes geológicos, porém, é raro encontrar depósitos economicamente lavráveis devido a sua complexidade mineralógica (TOLEDO e PEREIRA, 2001).

Segundo Barros (2005), a fórmula química geral da apatita é representada por $A_{10}(XO_4)_6Z_2$, em que A pode ser um cátion alcalino Ca^+ , Pb^+ , Sr^+ , Zn^+ , Na^+ , Be^+ , Cd^+ , Elementos de Terras Raras (ETR), Sc^+ , Mg^+ ou Mn^+ ; X pode ser um ânion trivalente P^- , V^- , S^- , C^- , Si^- , Cr^- ou As^- e por fim, Z pode ser um ânion monovalente F^- , OH^- , Cl^- ou Br^- .

Entre as opções desses possíveis minerais do grupo da apatita (Quadro 1), fluorapatita, clorapatita e hidroxapatita são as mais corriqueiras, sendo classificadas segunda a presença dos ânions F^- , Cl^- e OH^- , respectivamente (CHULA, 2004; OLIVEIRA, 2007).

Quadro 1 - Grupo da apatita.

Mineral	Fórmula Química
FLUORAPATITA	$Ca_5(PO_4)_3F$
CLOROAPATITA	$Ca_5(PO_4)_3Cl$
HIDROXIAPATITA	$Ca_5(PO_4)_3OH$
CARBONATOHIDROXIAPATITA	$Ca_5(PO_4, CO_3)_3(OH)$
CARBONATOFUORAPATITA	$Ca_5(PO_4, CO_3)_3F$
ESVABITA	$Ca_5(AsO_4)_3F$
TURNEAUREITA	$Ca_5[(As, P)O_4]_3Cl$
JOHNBAUMITA	$Ca_5(AsO_4)_3(OH)$
FERMORITA	$(Ca, Sr)_5(AsO_4, PO_4)_3(OH)$
FLUORCAFITA	$Ca(Sr, Na, Ca)(Ca, Sr, Ce)_3(PO_4)_3F$
ESTRÔNCIOAPATITA	$(Sr, Ca)_5(PO_4)_3(OH, F)$
BELOVITA – (CE)	$Sr_3Na(Ce, La)(PO_4)_3(F, OH)$
BELOVITA – (LA)	$Sr_3Na(La, Ce)(PO_4)_3(F, OH)$
ALFORSITA	$Ba_5(PO_4)_3Cl$
MORELANDITA	$(Ba, Ca, Pb)_5(AsO_4, PO_4)_3Cl$
HEDIFANA	$Pb_3Ca_2(AsO_4)_3Cl$
PIROMORFITA	$Pb_5(PO_4)_3Cl$
MIMETITA	$Pb_5(AsO_4)_3Cl$
CLINOMIMETITA	$Pb_5(PO_4)_3Cl$
VANADINITA	$Pb_5(VO_4)_3Cl$

Fonte: CHULA, 2004.

A apatita, cuja densidade está entre 3,1 e 3,2 g/cm³, possui dureza 5 e os seus cristais podem ser encontrados nas cores incolor, verde, amarelo, branco, azul, violeta e castanho. Em relação ao hábito, podem ser tabulares, granulares, compactos ou prismáticos conforme ilustrado na Figura 1 (OLIVEIRA, 2004; VALENTE NETO, 2008).

Figura 1 - Mineral apatita.



Fonte: SANTOS, 2010.

Devido à grande quantidade de substituições na composição química da apatita e aos diversos meios de formações existentes, as propriedades de superfície variam de um minério para outro e de depósito para depósito. Como consequência, não há uma resposta padrão para o processo de flotação de apatita de diferentes localidades (HANNA e SOMASUNDARAN, 1976).

2.3 Origem e Tipos de Depósitos Fosfáticos

De acordo com Santana (2007), a dificuldade ou facilidade do processamento do fosfato se deve aos processos geológicos, ocorridos há 70 milhões de anos atrás durante a formação dos depósitos fosfáticos, que estabelecem as associações mineralógicas e as concentrações de fósforo nas diferentes jazidas existentes.

Os depósitos fosfáticos, geralmente, podem ser classificados em três tipos (SANTANA, 2007; GUIMARÃES, 1997):

- Depósitos de origem marinha sedimentar: Resultante da aglomeração de matéria orgânica e de sedimentação lenta, em forma de camadas e espalhados por grandes áreas. São considerados como facilmente lavráveis, utilizando métodos de lavra a céu aberto e técnicas de beneficiamento mineral menos dispendiosas, já que

possuem teores entre 18 a 33% de P_2O_5 . Este tipo de depósito é encontrado na Flórida (EUA), Marrocos e Tunísia (norte da África), Olinda e Patos de Minas (Brasil), apresentando como um dos constituintes a carbonato-apatita e/ou carbonato-fluorapatita.

- Depósitos de origem ígnea: Encontrados geralmente em áreas restritas, obrigando o uso de métodos de lavra e de concentração mais seletivos em decorrência de sua complexidade mineralógica, sendo composto por fluorapatita e fosfatos secundários, magnetita, limonita, goethita, minerais de nióbio, micas, titânio e bário. O teor de P_2O_5 gira em torno de 13% e apresenta alto teor de ferro e óxidos de alumínio. Este tipo de depósito é encontrado na Rússia, África do Sul, Finlândia, além de corresponderem aos principais depósitos do Brasil, os de Tapira (MG), Catalão (GO), Araxá (MG) e Jacupiranga (SP).
- Depósitos biogénéticos: Correspondem aos depósitos orgânicos nitrogenados derivados de dejetos de aves (guanós). Estes depósitos são de menor importância econômica.

De acordo com Abouzeid (2008), a distribuição das reservas mundiais de fosfato ocorre da seguinte forma: os depósitos de origem ígnea representam 15-20% da produção mundial de rocha fosfática; os de origem sedimentar representam 80-85% do total e os biogénéticos atuam em 2-3% da oferta mundial de fosfato.

No território brasileiro, o cenário se opõe, aproximadamente 80% das jazidas de fosfato são de origem ígnea com a presença acentuada de rocha carbonatítica e minerais micáceos, causando baixo teor de P_2O_5 contra 18% de origem sedimentar e somente 2% composta por depósitos de guano, bauxita fosforosa, apatita de veios etc (GUIMARÃES, 1997; GUIMARÃES *et al.*, 2005). Devido às características intrínsecas das rochas brasileiras, é necessário um desdobramento para criar tecnologias capazes de processar e produzir concentrados com qualidade análoga ao do mercado internacional (SOUZA e FONSECA, 2010).

2.4 Flotação no Tratamento de Minérios

Os recursos minerais são imprescindíveis para a manutenção dos principais setores da economia, como por exemplo, as atividades industriais, agrícolas, de construção civil e metalúrgica. Entretanto, esses minerais essenciais dificilmente são encontrados nas especificações precisas para a sua utilidade, já que há a

presença de outros minerais de ganga e/ou contaminantes, além da granulometria ou teor apresentarem fora do padrão desejado. Portanto, é necessário a realização de operações e processos que possam viabilizar a utilização dos elementos químicos e compostos essenciais aos setores econômicos, tais como o ferro (hematita), fosfato (apatita), ouro (arsenopirita), nióbio (pirocloro), entre outros.

Segundo Luz *et al.* (2010), o tratamento de minérios baseia-se em um conjunto de operações que tencionam a modificação do minério do seu formato inicial, tendo em vista a separação das partículas minerais úteis dos minerais ganga a fim de se obter um concentrado final com um teor elevado do mineral de interesse. As operações unitárias correspondentes são:

- Cominuição: britagem e moagem (responsáveis pela redução de tamanho e liberação física da partícula);
- Separação por tamanho e classificação: peneiramento, ciclone etc.;
- Concentração: gravítica, magnética, eletrostática, por flotação etc.;
- Desaguamento: espessamento, filtração;
- Secagem: secador rotativo, secador de leito fluidizado;
- Disposição do rejeito.

Portanto, a viabilidade desta etapa de concentração depende da liberação física das espécies, da existência de uma propriedade diferenciadora, tais como a química de superfície, densidade, forma, susceptibilidade magnética, condutividade térmica, dentre outras, e da separabilidade dinâmica que corresponde ao tipo de equipamento utilizado.

A flotação, desenvolvida no início do século XXI, trata-se de um dos principais métodos de concentração de minérios, já que possui versatilidade e seletividade. Este processo, aplicado para minérios com baixo teor e granulometria fina, explora a diferença entre as propriedades de superfície das espécies minerais como método de separação.

A evolução da flotação seguiu por três estágios, sendo eles: flotação em óleo (*bulk oil flotation*) que explora a afinidade natural que alguns minerais têm pelo óleo, a flotação pelicular (*skin flocculation*) que promove a separação por meio da água pura, considerando as propriedades notoriamente hidrofóbicas e a flotação por espuma (*froth flotation*). É importante ressaltar que a flotação em óleo e a flotação pelicular passaram a ser primitivas, já que era necessário haver uma espécie mineral

com a propriedade desejada para obter maior seletividade. Portanto, o termo flotação passou a ser utilizado quando se refere apenas a flotação por espuma (SANTANA, 2007).

De acordo com Peres e Araújo (2013), a seletividade do método ocorre de acordo com os distintos graus de hidrofobicidades entre as superfícies minerais durante o processo. Segundo Oliveira (2004), as partículas mais hidrofóbicas apresentam superfície apolar e possuem menor afinidade pela água. Por outro lado, as partículas menos hidrofóbicas, ou também denominadas de hidrofílicas, apresentam superfície polar e têm maior afinidade pela água.

O processo de flotação inicia-se com as partículas minerais sendo condicionadas com os reagentes necessários para articular a seletividade da operação. Posteriormente, este material é injetado nas máquinas de flotação, em que há um fluxo de ar incorporado a uma suspensão aquosa. Desta forma, os minerais hidrofóbicos se aderem as bolhas de ar e se encaminham para a espuma sendo recuperados no produto flotado. Por outro lado, os minerais hidrofílicos continuam na polpa e são removidos no produto afundado (OLIVEIRA, 2004).

A flotação apresenta duas rotas distintas, podendo ser flotação direta, em que as espécies úteis são coletadas no flotado e os minerais ganga retirados no afundado; enquanto a coleta do mineral de interesse no afundado e os de ganga na espuma representam a flotação reversa. No caso da concentração de rochas fosfáticas ocorre a flotação direta, tendo como produto o concentrado apatítico (OLIVEIRA, 2004).

Segundo Baltar (2008), a flotação ocorre em três fases subsequentes, sendo a colisão, a adesão e o transporte. A etapa da colisão acontece quando ocorre o contato entre a bolha e a partícula e está associada a hidrodinâmica do sistema, do tamanho da partícula e diâmetro da bolha. A adesão está fortemente relacionada com a seletividade do processo, tendo em vista que somente as partículas hidrofobizadas se aderem às bolhas. E por fim, ocorre o transporte da partícula aderida à bolha até a superfície para que seja coletada, tal feito é influenciado pela estabilidade do conjunto bolha/partícula.

A operação de flotação é comumente aplicada para os minérios de ferro e fosfato. Ainda assim, a flotação é vista em usinas de beneficiamento de múltiplos minerais, como magnesita, grafita, sulfetos de cobre, sulfeto de chumbo-zinco, níquel, oxidados de zinco, ouro, talco, fluorita, nióbio, feldspato, carvão, silvita e resíduo

hidrometalúrgico havendo prata. No caso do minério fosfático, as principais usinas de flotação localizam-se em Cajati (SP), Tapira (MG), Araxá (MG) e Catalão (GO) (BALTAR, 2008; CHAVES *et al.*, 2010).

2.4.1 REAGENTES

A operação de flotação é primordial para a indústria mineral, visando a potencialização desta etapa são utilizados diferentes reagentes para promover a otimização das propriedades do produto final. Diante disso, há um significativo investimento em pesquisa em torno destes e suas respectivas aplicações (BULATOVIC, 2007).

A maioria dos minerais encontrados na natureza são hidrofílicos, havendo, portanto, uma maior resistência à flotabilidade de sua superfície. Apenas alguns minerais apresentam uma hidrofobicidade natural, como o talco, grafita, molibdenita, alguns carvões, entre outros. Devido a este fato, na flotação são exploradas as características intrínsecas dos reagentes que são capazes de alterar seletivamente as propriedades de superfícies dos minerais segundo os interesses de recuperação (PERES e ARAUJO, 2013).

