

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO ORGANIZACIONAL

DÉBORA NASCIMENTO SOUSA

DEPRESSORES ALTERNATIVOS NA FLOTAÇÃO CATIÔNICA REVERSA DE
MINÉRIO DE FERRO

CATALÃO / GO

Março 2016

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

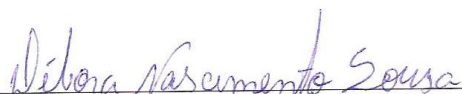
Nome completo do autor: Débora Nascimento Sousa

Título do trabalho: DEPRESSORES ALTERNATIVOS NA FLOTAÇÃO CATIONICA REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento **SIM** **NÃO**¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do (a) autor (a)

Data: 02 / 11 / 2016

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

DÉBORA NASCIMENTO SOUSA

DEPRESSORES ALTERNATIVOS NA FLOTAÇÃO CATIÔNICA REVERSA DE
MINÉRIO DE FERRO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão Organizacional na linha de pesquisa Inovação, Desenvolvimento e Tecnologia.

Orientador: Dr. André Carlos Silva

CATALÃO / GO

Março 2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Nascimento Sousa, Débora

Depressores Alternativos na Flotação Catiônica Reversa de Minério de Ferro [manuscrito] / Débora Nascimento Sousa. - 2016.

CVI, 106 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. André Carlos Silva.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia, Catalão, Programa de Pós Graduação em Gestão Organizacional (profissional), Catalão, 2016.

Bibliografia. Anexos.

Inclui siglas, fotografias, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Minério de Ferro. 2. Depressores. 3. Influência de Dosagens. I. Carlos Silva, André, orient. II. Título.

CDU 622



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
REGIONAL CATALÃO

MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO ORGANIZACIONAL
ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE EXAME DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO MESTRADO PROFISSIONAL NO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM GESTÃO ORGANIZACIONAL DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE GOIÁS.

No dia dez (10) de março de 2016, às 08:00 horas, na sala 215, Prédio Multifuncional, Regional Catalão da Universidade Federal de Goiás, **DÉBORA NASCIMENTO SOUSA**, discente do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Gestão Organizacional (52001016061P6) da Universidade Federal de Goiás, expôs, em Sessão Pública o exame de defesa da dissertação intitulada **DEPRESSORES ALTERNATIVOS NA FLOTAÇÃO CATIONICA REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO**, para Comissão de Avaliação composta pelos (as) docentes: **Dr. André Carlos Silva** (Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional/Universidade Federal de Goiás, Presidente da Comissão), **Dr. Nilson José Fernandes** (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química/UFU, Membro Convidado Externo) e **Dr. Geraldo Sadovama Leal** (Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional/Universidade Federal de Goiás, Membro Convidado Interno). O trabalho da Comissão de Avaliação foi conduzido pelo docente Presidente que, inicialmente, após apresentar os docentes integrantes da Comissão, concedeu 30 minutos o (a) discente candidato (a) para que este (a) expusesse o trabalho. Após a exposição, o docente Presidente concedeu a palavra a cada membro convidado da Comissão para que estes argüissem o (a) discente candidato (a). Após o encerramento das argüições, a Comissão de Avaliação do trabalho de defesa avaliou a dissertação e o desempenho do (a) discente candidato (a) na exposição, considerando a trajetória deste no curso de mestrado profissional. Como resultado da avaliação, a Comissão de Avaliação deliberou pela:

Aprovação do trabalho de defesa

A Comissão de Avaliação declara o (a) discente candidato (a) APROVADO NO EXAME DE DEFESA PÚBLICA. A Comissão de Avaliação pode sugerir alterações de forma e/ou conteúdo consideradas aceitáveis, as correções, quando identificadas, devem ser realizadas no prazo máximo de 30 dias contados a partir do recebimento da Ata de Defesa. As alterações deverão ser indicadas no Anexo ao presente documento e/ou podem constar na versão lida pelo membro da Comissão de Avaliação para a sessão de defesa do trabalho de dissertação. Neste caso, a versão lida corrigida deverá ser entregue ao (à) discente candidato (a) no final da sessão

Reprovação do trabalho de defesa

De acordo com a Resolução – CEPEC N° 1109 é previsto a reprovação quando a Comissão de Avaliação determina que o trabalho apresentado não satisfaz as condições mínimas para ser considerado projeto de mestrado válido, em condições de se desenvolver um trabalho de conclusão de mestrado.