Os reagentes de flotação correspondem a compostos orgânicos ou inorgânicos. São considerados os agentes mais importantes em um processo de flotação que podem ser divididos em função do seu papel específico, podendo ser três classes (OLIVEIRA, 2004):

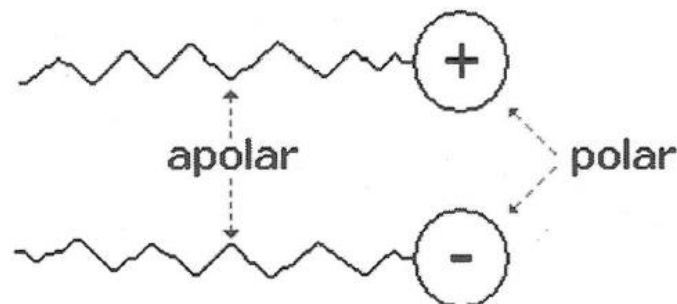
- Coletores: a sua principal finalidade é impulsionar propriedades hidrofóbicas às superfícies dos minerais;
- Espumantes: possibilitam a formação de uma espuma estável e regulam um tamanho das bolhas efetivo para transportar os minerais ao concentrado;
- Modificadores ou reguladores: promovem a seletividade do coletor visto que adequam a sua ação efetiva.

2.4.1.1 Coletores

Os coletores são surfactantes, ou seja, compostos constituídos por uma molécula heteropolar (Figura 2), isso quer dizer que uma parte da molécula é apolar e a outra é polar. O grupo polar é responsável por interagir com a superfície mineral

possibilitando a adsorção, já que esta é considerada solidofílica (afinidade por sólidos) e hidrofílica. Portanto, a parte polar da molécula tem a competência de promover a seletividade e a intensidade da ligação com a superfície. Esta parte da molécula também favorece a elevação da solubilidade da molécula em meio aquoso. Por outro lado, a porção apolar incentiva a hidrofobicidade da superfície, já que esta é considerada aerofílica (afinidade pelo ar) e hidrofóbica (BALTAR, 2008).

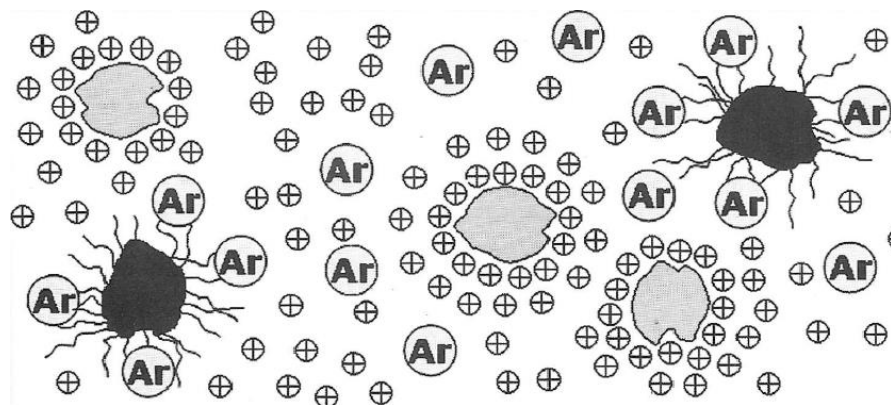
Figura 2 - Estrutura de uma molécula heteropolar.



Fonte: BALTAR, 2008.

Ainda segundo Baltar (2008), quando o coletor está presente em solução, este reagente passa a adsorver na superfície mineral, formando uma película hidrofóbica. A película hidrofóbica impossibilita a hidratação da superfície, permitindo a adesão da partícula à bolha de ar. E, as partículas que não foram hidrofobizadas permanecem em suspensão até serem retiradas, já que estão cobertas de moléculas de água (Figura 3).

Figura 3 - Esquemática de um sistema de flotação contendo partículas hidrofobizadas e partículas hidrofílicas.



Fonte: BALTAR, 2008.

Os coletores podem ser classificados de acordo com a sua carga iônica (SANTANA, 2007):

- Catiônicos: refere-se ao grupo das aminas e seus acetatos. São considerados reagentes de fácil e rápida adsorção e dessorção, devido a este fato apresentam menor seletividade em relação aos coletores aniônicos. Possuem maior sensibilidade ao efeito causado pelos modificadores de coleta. Têm como principal aplicação a flotação de não metálicos, como quartzo, silicatos, aluminossilicatos e vários óxidos, talcos, micas etc.
- Aniônicos: são subdivididos em relação a função química, podendo ser ácidos graxos e seus sabões, tiocarbonatos ou xantatos, sulfatos de alcoila ou arila, tiós (álcoois de enxofre) ou mercaptanas, tiouréias, ditiofosfatos ou aerofloats, tiocarbamatos.

Os coletores mais comuns na concentração de apatita são os ácidos graxos e seus sabões. Segundo Chaves *et al.* (2010), estes coletores apresentam uma cadeia de elevado comprimento, podendo ser usado para uma variedade de minerais, tornando-o pouco seletivo. Com o objetivo de otimizar esta seletividade é preciso uma modulação da dosagem ou a utilização de modificadores.

De acordo com Oliveira (2004), os óleos industriais podem ser de origem vegetal (*tall oil*, arroz, soja, algodão, girassol, milho, linhaça, mamona, palma etc.) ou de origem animal (sebo, baleia, peixes em geral etc.). No caso da apatita, o ideal são aqueles óleos que possuem cadeias com cerca de 18 átomos de carbono.

Portanto, industrialmente utilizam-se os sabões derivados dos ácidos graxos de origem vegetal. Estes coletores são empregados em meio alcalino ou então, saponificados. No caso, a saponificação ocorre aplicando soda cáustica, sendo que, a reação principal neste processo é a resposta dos triglicerídeos das gorduras com o hidróxido, produzindo um glicerol e os sabões de ácidos graxos (BALTAR, 2008).

2.4.1.2 Espumantes

Em um sistema aquoso ausente de agentes orgânicos não há formação de espuma, mesmo que este esteja sujeito à agitação ou injeção de um fluxo de ar. Nesta situação, as possíveis bolhas formadas são rapidamente quebradas, devido à alta tensão superficial na interface líquido-gás. Portanto, é preciso a utilização de um reagente que limita a tensão superficial nesta interface, de modo a permitir a formação de uma espuma estável de tal maneira que as partículas flotadas possam ser

removidas da superfície, sendo esse reagente conhecido como espumante (BALTAR, 2008).

Os espumantes são reagentes tensoativos não iônicos, heteropolar, cuja estrutura é semelhante com as dos coletores, porém, se diferenciam no caráter funcional do grupo polar, pois possuem um radical não ionizável e de grande afinidade pela água. Portanto, enquanto os coletores tendem a migrar para a interface sólido-gás, os espumantes se direcionam para a interface líquido-gás (MONTE e PERES, 2010; OLIVEIRA, 2004).

Este reagente tem a finalidade de atuar em três frentes essenciais. A adsorção de um surfactante na interface líquido-gás auxilia nas três principais funções deste reagente. Tal ação diminui a tensão superficial, permitindo uma maior estabilidade a bolha, o que é indispensável a formação da espuma. Além disso, promove o controle da coalescência, já que a mesma adsorção reduz a permeabilidade da membrana interfacial, impedindo a coalescência. Como consequência, ocorre o aumento da probabilidade de colisão entre as partículas hidrofóbicas e as bolhas de ar. E por fim, há o favorecimento da adesão partícula-bolha, já que a bolha fica coberta com moléculas do espumante, incentivando o aumento do tempo de contato da partícula com a bolha o que beneficia a probabilidade de adesão (BALTAR, 2008).

Vale ressaltar que em diferentes situações, um mesmo reagente pode efetuar funções distintas. Logo, é interessante avaliar a função mais impactante de cada reagente. Por exemplo, os ácidos graxos e aminas conseguem comportar tanto como coletores quanto espumantes. Os ácidos graxos, estando em sua forma solúvel (sabões de sódio), pH em torno de 10, apresentam predominância na forma iônica que prevalece a ação de coletor. Pode-se entender que seja uma característica positiva economicamente, porque teria redução de um reagente, porém, em alguns sistemas de flotação esta característica pode ser maléfica. Tal fato pode ser explicado porque seria muito difícil o controle da quantidade de espuma, podendo prejudicar também o teor do produto final, afinal, é possível haver o arraste de minerais de ganga. Portanto, é interessante a adição de antiespumantes ao processo após o transbordo da espuma para evitar tal situação (OLIVEIRA, 2004; SANTOS, 2010).

2.4.1.3 Modificadores ou Reguladores

Os reagentes modificadores são compostos orgânicos ou inorgânicos, cuja finalidade corresponde em possibilitar maior efetividade à ação do coletor na superfície das partículas minerais.

Segundo Sutulov (1963), os modificadores podem atuar como reguladores de pH, ativadores e depressores. O pH corresponde a uma das principais variáveis que interfere diretamente na operação de flotação, devido a sua ação na dissociação dos outros reagentes e nas condições de adsorção ou hidratação na superfície mineral. Em relação a flotação de apatita, é aplicada a soda cáustica como regulador de pH, porque em situações que utiliza a cal, mesmo sendo mais barata, apresenta um baixo desempenho, porque os íons Ca^{2+} consomem o coletor disponível para a coleta da apatita.

Os ativadores são íons utilizados para incentivar a ação do coletor, ativando seletivamente a superfície mineral que se deseja flotar, facilitando a adsorção do coletor. São indispensáveis em casos que o coletor não adsorve em nenhuma das espécies minerais constituintes. Os ativadores mais comuns são os cátions metálicos.

Os depressores, visando a seletividade, mudam a superfície de determinados minerais e, assim, inibe a sua coleta. Ou seja, são compostos que deprimem a atuação do coletor nas partículas indesejáveis por meio da reação com a superfície do mineral de ganga, fazendo com que esta superfície apresente um caráter mais hidrofílico. É útil quando a ação do coletor não é seletiva e este tende a adsorver em todas as partículas minerais presentes, já que alguns coletores são muito energéticos. Podem ser inorgânicos, tais como, silicato de sódio, sulfeto de sódio, dicromato de potássio, cianeto de sódio e outros sais; ou orgânicos, sendo os polissacarídeos (amido, carboximetilcelulose, goma etc.) e os polifenóis os mais usados.

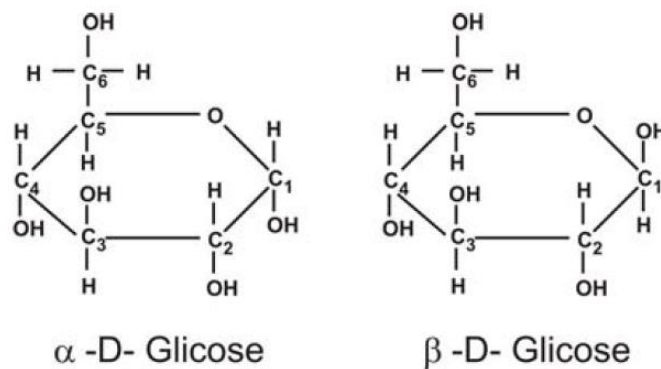
a) AMIDO

O amido é um depressor que merece destaque, já que é muito utilizado no processo de flotação de minério de ferro e, em especial, de minério fosfático. De acordo com Guimarães *et al.* (2005), as minas de fosfato de Araxá e Tapira (MG),

Cajati (SP) e Catalão (GO) empregam esses depressores como os principais agentes modificadores.

De acordo com Santos (2009), entre todos os polissacarídeos, a produção do amido é feita por meio de pequenos agregados individuais, chamado de grânulos. O amido é um dos mais importantes polissacarídeos naturais que são polímeros orgânicos formados por meio do processo de fotossíntese, ou seja, quando ocorre a condensação de moléculas de glicose. A composição do amido é caracterizada por vários monômeros de glicose (Figura 4), sendo estes a α -D-glicose e a β -D-glicose que se diferem entre si pela posição do grupo hidroxila ligado ao átomo de carbono C1 (NUNES e PERES; 2011).

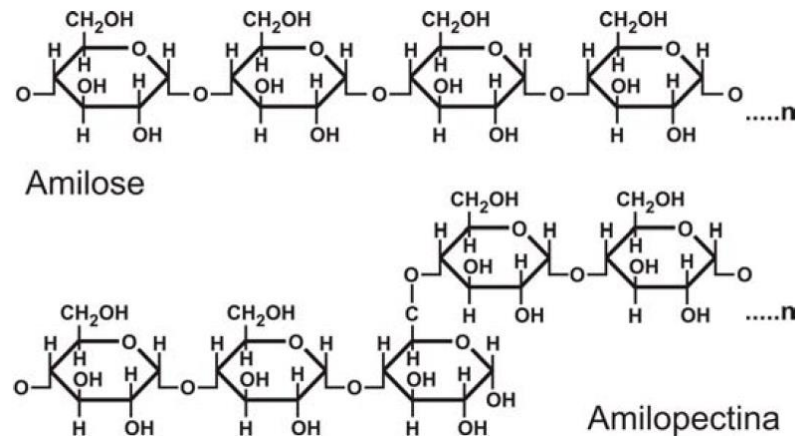
Figura 4 - Estruturas dos monômeros de glicose.



Fonte: NUNES e PERES, 2011.

A estrutura do amido é representada pela presença de cadeias de amilose e amilopectina (Figura 5). A amilose é composta por unidades de glicose unidas por ligações glicosídicas α -1,4, concebendo um polímero linear em forma de hélice de caráter insolúvel, com massa molar entre 10^5 e 10^6 g/mol e apresentando tamanho médio 10^3 de unidades de glicose por molécula. A amilopectina é composta por unidades de glicose unidas em α -1,4 e α -1,6, originando um polímero de caráter altamente solúvel, cuja massa molar está na ordem de 10^6 a 10^9 g/mol e possuem mais de 1500 unidades de D-glicose nas posições 1-4 e 1-6, comprovando que apresentam tamanho muito superior ao da amilose (RÓZ, 2004; SANTOS, 2009; KIEKOW, 2014; NUNES e PERES, 2011; GUIMARÃES JR., 2015).

Figura 5 - Representação da estrutura química da amilose e amilopectina.



Fonte: NUNES e PERES, 2011.

A proporção entre as moléculas de amilose e amilopectina e como estão organizadas no interior do grânulo são condições que determinam a funcionalidade do amido. Normalmente, os amidos são constituídos de 20 a 30% de amilose e 70 a 80% de amilopectina, sendo que esse valor varia em função da fonte vegetal de origem (Tabela 1). No caso, a amilopectina, em termos estrutural e funcional, é apontada como a mais significativa entre as duas moléculas. Isso se deve ao fato de que a amilopectina, sozinha, consegue formar o grânulo, como no caso de mutantes destituídos de amilose (TEIXEIRA, 2007; DENARDIN e SILVA, 2009).

Tabela 1 - Características de amido em função da fonte vegetal.

Fonte	Tipo de amido	Forma do grânulo	Diâmetro (µm)	Amilose (%)	Amilopectina (%)
milho	cereal	redondo, poligonal	5-26	28	72
trigo	cereal	redondo,	2-10; 20-35	28	72
arroz	cereal	poligonal, angular	3-8	30	70
mandioca	tubérculo	redondo, oval	5-30	14-18	86-82
batata	tubérculo	redondo, oval	15-100	18-20	82-80

Fonte: VALDEJÃO; JANSON, 1996; SWINKELS, 1985; *apud* TEIXEIRA, 2007.

Além da amilose e amilopectina, os lipídeos, proteínas, fibras e minerais são encontrados nos grânulos de amido, porém em pequena quantidade e são geralmente denominados, constituintes menores. Esses constituintes interferem na ineficiência da purificação do amido durante o processo de extração, e independentemente da

quantidade constituinte, eles atuam nas propriedades físico-químicas e tecnológicas do amido, porém não é conhecido a sua influência no papel de depressor (SANTOS, 2009; NUNES e PERES; 2011).

De acordo com Nunes e Peres (2011), os principais motivos que permitem que o amido possa atuar como depressor são: presença de inúmeros grupos de $-OH$ e o alto peso molecular da amilose e amilopectina.

b) GELATINIZAÇÃO E RETROGRADAÇÃO DO AMIDO

Para que o amido possa ser aplicado como reagente na flotação, é preciso modificá-lo irreversivelmente, no que diz respeito à estrutura e à ordem molecular, denominado processo de gelatinização. Existem dois processos diferentes de gelatinização: por efeito térmico e por adição de hidróxido de sódio (soda cáustica) (SOUZA e MAGALHÃES, 2016).

O processo de gelatinização por soda cáustica é o único aplicado industrialmente no Brasil, que consiste na absorção de parte do álcali da solução diluída de hidróxido de sódio pelas moléculas da suspensão de amido (AGUIAR, 2014). Ao analisar as possíveis vantagens entre os dois métodos, estudos realizados para a flotação de minério de ferro obtiveram resultados semelhantes tanto no que se refere à seletividade quanto à recuperação. Entretanto, os autores consideram o método de gelatinização por soda cáustica o mais adequado, já que o processo de flotação de minério de ferro requer um circuito muito alcalino, além da complexidade em trabalhar com água quente em um concentrador a nível industrial (IWASAKI e LAI, 1965 *apud* REIS, 1987).

De acordo com Araújo *et al.* (2004), a rota térmica poderá se destacar novamente, devido ao alto custo da soda cáustica e às frequentes oscilações no preço desta. Além disso, há o novo panorama voltado para a mineração sustentável, em que as mineradoras estão adotando diferentes ações para este fim, portanto, a tentativa de diminuir a proporção amido/NaOH favorece ao descarte adequado do material à natureza e uma redução de custo para a compra deste reagente.

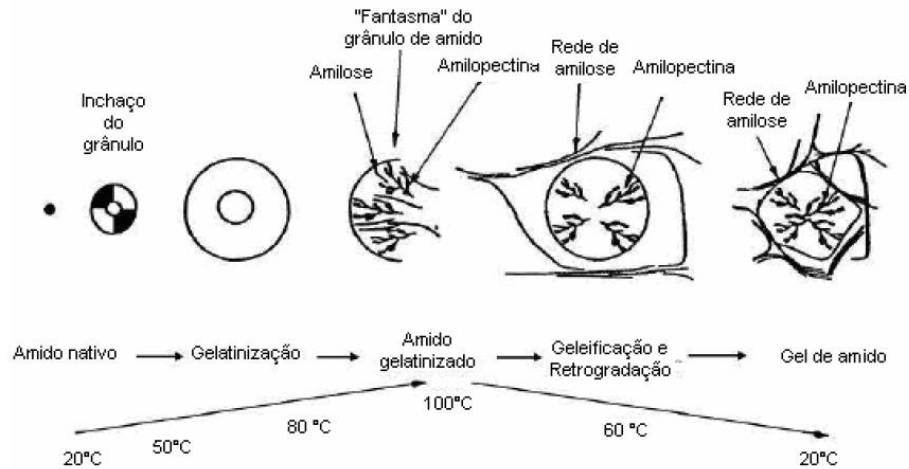
Silva *et al.* (2007) realizaram um estudo para avaliar a influência da temperatura no consumo de NaOH, visando a gelatinização otimizada do amido de milho que promove o melhor controle do pH na flotação do minério de ferro e diminui a quantidade de eletrólitos presentes na polpa. Os autores concluíram que é possível

obter uma gelatinização completa do amido de milho com menores quantidade de NaOH, por exemplo, alterando a temperatura de 25° a 30°C (aceitável para o clima brasileiro), fazendo com que seja possível diminuir cerca de 496,65 kg de NaOH por tonelada de amido de milho durante a sua gelatinização. Ou seja, isto representa 15% do consumo de NaOH do processo citado, promovendo uma redução de US \$ 273,16 por tonelada de amido de milho, considerando o preço de NaOH a US \$ 550,00 por tonelada. Caso a variação de temperatura seja ainda maior e ainda tratando de valores alcançados no verão brasileiro, como por exemplo, 35°C durante o dia e 25° C ou menos à noite, a redução do consumo de NaOH pode chegar a 34% (1.108,80 kg de NaOH por tonelada de amido de milho).

O enfoque do presente trabalho corresponde a avaliação do método por efeito térmico na flotação de fosfato. No momento em que o amido estabelece o contato com a água fria, os grânulos incham ligeiramente (10 a 20%), porém o processo é reversível quando ocorre a secagem. Porém, quando os grânulos são aquecidos em água, há o inchamento desses de maneira irreversível, resultando na perda da organização estrutural. Durante esse fenômeno (Figura 6), as moléculas de água apresentam energia cinética capaz de quebrar as pontes de hidrogênio entre as moléculas de amilose e amilopectina, possibilitando a hidratação que forma o intumescimento do grânulo. A expansão causa o futuro rompimento do grânulo, liberando a amilose para a fase aquosa e é nesse momento que se inicia a gelatinização (SANTOS, 2009; DENARDIM e SILVA, 2009).

De acordo com Santos (2009), o aquecimento contínuo do grânulo de amido em excesso de água provoca a perda da cristalinidade, além de causar o inchamento do grânulo e solubilização parcial dos polímeros, principalmente da amilose, devido à elevação da viscosidade, formando então uma pasta.

Figura 6 - Influência do tratamento hidrotérmico com excesso de água sobre o estado de amido.



Fonte: VICENTINI, 2003 *apud* SANTOS, 2009.

De acordo com Róz (2004), a temperatura de ocorrência do processo de gelatinização do amido é denominada de temperatura de gelatinização (T_{gel}), sendo que o valor numérico é diretamente relacionado também com a origem botânica do amido (Tabela 2).

Devido à maior importância da amilopectina na cristalinidade do grânulo de amido, a presença da amilose reduz o ponto de fusão das regiões cristalinas e a energia para o início da gelatinização, já que é necessário um maior gasto de energia para iniciar a fusão na ausência de regiões amorfas ricas em amilose. Portanto, essa correlação demonstra que os amidos com maior conteúdo de amilose detêm as menores temperaturas de gelatinização, já que apresentam mais regiões amorfas e menos regiões cristalinas. Entretanto, estudos realizados com amido de arroz têm encontrado resultados contraditórios referente à influência da amilose nas propriedades de gelatinização (DENARDIN e SILVA, 2009).

Tabela 2 - Temperaturas de gelatinização de diversas fontes de amido.

Amido	Milho	Trigo	Arroz	Tapioca	Batata
T_{gel} (°C)	62 – 72	58 – 64	68 – 78	49 – 70	59 - 68

Fonte: JAROWENKO, 1997 *apud* RÓZ, 2004.

No momento em que o amido gelatinizado é armazenado e resfriado, ele fica sujeito ao fenômeno de retrogradação. A medida em que passa o tempo, as moléculas constituintes perdem energia e as ligações de hidrogênio passam a se

fortalecer novamente, portanto, as cadeias voltam a se associarem em uma estrutura mais ordenada. Em consequência, a solução adota uma aparência turva e a viscosidade aumenta (DENARDIN e SILVA, 2009; DIAS, 2008).

Durante esse processo, ocorre a formação de microcristais, devido a progressiva associação das moléculas em partículas maiores e assim, resulta na precipitação do amido da solução, parecendo voltar a condição de insolubilidade em água fria. Portanto, recomenda-se que o tempo de armazenamento não seja longo. Há afirmações acerca de que a retrogradação da amilose pode ocorrer em apenas algumas horas, ainda mais em baixas temperaturas, enquanto a amilopectina retrograda apenas 10% em 100 dias. Além disso, há outros fatores como temperatura, tamanho e concentração dos grânulos e a presença de lipídeos que influencia no grau de retrogradação (TEIXEIRA, 2007; DIAS, 2008; DENARDIN e SILVA, 2009).

2.5 Equipamentos de flotação

A escolha do tipo de equipamento a ser utilizado na flotação é muito importante para alcançar resultados satisfatórios, uma vez que pode ser crucial de acordo com a granulometria do mineral, a seletividade e recuperações esperadas (SILVA, 2005; SANTOS, 2010).

Os equipamentos de flotação devem ser capazes de separar os minerais de interesse da ganga, sendo esta atuação classificada como separabilidade dinâmica. Para atingir este propósito, é preciso haver um contato íntimo entre os reagentes, ar, minerais e a fase líquida. A relação entre estes constituintes é imprescindível, pois auxilia na manutenção das partículas minerais em suspensão, na produção e dispersão das bolhas de ar e na coleta seletiva do mineral de interesse (OLIVEIRA e SOUZA, 2012).