A Comissão de Avaliação:

Para uso da Coordenação/Secretaria do PPGGO	
<p></p> <p>Dr. André Carlos Silva Membro Presidente Universidade Federal de Goiás</p>	<p></p> <p>Prof. Dr. Vagner Rosalem Coordenador do Mestrado Profissional no Programa de Pós-Graduação <i>Stricto Sensu</i> em Gestão Organizacional Universidade Federal de Goiás</p>
<p></p> <p>Dr. Nilson José Fernandes Membro Convidado Externo Universidade Federal de Goiás</p>	<p></p> <p>Prof. Dr. Geraldo Sadovama Leal Vice-Coordenador do Mestrado Profissional no Programa de Pós-Graduação <i>Stricto Sensu</i> em Gestão Organizacional Universidade Federal de Goiás</p>
<p></p> <p>Dr. Geraldo Sadovama Leal Membro Convidado Interno Universidade Federal de Goiás</p>	<p>Observações:</p>
<p></p> <p>Débora Nascimento Sousa Discente Candidato (a) Matricula: 2014-1643</p>	<p>Visto Secretária: </p> <p>EX. Defesa, n° 02/2016</p>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
REGIONAL CATALÃO

MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO ORGANIZACIONAL

ANEXO DA ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE EXAME DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO MESTRADO PROFISSIONAL NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM GESTÃO ORGANIZACIONAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS.

Discente: Débora Nascimento Sousa

Matrícula: 2014-1643

Título da Dissertação de Defesa: DEPRESSORES ALTERNATIVOS NA FLOTACÃO CATIÔNICA REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO

Data do exame: 10/03/2016

- Correções; modificações; alterações; comentários; observações; pontos para reformulação etc. (Assinatura obrigatória).

Prof. Dr. André Carlos Silva (Membro Presidente) Assinatura:

Assinale em caso afirmativo: O exemplar lido para o exame foi entregue ao discente com as correções necessárias.
Observações adicionais (opcionais):

Prof. Dr. Nilson José Fernandes (Membro Candidato Titular) Assinatura:

Assinale em caso afirmativo: O exemplar lido para o exame foi entregue ao discente com as correções necessárias.
Observações adicionais (opcionais):

Prof. Dr. Geraldo Sadovama Leal (Membro Candidato Titular) Assinatura:

Assinale em caso afirmativo: O exemplar lido para o exame foi entregue ao discente com as correções necessárias.
Observações adicionais (opcionais):

Cientista (a) discente:	Para uso da Coordenação/Secretaria do PPGGO
 Débora Nascimento Sousa Discente Candidato (a) Matrícula: 2014-1643	Visto Secretária: EX. Defesa. n.º 02/2016 Catalão, 10/03/2016

Dedico este trabalho a minha mãe, Maria Adelaide, que com todo amor e dedicação lutou a vida inteira para que todos seus filhos alcançassem seus objetivos, além da educação intelectual e moral. Mãe amiga, companheira, tenho certeza que estaremos sempre juntas além desta vida. Ao meu pai Rubem, por todo amor, compreensão amizade, confiança, força e tempo que sempre me dedicou. Ao meu amor Thales por toda compreensão, companheirismo, carinho principalmente por sempre me acalmar diante todos os anseios.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, dirijo meus agradecimentos a Deus. Ele, que me concedeu esta oportunidade, que nos deu saúde para prosseguir, nos abençoou. Ele que nos abençoou em cada momento e nos iluminou na realização e finalização deste projeto. Por todas as bênçãos: meu louvor e meu agradecimento.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. André Carlos Silva e Prof.^a Msc. Elenice Maria Schons Silva, pela oportunidade, apoio e ensinamentos nessa jornada, essenciais na elaboração desta dissertação, bem como pela amizade, sinceridade e confiança a mim dedicadas.

À equipe do Laboratório de Modelamento e Pesquisa em Processamento Mineral por todo apoio. A todos os alunos, tanto da graduação quanto dos cursos técnicos, que me ensinaram e apoiaram nessa caminhada de muito aprendizado. Em especial, agradeço às alunas Dafne, Dantara, Verônica e aos amigos Mariana, Wellington, Raphael e Dimas, pelo companheirismo nesta árdua tarefa.