As máquinas de flotação podem ser classificadas em três classes principais: células mecânicas, células pneumáticas e colunas de flotação.

2.5.1 CÉLULAS MECÂNICAS

As células mecânicas foram as máquinas pioneiras a serem desenvolvidas para utilização no processo de concentração de minério por flotação. São

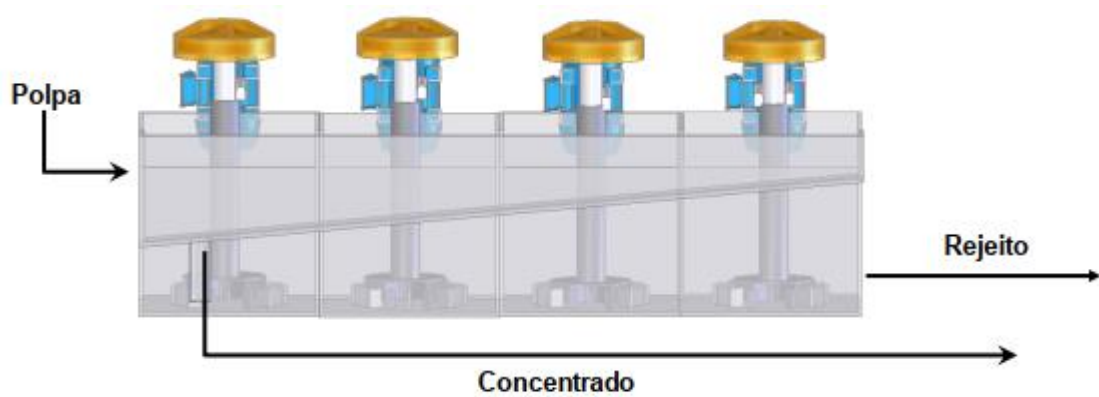
equipamentos constituídos de dois componentes básicos: a célula e a máquina de flotação (SILVA, 2013).

As células mecânicas são tanques projetados para receber a polpa alimentada, constantemente, por uma das faces laterais e descarregá-la pelo lado oposto. Cada unidade destes tanques é denominada de célula. Em uma das extremidades do conjunto há um compartimento de alimentação e na extremidade oposta, um compartimento de descarga que contém um regulador de nível da polpa no interior das células (CHAVES *et al.*, 2010).

Neste equipamento, a espuma sobe e é descarregada em calhas ao longo da extensão do banco de células, sendo possível a coleta do material hidrofóbico. Ao mesmo tempo, o material deprimido é arrastado pela corrente de água, sendo direcionado para a célula seguinte e, por fim, descarregado pela caixa de descarga. Portanto, há dois fluxos: um de deprimido, no sentido da caixa de alimentação para a caixa de descarga e outro de espuma, de baixo para cima no sentido oposto ao do deprimido (CHAVES *et al.*, 2010).

A máquina de flotação (Figura 7) é instalada dentro da célula e consiste em um rotor, no fundo da célula, acionado e suspenso por um eixo. O rotor é projetado para fornecer energia mecânica suficiente para manter a polpa em suspensão. Em diversos modelos de células, o movimento rotacional do rotor ocasiona em pressão negativa dentro da célula, sendo suficiente para aspirar o ar necessário para o processo. Porém, em alguns casos é preciso injetar ar comprimido para o interior da máquina para elevar a sua efetividade no sentido de carrear para cima a maior quantidade de bolhas de pequeno diâmetro. Este efeito é possibilitado através da peça chamada estator que tem a função de quebrar as bolhas de ar em um grande número de pequenas bolhas (OLIVEIRA, 2004).

Figura 7 - Esquema de bancos de células mecânicas.



Fonte: SANTOS, 2010.

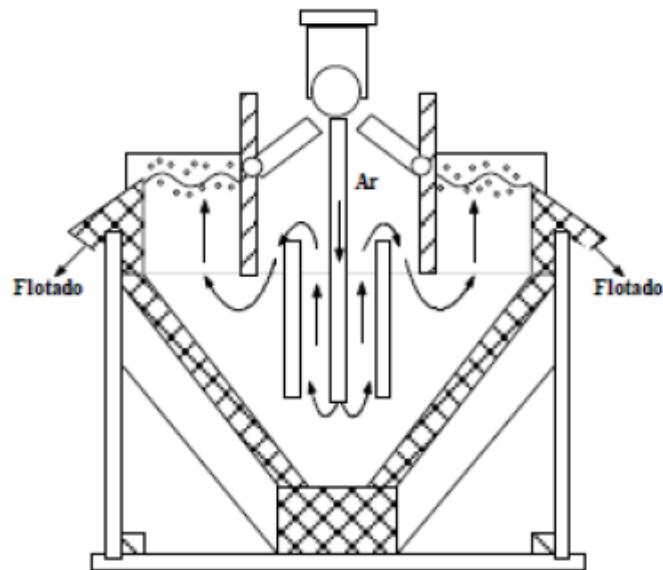
De acordo com Guimarães e Peres (1995), as células mecânicas podem ser classificadas quanto ao fluxo de polpa e quanto à aeração. Quanto ao fluxo de polpa, as células de flotação podem ser fechadas, possuindo vertedouro em cada compartimento, denominadas de *cell to cell* e células *open flow* que apresentam passagem livre para o fluxo de polpa. Em relação à aeração, as células podem ser *supercharged*, em que o ar é fornecido pelos compressores e injetado sob pressão, e por outro lado, as células *self-aerating* que exploram a depressão criada pelo rotor para sucção do ar e aeração da polpa (OLIVEIRA e SOUZA, 2012).

2.5.2 CÉLULAS PNEUMÁTICAS

As células pneumáticas foram elaboradas com intuito de compensar algumas falhas das células mecânicas. A característica diferencial das máquinas pneumática é a inexistência de impelidores para agitação e a aeração da polpa ser feita por ar comprimido (OLIVEIRA, 2004). De acordo com Chaves *et al.* (2010), existem as máquinas de flotação com tela, sem tela, os separadores de espuma, dentre outros. Outra vantagem das células pneumáticas é o fato de não dispor de peças móveis. Na Figura 8 é ilustrado um dos modelos das células pneumáticas.

A injeção de ar eleva o consumo de energia, por outro lado, as funções de aeração da polpa e separação de espuma não sofrem interferência da agitação mecânica, possibilitando, condições favoráveis a maior estabilidade do processo. Outra vantagem interessante é a aplicabilidade na flotação de minérios com distribuição granulométrica mais ampla (SANTOS, 2010).

Figura 8 - Desenho esquemático das células pneumáticas.



Fonte: OLIVEIRA; SOUZA, 2012.

Devido a necessidade de flotar, de forma mais seletiva, as partículas com granulometria mais fina, há um crescente investimento em pesquisas para a otimização dos equipamentos ou desenvolvimento de novos para a flotação dessa faixa granulométrica. Dentre os diversos equipamentos desenvolvidos, têm as colunas de flotação que são células pneumáticas capazes de flotar com maior seletividade os minérios com faixa granulométrica mais fina e mais grossa, provando ser um exemplo do avanço tecnológica da indústria mineral.

2.5.3 COLUNAS DE FLOTAÇÃO

Na década de 60, os cientistas canadenses Remy Tremblay e Pierre Boutin desenvolveram a concepção básica do processo de flotação em coluna. A partir deste descobrimento houve outros avanços importantes, Boutin e Wheeler realizaram os primeiros programas experimentais em escala de laboratório, além da elaboração de concepções alternativas desenvolvidas por Dell e Jenkins (AQUINO *et al.*, 2010).

Após algumas tentativas frustradas de execução do equipamento em maior porte, o êxito foi possível somente em 1981 com a primeira implantação industrial da coluna de flotação. Tal acontecimento ocorreu em Les Mines Gaspé onde foi instalada uma coluna para atuar no estágio de flotação *cleaner* de concentração de molibdenita, em consequência ocorreu a substituição do banco de células mecânicas

convencionais. Desde então, as colunas de flotação se propagaram no Canadá, África do Sul e América do Sul, especialmente no Chile e no Brasil (TAKATA e VALLE, 2013).

No território brasileiro, as primeiras unidades chegaram em 1991 para a concentração de minério de ferro na Samarco Mineração. No cenário da concentração de apatita, as primeiras colunas industriais iniciaram a sua operação em 1993 na antiga Bunge Fertilizantes de Araxá/MG, atualmente Mosaic Fertilizantes (TAKATA e VALLE, 2013).

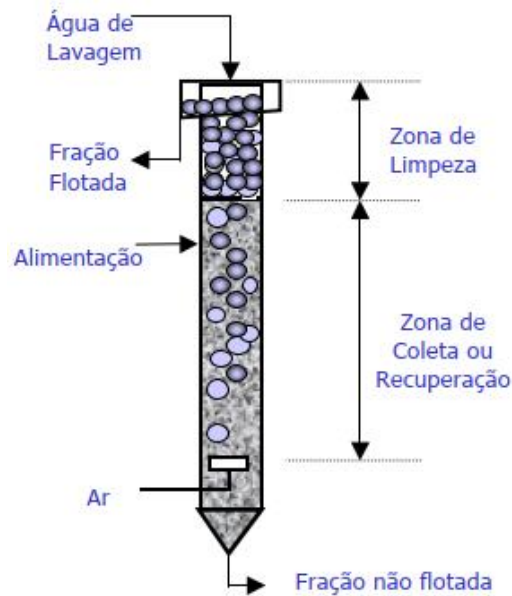
As colunas de flotação possuem uma diversidade de modelos, porém o modelo mais aplicado industrialmente é chamado de coluna canadense, cujo desenho esquemático pode ser visualizado na Figura 9.

De acordo com Aquino *et al.* (2010), a coluna de flotação difere da célula mecânica principalmente em relação a quatro aspectos básicos, sendo a geometria (maior relação altura/diâmetro), a existência de água de lavagem, a ausência de agitação mecânica e o sistema de geração de bolhas.

O projeto das colunas foi idealizado para haver a divisão do equipamento em duas zonas distintas no seu interior: a zona de recuperação (também chamada de zona de coleta ou zona de concentração) situada entre interface polpa-espuma e o sistema de aeração e há a zona de limpeza (também chamada de zona de espuma) que está localizada entre a interface polpa-espuma e o transbordo.

A alimentação da polpa é feita aproximadamente 2/3 da altura da coluna, a partir da sua base. Na zona de coleta, as partículas se chocam em contracorrente com as bolhas de ar geradas pelo aerador situado na parte inferior do equipamento. Como consequência da colisão, as partículas hidrofóbicas aderem as bolhas de ar e são transportadas até a zona de limpeza E, em contrapartida, as partículas hidrofílicas se mantêm na polpa e são coletadas na base da coluna. Por meio dos dispersores é adicionado a água de lavagem na parte superior da coluna, cujo feito promove a estabilização da espuma e a redução do arraste de partículas de ganga para o concentrado (CHAVES, 2006).

Figura 9 - Representação esquemática da coluna de flotação.



Fonte: LUZ *et al.*, 2002.

De acordo com Santos (2010), as colunas de flotação apresentam diversas vantagens em relação às células mecânicas, entre elas:

- Aumento da altura e estabilidade da camada de espuma;
- Menor custo na fabricação em decorrência da sua simplicidade construtiva;
- Aumento da probabilidade de adesão entre partícula e bolha devido a presença do fluxo contracorrente;
- Aumento da recuperação dos minerais finos e grosseiros por meio da atuação das pequenas bolhas de ar com dimensões controladas;
- O controle da altura da camada de espuma e o uso da água de lavagem promovem uma maior seletividade, pois minimiza o arraste dos minerais de ganga;
- Requer uma área menor para instalação, já que se trata de uma unidade predominantemente vertical;
- Confiabilidade nas equações de dimensionamento;
- Diminuição de peças de reposição;
- Os custos de manutenção são menores, pois não possuem partes móveis;
- Simplicidade e baixo custo de instrumentação e controle;
- Minimização de custos com operadores pela possibilidade de controle realizado;
- Possibilidade de projeto, fabricação e operação de unidades de grande porte;
- Diminuição do consumo energético.

Por outro lado, como desvantagens tem-se a menor capacidade de transbordo do concentrado principalmente quando é comparado apenas uma coluna de flotação com um circuito de células mecânicas; além de baixa área específica de superfície livre para o transbordo do concentrado (GUIMARÃES e PERES, 1995).

3 METODOLOGIA

O trabalho proposto realizou os ensaios de flotação do minério fosfático ultrafino cedido por uma empresa de Minas Gerais, através da gelatinização de seis diferentes tipos de amido, em solução aquosa, a temperaturas pré-determinadas por viscoamilografia. Os procedimentos experimentais foram conduzidos no Laboratório de Tratamento de Minérios e Laboratório de Nanomateriais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Unidade Araxá.

É importante ressaltar que a preparação e caracterização do material foram realizadas por Carneiro (2018), sendo que esta amostra possuía 10,77% de P_2O_5 ; 2,93 g/cm³ de densidade e distribuição granulométrica com cerca de 80% das partículas menores que 75 μm . O trabalho citado abordava a flotação do minério fosfático ultrafino utilizando as mesmas espécies de amido, porém, a gelatinização destes foram realizadas através da reação com o hidróxido de sódio.

3.1 Ensaios de flotação

3.1.1 PREPARAÇÃO DOS REAGENTES

Os reagentes utilizados foram o ácido graxo parcialmente hidrogenado (Hidrocol) como coletor, solução de hidróxido de sódio a 10% como regulador de pH e seis diferentes espécimes de amido gelatinizados como depressor, denominados de A1, A2, A3, A4, A5 e A6. Estas amostras de polissacarídeos são derivadas de distintas fontes botânicas, sendo que o A1 é um amido de milho utilizado nas usinas industriais; o A2 é um amido de milho comercial; o A3 é um amido de mandioca modificado; o A4 um amido de milho comercial waxy; o A5 corresponde a um amido de batata residual e por fim, o A6 que se trata de um amido de arroz hidrolisado. Analisando a relação amilopectina/amilose entre eles, obtém-se a seguinte correlação: A4>A6>A3>A2>A1>A5.

Foi realizado a saponificação do Hidrocol, em seguida, foi feito a gelatinização do amido através do efeito térmico. Posteriormente, foram realizados os testes de flotação na célula mecânica da marca *Denver Equipaments Company* com cuba de 1,5 L e volume útil de 1,25 L.

Para aferição das massas dos reagentes, amostras dos minérios e da água foi utilizada a balança semi-analítica da marca *Gehaka* (Modelo BG2000). Para gelatinização dos depressores foi utilizado a placa aquecedora em cerâmica com agitação da marca *Ika* (Modelo C-MAG HS7) e o wattímetro digital de bancada da marca *Politerm* (Modelo POL-43). E para a conferência do pH foi utilizado o pHmetro da marca *Hanna instruments* (Modelo HI 113 pH/ORP Meter).

3.1.1.1 Saponificação do óleo vegetal

Para a saponificação do coletor foram pesados 2,5 g de óleo, 3,93 g de água, 3,58 g de hidróxido de sódio (solução a 10%) e 90 g de água para diluição.

Primeiramente, realizou-se a agitação da mistura óleo, água e hidróxido de sódio contidos em um béquer com auxílio de um agitador mecânico, durante 10 minutos. Após este prazo, adicionou-se a água de diluição e retornou-se à agitação por mais 10 minutos. Houve todo um cuidado para a prática desta ação, visando a obtenção de uma solução homogênea e sem grumos, como ilustrado na Figura 10.

A solução do coletor foi diluída de forma a obter uma concentração de 2,5% (p/p), seguindo-se uma relação de óleo-soda 7:1 e a dosagem utilizada para os ensaios de flotação foi de 250 g/t.

Figura 10 - Solução de coletor preparada.



Fonte: Autoria Própria.

3.1.1.2 Gelatinização dos amidos

A gelatinização dos amidos foi feita através do efeito térmico, em que foram utilizadas temperaturas pré-determinadas, visualizada na Tabela 3, por meio de análises viscoamilográficas em equipamento analisador rápido de viscosidade modelo RVA-4, utilizando o programa *Thermocline for Windows* versão 2.3 *Newport Scientific* Ptv. Ltda. O procedimento adotado seguiu a metodologia n° 162 proposta pelo ICC (*Internacional Association for Cereal Science and Technology*, 1995), utilizando o perfil *standard 1*. A viscosidade foi expressa em RVU (*Rapid Visco Units*) (GUIMARÃES JR., 2015).

Tabela 3 - Temperaturas de gelatinização utilizadas para os seis espécimes de amido.

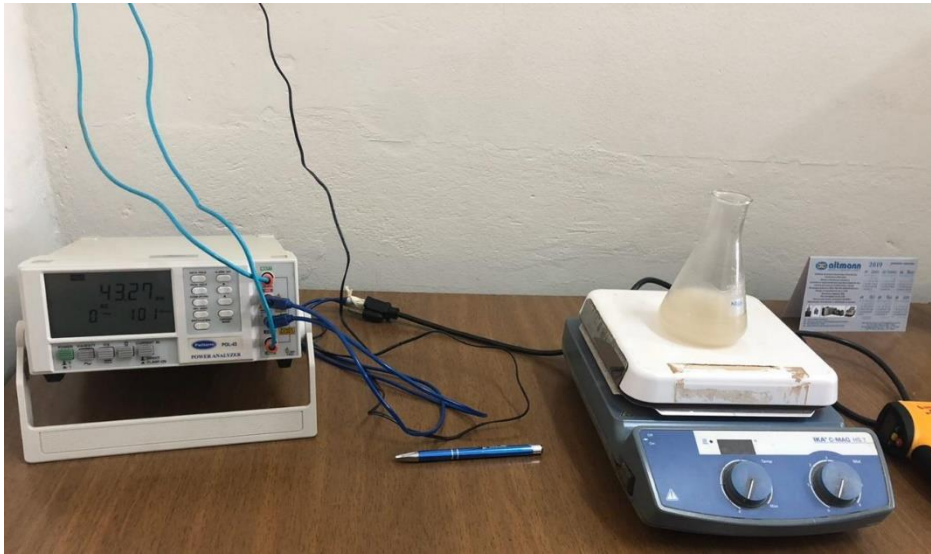
Amido	A1	A2	A3	A4	A5	A6
T_{GEL}(° C)	75,05	76,70	63,80	75,40	73,90	77,10

Fonte: GUIMARÃES JR., 2015.

Para a preparação do depressor, foi pesado 3 g de amostra de amido em um frasco de Erlenmeyer e completou-se o restante do frasco com água destilada até a obtenção de 100 g de solução. Posteriormente, a placa aquecedora com agitação foi acionada para atingir 180° C com uma velocidade de rotação média (entre 1 e 2), portanto, a amostra foi inicialmente aquecida e ao mesmo tempo era agitada através da barra magnética inserida no interior do frasco. A temperatura de aquecimento foi acompanhada através de um termômetro infravermelho digital e um termômetro químico. Portanto, a partir do momento em que a solução atingia a temperatura de gelatinização, esta foi armazenada para resfriamento prévio e posterior manuseio.

O agitador magnético com aquecimento estava conectado à um wattímetro digital de bancada (Figura 11). Logo, durante todo o processo descrito anteriormente, era calculado o gasto energético para a obtenção do produto e o tempo necessário.

Figura 11 - Aquecimento do depressor e acompanhamento do gasto energético vinculado.



Fonte: Autoria Própria.

Todas as soluções preparadas possuíam uma concentração de 3% (p/p) e a dosagem utilizada para os ensaios foi de 750 g/t. Os beckeres de vidro, contendo as soluções gelatinizadas, foram devidamente vedados com vidros de relógio e armazenados em um local que pudessem ficar isolados e em repouso, à temperatura ambiente. Estas soluções ficaram armazenadas durante cinco dias para serem utilizadas novamente em outros testes de flotação, com o objetivo de avaliar a efetividade de atuação do amido em função do tempo.

3.1.2 CONDICIONAMENTO E FLOTAÇÃO

Inicialmente, foi realizado o condicionamento da polpa com o propósito de incentivar o contato dos reagentes com as espécies minerais. Para tal feito, primeiramente foram adicionados o minério e a água de condicionamento na cuba e logo depois, o rotor da célula mecânica, mostrada na Figura 12, foi acionado. Em seguida, adicionou-se o depressor e realizou-se o condicionamento durante 5 minutos. Logo após, adicionou-se o coletor e condicionou-se por 2 minutos, o que permitiu finalmente o acréscimo da água de diluição.

Figura 12 - Célula de flotação Denver.



Fonte: Autoria Própria.

É importante destacar que durante todo o processo descrito anteriormente, desde a adição da água de condicionamento até o acréscimo da água para a flotação, o pH foi regulado, através do pHmetro citado, utilizando-se o hidróxido de sódio para assegurar o valor 9,5 e era registrado a quantidade necessária deste reagente para manutenção do pH, em cada teste.

Para o processo de flotação propriamente dito, foi liberada a entrada de ar na polpa o que possibilitou a geração da espuma mineralizada (Figura 13). A espuma foi raspada até o momento em que a quantidade das bolhas começara a diminuir e apresentava uma aparência desmineralizada. Após esta fase em cada teste, o flotado e o afundado foram levados para a estufa à 100° C por 24 horas e posteriormente foram pesados. Por fim, as amostras secas devidamente homogeneizadas e quarteadas foram encaminhadas para a análise química, no Laboratório de Engenharia de Materiais do CEFET-MG, em Belo Horizonte.

Figura 13 - Processo de retirada da espuma mineralizada.



Fonte: Autorial Própria.

Em resumo, os parâmetros utilizados para realização dos ensaios de flotação podem ser descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros para os ensaios de flotação.

% Sólidos no condicionamento	50
% Sólidos na flotação	25
Massa de sólidos (g)	374,37
Volume de água para condicionamento (mL)	374,37
Volume de água para flotação (mL)	748,74
Massa de solução de coletor (g)	3,75
Massa de solução de depressor (g)	9,38

Fonte: Autorial Própria.

Os testes de flotação descritos anteriormente foram realizados primeiramente no dia 09/07/2019, depois se repetiram no dia 11/07/2019 e por fim, também no dia 13/07/2019, destacando que todos os ensaios foram feitos utilizando

o amido gelatinizado no dia 09/07/2019 para avaliar o seu grau de retrogradação. Todavia, este contexto não se repetiu para o coletor, uma vez que a saponificação do óleo vegetal foi realizada para os três dias distintos.

3.2 Avaliação dos resultados

A partir da massa da alimentação (A) e da massa do concentrado (C) obtida em cada ensaio, a recuperação mássica ($R_{MÁS}$) foi calculada a partir da seguinte equação:

$$R_{MÁS} = \frac{C}{A} * 100 \quad \text{(Equação I)}$$

A partir dos resultados das análises químicas, seria possível o cálculo da recuperação metalúrgica (R_{MET}) através da Equação II.

$$R_{MET} = \frac{Cc}{Aa} * 100 \quad \text{(Equação II)}$$

Sendo:

c = teor no concentrado;

a = teor na alimentação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussão do estudo feito para avaliar o efeito de diferentes métodos de gelatinização na flotação do minério fosfático ultrafino e o grau de retrogradação do depressor.

4.1 Gasto energético para preparação do amido

Através da realização do processo de gelatinização do amido, sendo controlado pelo equipamento wattímetro, foi possível avaliar o consumo energético para a preparação de cada amido, em quilowatt-hora (kWh) e o tempo necessário para atingir a respectiva temperatura de gelatinização em minutos (Tabela 5).

Tabela 5 - Variáveis obtidas pelo equipamento wattímetro.

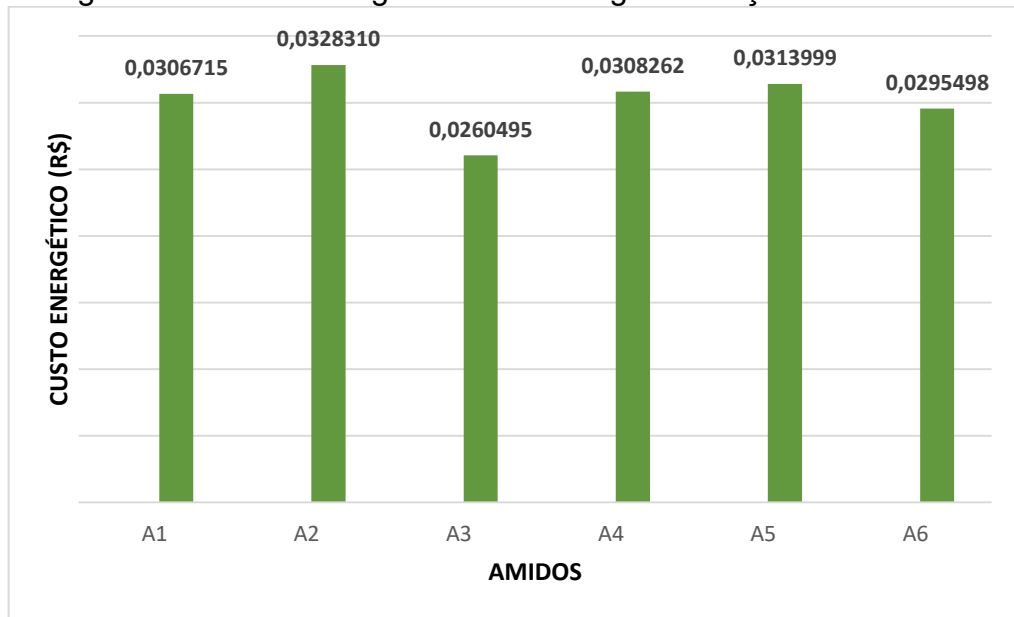
Amido	Consumo energético (kWh)	T _{GEL} (°C)	Tempo (min)
A1	0,04758	75,05	11,20
A2	0,05093	76,70	12,20
A3	0,04041	63,80	9,40
A4	0,04782	75,40	11,20
A5	0,04871	73,90	11,40
A6	0,04584	77,10	11,30

Fonte: Autoria Própria.

O gráfico visualizado na Figura 14 foi plotado com o objetivo de comparar o custo energético de gelatinização para os seis amidos, a partir da tarifa nacional residencial de R\$ 0,64463 segundo a Companhia Energética de Minas Gerais S.A. (CEMIG).

Analisando a Tabela 5 e a Figura 14, nota-se que o amido de milho comercial (A2) foi o responsável por gerar maior gasto energético, igual a 0,05093 kWh, portanto necessita-se de maior custo igual a R\$ 0,0328 e necessitou de um maior tempo de atuação para atingir a temperatura de gelatinização de 76,70° C, igual a 12,20 minutos. Enquanto isso, o menor gasto energético e menor tempo de aquecimento ocorreu com o amido de mandioca modificado (A3), cujo gasto energético para atingir 63,80° C foi igual a 0,04041 kWh durante 9,40 minutos, exigindo um custo igual a R\$ 0,0265.

Figura 14 - Custo energético durante a gelatinização dos amidos.



Fonte: Autoria Própria.

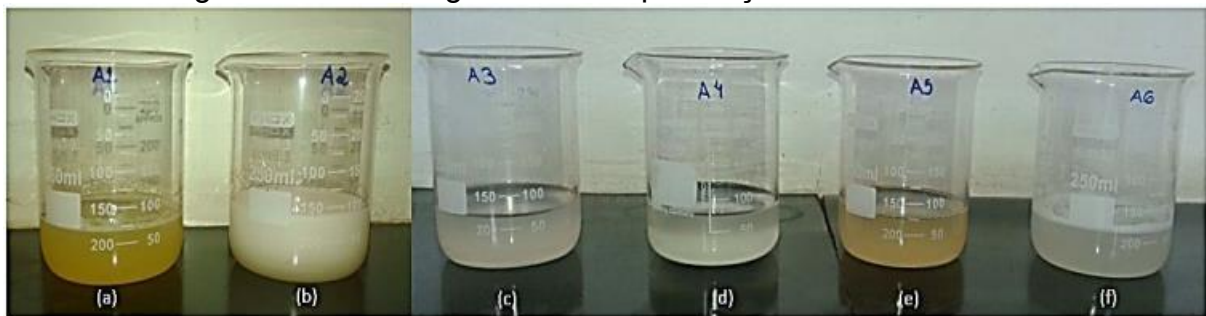
Analisando o trabalho realizado por Carneiro (2018), a gelatinização do depressor ocorreu com 12,50 g de NaOH, para uma concentração de 3% e dosagem de 500 g/t. Tendo em vista que o preço do NaOH está em torno de US \$ 550,00 por tonelada como apontado por Silva *et al.* (2017) e o dólar americano atualmente equivale a R\$ 5,67, o gasto mínimo foi de, aproximadamente, R\$ 0,03899. Tal valor não abrange o gasto energético necessário para o processo citado. Portanto, o custo do processo de gelatinização por efeito térmico comprova-se ser menor comparado ao método por adição de soda cáustica, já que todos os valores para os diferentes amidos, visualizados na Figura 14, são menores que R\$ 0,03899.

4.2 Amidos Gelatinizados

Após a preparação dos depressores, estes foram devidamente armazenados para que pudessem resfriar por alguns minutos, e assim serem utilizados no processo de flotação do minério fosfático ultrafino. É possível visualizar a aparência distinta entre os amidos gelatinizados por adição de soda elaborado por Carneiro (2018) ilustrado na Figura 15 e pelo efeito térmico visualizado na Figura 16.

Analisando a Figura 15, é possível visualizar que o amido de milho utilizado no processo de flotação industrial (A1) e o amido de batata residual (A5) apresentam uma coloração amarelada, apresentado um aspecto significativamente distinto comparado com os demais. Enquanto o amido de milho comercial (A2) tem uma aparência opaca comparada com os outros espécimes.

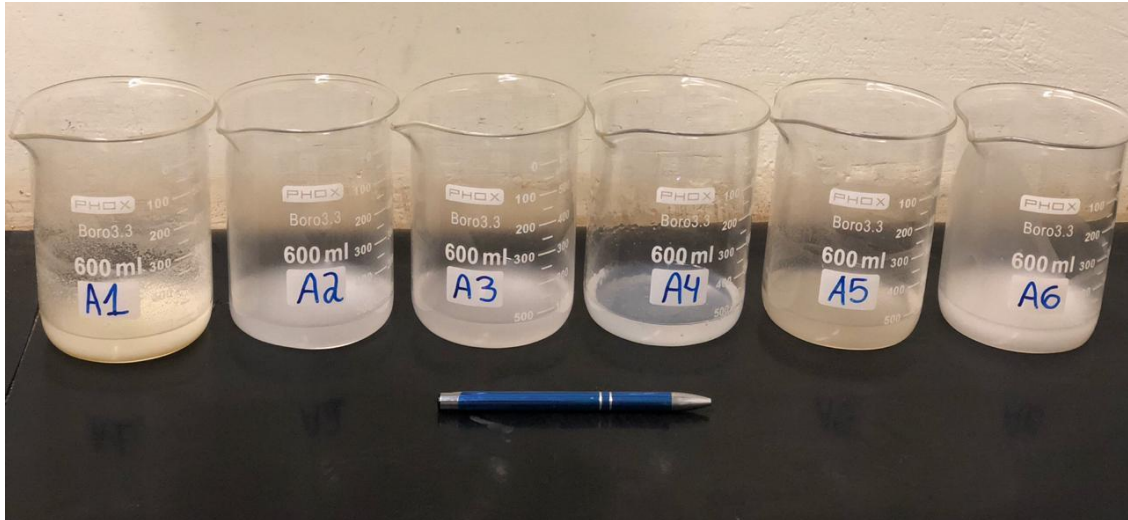
Figura 15 - Amidos gelatinizados por adição de soda cáustica.



Fonte: CARNEIRO, 2018.

Por outro lado, os amidos gelatinizados por efeito térmico mantiveram basicamente a aparência entre eles comparado com os amidos gelatinizados por adição de soda cáustica. No caso deste trabalho, os amidos A1 e A5 também adquiriram uma coloração levemente amarelada em relação aos demais, enquanto o amido de arroz hidrolisado (A6) obteve um aspecto opaco comparado com os demais, como pode ser visualizado na Figura 16.

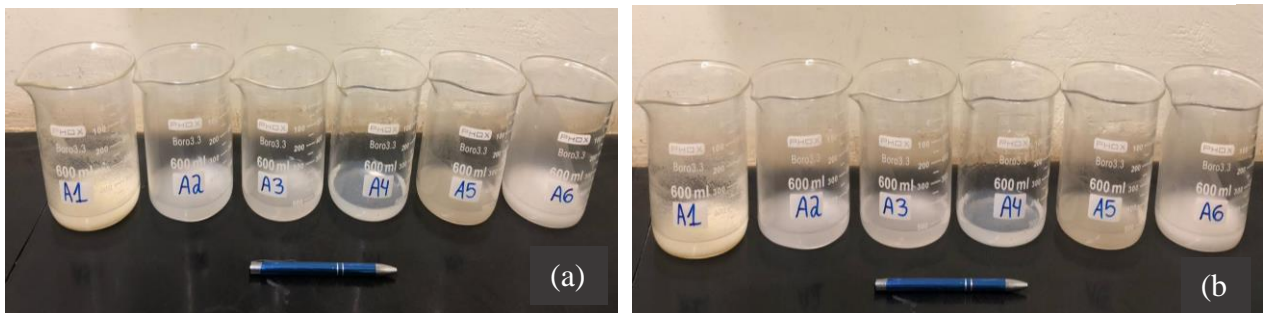
Figura 16 - Amidos gelatinizados por efeito térmico.



Fonte: Autoria Própria.

Os amidos gelatinizados foram devidamente armazenados durante dois dias após a preparação deles, e posteriormente por mais dois dias. Foram realizados três testes de flotação do minério fosfático ultrafino para avaliar o grau de retrogradação dos amidos, sendo o primeiro teste feito no mesmo dia de preparação do depressor, o segundo teste foi realizado utilizando o depressor depois de dois dias de armazenamento, e por fim, o terceiro teste foi efetuado utilizando o depressor após quatro dias armazenados. Diante deste contexto, é importante ressaltar que a aparência dos amidos gelatinizados se manteve basicamente a mesma daquela visualizada no primeiro dia de teste (Figura 16), conforme é ilustrado na Figura 17. Houve apenas diferenciação quanto ao odor, sendo que com o passar dos dias, o mau cheiro começou a intensificar, principalmente no caso do amido de batata residual (A5).

Figura 17 - Aparência dos amidos gelatinizados para os testes 2 e 3: (a) Armazenados durante dois dias; (b) Armazenados durante quatro dias.



Fonte: Autoria Própria.

4.3 Ensaio de flotação

4.3.1 ANÁLISE QUANTITATIVA

Através da pesagem das massas obtidas dos produtos de flotação foi possível calcular as recuperações mássicas utilizando a equação I, para todos os testes realizados em três dias distintos. Além disso, pôde-se mensurar o gasto do hidróxido de sódio durante o processo de flotação para todos os cenários.

Neste sentido, percebe-se que no primeiro dia da realização dos testes (Tabela 6), o amido de maior eficiência foi o amido de milho comercial (A2), que obteve um concentrado com a maior recuperação mássica média e uma quantidade de hidróxido de sódio relativamente mediana, cujo valores são 26,24% e 0,71 g, respectivamente. Em segundo lugar, se visualiza o amido de batata residual (A5), que produziu um concentrado com recuperação mássica de 25,50% e foi o responsável pela menor quantidade do regulador de pH, igual a 0,54 g. A utilização do amido de batata residual (A5) apresenta uma vantagem em relação aos demais, uma vez que se trata de um resíduo industrialmente descartado, permitindo o reaproveitamento econômico do mesmo, e além disso, pelo fato de ser mais fácil o seu descarte à natureza, já que se necessitou de menor quantidade do reagente hidróxido de sódio. Além disso, as duas espécies de amido destacadas apresentam recuperação mássica superior ao valor obtido pelo amido de milho A1, sendo este utilizado na indústria mineral.

Em contrapartida, os piores resultados foram obtidos pelo amido de arroz hidrolisado (A6), o que pode acusar a depressão do mineral de interesse (apatita) além dos minerais ganga, indo contra a finalidade essencial do reagente. O valor da recuperação mássica média para este amido foi de 11,46% e o gasto médio de NaOH foi de 0,91 g.

É importante ressaltar que no trabalho realizado por Carneiro (2018) foi avaliado a efetividade dos mesmos amidos na flotação do minério fosfático ultrafino, numa dosagem de 500 g/t, sendo que os amidos mais eficientes, quanto à recuperação mássica, também foram os amidos de milho comercial (A2) e de batata residual (A5), cujo valores foram 25,18% e 25,73%, respectivamente. Enquanto os piores valores de recuperação mássica média e recuperação metalúrgica média

ocorrem com o amido de arroz hidrolisado (A6), cujo valores foram respectivamente 19,90% e 49,20%.

Tabela 6 - Resultados de recuperação mássica e quantidade utilizada de NaOH para o teste 1.

Depressor	Alimentação (g)	Amostra	Massa (g)	Rec. Mássica (%)	Rec. Mássica Média (%)	Gasto de NaOH (g)	Gasto médio de NaOH (g)
A1	370,06	C1	80,75	21,82	22,09	0,60	0,70
		R1	289,31	-			
	370,33	C2	82,77	22,35		0,79	
		R2	287,56	-			
A2	371,29	C1	97,78	26,34	26,24	0,63	0,71
		R1	273,51	-			
	370,96	C2	96,98	26,14		0,78	
		R2	273,98	-			
A3	370,96	C1	93,94	25,32	25,01	0,80	0,76
		R1	277,02	-			
	370,83	C2	91,61	24,70		0,72	
		R2	279,22	-			
A4	371,21	C1	93,23	25,12	25,13	0,77	0,71
		R1	277,98	-			
	367,91	C2	92,53	25,15		0,64	
		R2	275,38	-			
A5	368,29	C1	87,16	23,67	25,50	0,47	0,54
		R1	281,13	-			
	367,12	C2	100,33	27,33		0,61	
		R2	266,79	-			
A6	371,37	C1	41,55	11,19	11,46	0,94	0,91
		R1	329,82	-			
	371,11	C2	43,52	11,73		0,87	
		R2	327,59	-			

Fonte: Autoria Própria.

Após a realização do teste 1, os amidos foram devidamente armazenados durante dois dias, o que possibilitou a realização do teste 2. Avaliando o cenário do terceiro dia dos ensaios de flotação (Tabela 7), percebe-se que o amido de maior eficiência foi o amido de batata residual (A5), que obteve um concentrado com a maior recuperação mássica média e a menor quantidade de hidróxido de sódio, cujo valores são 27,86% e 0,54 g, respectivamente. Em segundo lugar, se visualiza o amido de milho comercial (A2), que produziu um concentrado com recuperação mássica média

de 26,12%, por outro lado foi o responsável pela maior quantidade de hidróxido de sódio utilizada, igual a 0,91 g.

Repetindo o primeiro cenário, o amido que obteve um concentrado com a menor recuperação mássica média foi o amido de arroz hidrolisado (A6) igual a 9,54% e necessitou de um valor médio de hidróxido de sódio utilizado, sendo 0,74 g.

Tabela 7 - Resultados de recuperação mássica e quantidade utilizada de NaOH para o teste 2.

Depressor	Alimentação (g)	Amostra	Massa (g)	Rec. Mássica (%)	Rec. Mássica Média (%)	Gasto de NaOH (g)	Gasto médio de NaOH (g)
A1	371,58	C1	95,69	25,75	25,36	0,60	0,61
		R1	275,89	-			
	370,85	C2	92,60	24,97			
		R2	278,25	-			
A2	371,10	C1	95,87	25,83	26,12	0,96	0,91
		R1	275,23	-			
	372,03	C2	98,24	26,41			
		R2	273,79	-			
A3	371,98	C1	88,51	23,79	23,46	0,87	0,84
		R1	283,47	-			
	371,80	C2	85,98	23,13			
		R2	285,82	-			
A4	371,31	C1	88,34	23,79	23,80	0,68	0,67
		R1	282,97	-			
	368,22	C2	87,67	23,81			
		R2	280,55	-			
A5	370,70	C1	98,86	26,67	27,86	0,58	0,54
		R1	271,84	-			
	368,87	C2	107,17	29,05			
		R2	261,7	-			
A6	372,77	C1	36,75	9,86	9,54	0,67	0,74
		R1	336,02	-			
	369,91	C2	34,13	9,23			
		R2	335,78	-			

Fonte: Autoria Própria.

Novamente após a realização do segundo teste, repetiu-se o processo de armazenamento dos amidos por mais dois dias. Avaliando o contexto do quinto dia dos ensaios de flotação (Tabela 8), nota-se que novamente o amido de batata residual (A5) foi o responsável por obter um concentrado com a maior recuperação mássica média e a menor quantidade de hidróxido de sódio, cujo valores são 30,04% e 0,61 g,

respectivamente. Em segundo lugar, houve uma mudança de cenário, já que o amido de mandioca modificado (A3) teve um aumento na recuperação mássica média e foi o responsável pela maior quantidade de hidróxido de sódio utilizada iguais a 25,38% e 1,24 g, respectivamente.

Seguindo a linha dos testes anteriores, o amido de arroz hidrolisado (A6) foi o responsável pela menor recuperação mássica média igual a 6,68% e visto como o segundo amido que necessitou de uma maior quantidade de hidróxido de sódio igual 1,11 g.

Tabela 8 - Resultados de recuperação mássica e quantidade utilizada de NaOH para o teste 3.

Depressor	Alimentação (g)	Amostra	Massa (g)	Rec. Mássica (%)	Rec. Mássica Média (%)	Gasto de NaOH (g)	Gasto médio de NaOH (g)
A1	370,89	C1	84,38	22,75	22,81	1,10	0,95
		R1	286,51	-			
	368,92	C2	84,35	22,86		0,80	
		R2	284,57	-			
A2	370,11	C1	89,98	24,31	23,92	0,68	0,83
		R1	280,13	-			
	368,33	C2	86,66	23,53		0,98	
		R2	281,67	-			
A3	371,83	C1	95,05	25,56	25,38	1,27	1,24
		R1	276,78	-			
	371,20	C2	93,52	25,19		1,20	
		R2	277,68	-			
A4	365,00	C1	84,08	23,04	23,07	0,81	1,06
		R1	280,92	-			
	363,74	C2	84,06	23,11		1,31	
		R2	279,68	-			
A5	358,65	C1	108,11	30,14	30,04	0,61	0,61
		R1	250,54	-			
	358,77	C2	107,39	29,93		0,60	
		R2	251,38	-			
A6	371,88	C1	26,42	7,10	6,68	1,08	1,11
		R1	345,46	-			
	371,34	C2	23,21	6,25		1,13	
		R2	348,13	-			

Fonte: Autoria Própria.

A partir dos dados detalhados acima, não foi possível entrar no mérito da seletividade, uma vez que os teores dos minerais constituintes não são conhecidos.

Tal limitação se deve ao fato de que as análises químicas não foram realizadas, devido a dois agravantes. Os testes foram realizados no ano de 2019 e encaminhados para o laboratório de Caracterização de Engenharia de Materiais do CEFET/MG, em Belo Horizonte que estava planejado iniciar as análises no ano de 2020, porém no início do ano de 2020 o país enfrentou a primeira onda do corona vírus COVID-19, fazendo com que todas as atividades presenciais fossem paralisadas até controle da situação. Porém a situação continuou a se agravar, postergando todas os trabalhos presenciais da instituição e foi decretado o ensino remoto pelo Ministério da Educação. Com o passar do tempo, no início de 2021, alguns setores retomaram os trabalhos tomando todas as medidas sanitárias, portanto retornou-se o contato para a realização das análises química dos testes. Entretanto, a equipe técnica responsável pelo laboratório relatou que a principal peça constituinte do espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por energia dispersiva estava danificada e o tempo de conserto poderia ser longo, uma vez que a compra de uma nova peça tem elevado custo.

4.3.2 ANÁLISE DA RETROGRADAÇÃO

Como citado anteriormente, após a realização do teste 1, os amidos foram devidamente armazenados durante dois dias, sendo o teste 2 realizado após este intervalo de tempo, e por fim, estes amidos foram novamente armazenados por mais dois dias para a realização do teste 3. Foi elaborado o roteiro citado com o objetivo de avaliar o grau da retrogradação do amido durante este intervalo de tempo.

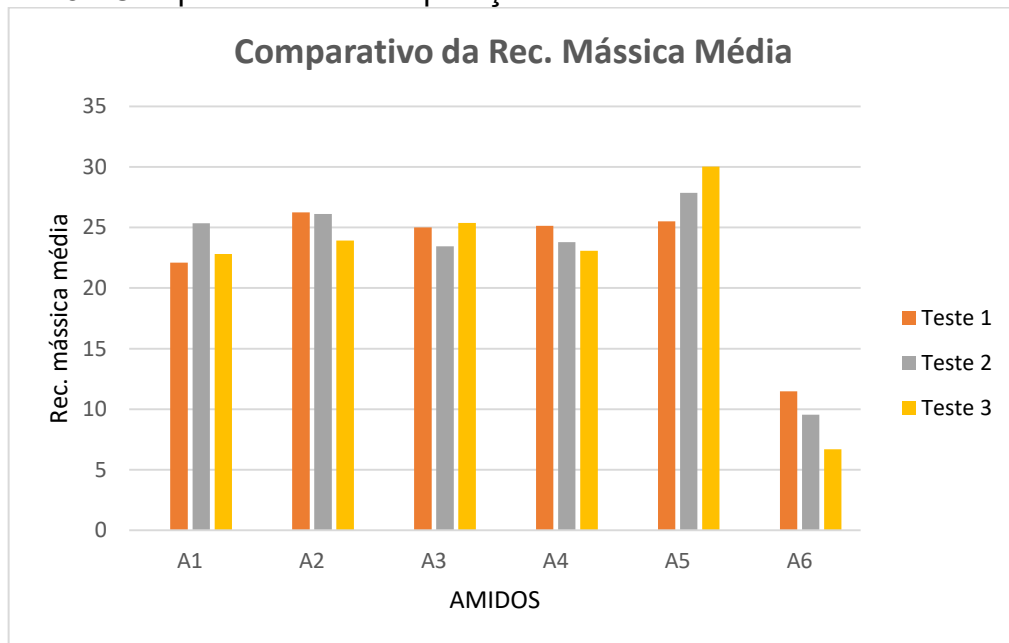
A partir dos resultados obtidos para os três testes foi elaborado o gráfico visualizado na Figura 18, em que é possível visualizar o comportamento da recuperação mássica média com o passar dos dias.

Comparando os resultados de recuperação mássica entre o primeiro e segundo cenário, os amidos de milho comercial (A2), de mandioca modificado (A3), de milho comercial waxy (A4) e o de arroz hidrolisado (A6) apresentaram uma diminuição nos seus valores. Por outro lado, os amidos de milho utilizado na indústria mineral (A1) e o de batata residual (A5) apresentaram um aumento nos valores das recuperações mássicas, o que pode ser justificado pela ineficácia da depressão específica dos minerais ganga, permitindo a flotação de todos os minerais sem haver seletividade entre a sua atuação.

Analisando os resultados de recuperação mássica para o terceiro cenário, percebe-se que os amidos de milho comercial (A2), de milho comercial waxy (A4) e o de arroz hidrolisado (A6) continuaram a apresentar uma diminuição nos valores de recuperação mássica média. Enquanto, a recuperação mássica média do amido de batata residual (A5) segue elevando.

Há duas observações vistas ao analisar os três cenários, sendo que os amidos A1 e A3 não seguiram a tendência durante a sequência dos dias, ou seja, a recuperação mássica média do amido de milho utilizado na industrial mineral (A1) apresentou um aumento do teste 1 para o teste 2, mas houve uma diminuição do seu valor novamente para o teste 3; e no caso do amido de mandioca modificado (A3) houve atuação reversa, ou seja, a recuperação mássica média do amido A3 diminuiu do teste 1 para o teste 2, porém ocorreu um aumento do seu valor para o teste 3.

Figura 18 - Comparativo das recuperações mássicas média entre os três testes.



Fonte: Autoria Própria.

Portanto, analisando o contexto geral da Figura 18, é possível prever que o amido de batata residual (A5) sofreu a retrogradação, uma vez que as recuperações mássicas médias aumentaram com o passar dos dias. Este comportamento foi esperado, já que a retrogradação limita o efeito do depressor, fazendo com que o coletor hidrofobize maior quantidade de partículas minerais e conseqüentemente, ocorre a coleta destas partículas minerais pelas bolhas de ar sem haver a seletividade precisa.

Entretanto, os amidos de milho comercial waxy (A4) e o de arroz hidrolisado (A6) apresentaram um comportamento reverso do esperado. Tal fato pode ser justificado pelo efeito de interação entre o uso dos reagentes, a partir do momento que iniciou a retrogradação dos amidos, mas não é possível confirmar esta justificativa a partir dos dados analisados. Enquanto o amido de milho utilizado no processo de flotação industrial (A1), o amido de milho comercial (A2) e o amido de mandioca modificado (A3) não seguiram uma tendência em seus valores, não sendo possível visualizar o efeito da retrogradação nestas situações.

5 CONCLUSÕES

O estudo realizado para avaliar o efeito do método de gelatinização de amido por efeito térmico na flotação de minério fosfático ultrafino resultou nas seguintes conclusões:

Em relação ao custo energético para a gelatinização dos amidos, os valores ficaram entre R\$ 0,0265 e R\$ 0,0328, sendo que o amido de milho comercial (A2) obteve um maior gasto energético para atingir a sua temperatura de gelatinização, enquanto o amido de mandioca modificado (A3) foi o responsável pelo menor gasto energético. Comparando os dois métodos de gelatinização, por efeito térmico e por adição de soda, a rota de enfoque do trabalho provou ser a mais econômica já que o valor da técnica aplicada industrialmente foi em torno de R\$ 0,03899 fora o acréscimo do custo energético para este.

Ao comparar a aparência dos amidos gelatinizados entre os dois métodos supracitados, o amido de milho utilizado na indústria mineral (A1) e o amido de batata residual (A5) gelatinizados por adição de soda apresentaram uma coloração amarelada mais intensa do que os mesmos gelatinizados por efeito térmico. Analisando a aparência dos amidos para os três testes, com o passar do tempo, os amidos mantiveram basicamente a coloração entre eles, destacando apenas o surgimento de um mau cheiro mais intensificado, especialmente no caso do amido de batata residual (A5).

Com relação aos ensaios de flotação para o teste realizado no primeiro dia de preparação do depressor, as recuperações mássicas médias ficaram em torno de 11,46% e 26,24%. Os amidos de milho comercial (A2) e o de batata residual (A5) apresentaram os maiores valores e o amido de arroz hidrolisado (A6) foi responsável pelo pior resultado, assim como ocorreu com os resultados obtidos pela gelatinização do amido por adição do hidróxido de sódio. No teste 2, o cenário se repetiu ao primeiro, tendo destaque aos maiores valores para os amidos A5 e A2, e a pior atuação novamente para o amido A6. No teste 3, o amido A5 se manteve em destaque, mas nesse caso junto a ele, teve o realce do amido de mandioca modificado (A3), enquanto, novamente o amido A6 mantém a sua posição como o de pior resultado. Os valores de gasto médio de NaOH para todos os amidos entre os três testes não apresentaram uma divergência significativa.

Por fim, analisando todas as recuperações mássicas médias, foi possível concluir que o amido de batata residual (A5) sofreu a retrogradação, já que os valores das recuperações aumentaram no decorrer dos dias, indicando ineficácia de depressão dos minerais de ganga, pois pode estar ocorrendo a flotação de todos os minerais sem haver seletividade na sua atuação. Por outro lado, as recuperações mássicas média dos amidos de milho comercial waxy (A4) e o de arroz hidrolisado (A6) diminuíram com o passar do tempo, sendo um fato curioso já que não era o esperado. Além disso, as recuperações mássicas dos amidos de milho utilizado no processo de flotação industrial (A1), de milho comercial (A2) e o de mandioca modificado (A3) não apresentaram um padrão nos seus valores, impossibilitando verificar existência de retrogradação nestes contextos.

REFERÊNCIAS

- ABOUZEID, A. M. **Physical and thermal treatment of phosphates ores** - An overview, *International Journal of Mineral Processing*, v. 85, p. 59-84, 2008.
- AGUIAR, M. A. M. **Clatratos na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 108 f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.
- ARAUJO, A. C.; PERES, A. E. C.; VIANA, P. R. M. Reagentes na flotação de minérios de ferro. In: 59. Congresso Anual da ABM Internacional, São Paulo. Anais do 59º Congresso Anual da ABM. São Paulo: ABM, p. 4815-4823, 2004.
- AQUINO, J. A.; OLIVEIRA, M. L. M. FERNADES, M. D. Flotação em coluna. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 515-556.
- BALTAR, C. A. M. **Flotação no Tratamento de Minério**. Recife: [s.n.], 2008. 209 p.
- BARROS, L. A. F. **Caracterização tecnológica de minério fosfático de Salitre Patrocínio/MG**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- BULATOVIC, S. M. **Handbook of flotation reagents: Chemistry and theory and practice**. V. 1, 1ed. Amsterdam, 2007.
- CARNEIRO, A. A. **Emprego de Amidos como Depressores na Flotação Aniônica Direta de Minério Fosfático Sílico-Carbonatado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2018.
- CHAVES, A. P. Máquinas de flotação. In: CHAVES, A. P. (Org.). **A flotação no Brasil**. São Paulo: Signus, 2006. p. 31-44.
- CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S.; BRAGA, P. F. A. Flotação. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 465-513.
- CHULA, A. M. D. **Caracterização mineralógica do minério fosfático da Mina de Tapira/MG**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P. da. **Estrutura de grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas**. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 39, n. 3, p. 945-954. 2009.
- DIAS, A. B. **Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis obtidos de amido e de farinha de arroz**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Alimentos, 2008.

IWASAKI, I.; LAI, R. W. M. **Starches and starch products as depressants in soap flotation or activated sílica from iron ores.** Trans. AIME, 226, p. 364-372. 1965.

GUIMARÃES, R. C.; PERES, A. E. C. **Máquina de flotação.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo. 1995.

GUIMARAES, R.C. **Aspectos Relevantes da Separação de Barita em Minérios Fosfáticos através de Flotação.** Tese (Doutorado) Belo Horizonte, UFMG, 1997.

GUIMARÃES JR., M. **Desenvolvimento de Bionanocompósitos Utilizando Nanofibras Celulósicas de Bambu como Agente de Reforço em Matriz de Amido e Álcool Polivinílico.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

GUIMARÃES, R. C.; ARAUJO, A. C.; PERES, A. E. C. **Reagents in igneous phosphate ores flotation.** Minerals Engineering, v. 18, p. 199-204. 2005.

HANNA, M. S.; SOMASUNDARAN, P. 1976. **Flotation of Salt-Type Minerals.** Flotation, A. M. Gaudin Memorial Volume, Baltimore: AIME, v. 1, New York, p. 197-272.

JAROWENKO, W. Starch based adhesives. In: **SKEIST, I. Handbook of Adhesives.** 2. ed. New York, Van Nostrand Reinhold Co., p 192-211, 1997.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. V.; MONTE, M.B.M.; NASCIMENTO, M. Agrominerais - Fosfato. In: **Rochas e Minerais Industriais.** 2. ed. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 2008, p. 141-180.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios.** 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010. 963 p.

LUZ, A. B.; COSTA, L.; POSSA, M.; ALMEIDA, S. **Tratamento de Minérios.** 3. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002.

KIEKOW, L. M. **Extração, Purificação e Caracterização do Amido de Arroz utilizando o Método Al-Hakkak combinado com Microfiltração.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação (Mestrado em Engenharia), 2014.

MONTE, M. B. M.; PERES, A. E. C. Química de superfície na flotação. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios.** 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 397-461.

NUNES, A. P. L.; PERES, A. E. C. **Reagentes depressores de carbonatos: uma revisão.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2011.

OLIVEIRA, M. S. **Flotação em Coluna do Rejeito Remoído do Processo de Concentração da Apatita.** Uberlândia: Faculdade de Engenharia Química da UFU,

2004. 131 p. Dissertação (Mestrado, Concentração e Desenvolvimento de Processos).

OLIVEIRA, M. S. **Minério Fosfático Sílico-Carbonatado: Estudo Fundamental**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

OLIVEIRA, M. S.; SOUZA, M. D. **Tratamento de Minérios**. CEFET/MG. Araxá, 2012. (Apostila).

PERES, A. E. D.; ARAUJO, A. C. A flotação como operação unitária no tratamento de minérios. In: CHAVES, A. P. **A flotação no Brasil**. São Paulo, 2013. p 9-39.

REIS, R. L. **Propriedades e aplicações do griz de milho na flotação catiônica reversa de minérios itabiríticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 1987.

RÓZ, A. L. **Preparação e caracterização de amidos termoplásticos**. São Carlos: Universidade de São Paulo, Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), 2004.

SANTANA, R. C. **Análise da Influência do Tamanho da Partícula na Flotação da Apatita em Coluna**. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Química da UFU, 2007. 166 p. Dissertação (Mestrado, Concentração e Desenvolvimento de Processos Químicos).

SANTOS, A. P. **Extração e caracterização do amido do fruto-do-lobo (*Solanum lycocarpum* St. Hil) e elaboração de filmes biodegradáveis**. Anápolis: Universidade Estadual de Goiás, Curso de Mestrado em Ciências moleculares, 2009.

SANTOS, M. A. **Estudo da Influência de Íons Contaminantes na Flotação de Apatita em Coluna**. 2010. 149 p. Dissertação (Mestrado, Concentração e Desenvolvimento de Processos Químicos) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SILVA, A. A. M. S. **Estudo sobre a Flotação de Silicatos em Coluna para o Processo de Concentração da Apatita**. Uberlândia: Faculdade de Engenharia Química da UFU, 2005. 121 p. Dissertação (Mestrado em Concentração e Desenvolvimento de Processos Químicos).

SILVA, L. P. **Estudo da Utilização de Coluna de Flotação nas Etapas Cleaner e Recleaner de Concentração de Minério Fosfático**. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2013.

SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S.; PERES, A. E. C.; SOUSA, D. N. **Temperature influence in cornstarch gelatinization for froth flotation**. REM, Internacional Engineering Journal, Ouro Preto, 70(2), p. 231-235, 2007.

SOUZA, A. L. DE; ALBUQUERQUE, R.O. DE; LAMEIRAS, F.S.; PRAES, P. E.; PERES, A. E. C. **Use Of Depressants In The Direct Flotation Of A Silicate-Carbonate Phosphate Ore**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 67(2), 191-196, 2014.

SOUZA, A. E.; FONSECA, D. S. Fosfato. In: NERY, M. A. C. **Sumário Mineral 2009**. v. 29, 2010. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-2-fosfato>> Acesso em: 10/04/2019.

SOUZA, A. C. de; MAGALHÃES, D. G. **Influência do grau de gelatinização do amido de milho no processo de flotação reversa de minério de ferro**. Tecnol. Metal. Mater. Miner, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 141-147. 2016.

SUTULOV, A. **Flotacion de minerales**. Concepción, Instituto de Investigaciones Tecnológicas, Universidad de Concepción, 1963, p. 62-66.

TAKATA, L. A.; VALLE, T. Flotação em coluna. In: CHAVES, A. P. **A flotação no Brasil**. São Paulo, 2013. p. 65-102.

TEIXEIRA, Eliangela de Moraes. **Utilização de amido de mandioca na preparação de novos materiais termoplásticos**. 2007. 171 p. Tese (Doutorado em Físico-Química) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

TOLEDO, M. C. M.; PEREIRA, V. P. **A variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos**. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, v. 22, n. 1-2, p. 27-64, 2001.

VALDEJÃO, R. G.; JANSON, J. A. **Propriedades dos amidos e suas aplicações básicas na industrial papelreira**. O Papel, São Paulo, p. 50-61, ago. 1996.

VALENTE NETO, F. C. **Apostila de mineralogia e petrografia**. Araxá: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá. 2008. Apostila.

VICENTINI, N. M. **Elaboração e caracterização de filmes comestíveis à base de fécula de mandioca para uso em pós-colheita**. 2003. 198 p. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Campus de Botocatu, Botocatu. 2003.

WILLS, B. A. **Mineral Processing Technology**. 2. ed. Pergamon. 1981.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T.J. **Wills' Mineral Processing Technology. An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. Ed. Butterworth-Heinemann, 2006. 7. ed. 444 p.