Aos meus professores do Programa de Pós-graduação em Gestão Organizacional em especial Geraldo Sandoyama e Adriana Sandoyama, por todo apoio metodológico durante esse mestrado.

Ao Instituto Federal Goiano, na qual tenho orgulho de fazer parte do quadro de servidores, pelo apoio e o conseqüente aperfeiçoamento, não apenas profissional como também pessoal.

Ao amigo da CDTN, Rodrigo Albuquerque. À Clariant, na pessoa da Dr. Mônica Cassola, que gentilmente forneceu os reagentes utilizados no presente trabalho. À empresa Ingredion, na pessoa da Dirce Jacomo que gentilmente forneceu reagentes utilizados no presente trabalho. À empresa Anglo American pela constante ajuda com análises, em especial aos colegas Talita e Ricardo, que realizaram as análises químicas. À Michelly Oliveira, por ter sido o primeiro grande exemplo na área, por conselhos e amizade.

Ao CNPq, CAPES, FUNAPE e CETM, em especial à FAPEG, pela concessão da bolsa de formação de mestrado, apoio tão importante durante esse período de constantes despesas.

Ao meu amor, Thales Prado pelo apoio de sempre, pela paciência, compreensão e carinho. Obrigada por fazer parte da minha vida e por fazer parte desse momento.

À minha família querida, por todo apoio, em especial aos meus pais Adelaide e Rubem que tanto amo e admiro muito, muito obrigada, pois sem o apoio, esforço e orientações de vocês tudo seria impossível! O apoio de vocês é e sempre será essencial em qualquer projeto que eu venha desenvolver em minha vida. Aos meus irmãos Eugênio, Rodolfo e minha linda sobrinha Letícia.

Por fim, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

MUITO OBRIGADA!

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS.....	16
	2.1 Objetivo geral	16
	2.2 Objetivos específicos.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
	3.1 Minério de ferro.....	17
	3.1.1 Hematita	17
	3.1.2 Quartzo.....	18
	3.2 Flotação	18
	3.2.1 Aspectos gerais	18
	3.2.2 Reagentes de flotação.....	20
	3.3 Flotação em circuito	23
	3.4 Flotação catiônica reversa de minério de ferro.....	24
	3.4.1 Princípios de propriedades das interfaces	25
	3.4.2 Adsorção	26
	3.4.3 Tensão superficial	26
	3.4.4 Potencial zeta (ϵ).....	27
	3.4.5 Reagentes utilizados na flotação de minério de ferro	28
	3.4.6 Aminas	29

3.4.7 Amido	33
4 METODOLOGIA.....	48
4.1 Preparação das amostras e caracterização	48
4.1.1 Preparação das amostras	48
4.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	49
4.1.3 Espectrometria de fluorescência de raios-x via FRX.....	49
4.2 Caracterização dos amidos	50
4.2.1 Gelatinização dos amidos	50
4.2.2 Preparação da Amina 1% p/v	52
4.3 Ensaios em Microflotação	52
4.4 Ensaios de flotação em bancada	56
4.5 Análise estatística dos resultados - ANOVA	61
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
5.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	62
5.1.1 Hematita	62
5.1.2 Quartzo.....	63
5.2 Energia Dispersiva de Raios-x (EDS)	65
5.2.1. Hematita.....	65
5.2.2. Quartzo.....	67
5.3 Caracterização Análise química via FRX.....	69
5.4 Caracterização dos amidos e féculas	69

5.5 Gelatinização dos amidos	72
5.6 Microflotação.....	74
5.7 Testes de Flotação em bancada	82
6 CONCLUSÕES.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação dos reagentes de flotação. Fonte: HORTA, 2014.	21
Figura 2. Aspecto de uma molécula de coletor. Fonte: HORTA, 2014	21
Figura 3. Circuito de flotação. Fonte: CETEM, 2010	23
Figura 4. Variação da tensão superficial da solução em função da concentração do soluto. Fonte: CHAVES, 2013.	27
Figura 5. Estrutura da dupla camada elétrica. Fonte: CHAVES, 2013.	28
Figura 6. Molécula genérica de amina primária (I), secundária (II) e terciária (III). Fonte: AGUIAR, 2014.	29
Figura 7. Concentração de espécies versus pH para uma amina primária. Fonte: LEAL FILHO, 2007.	30
Figura 8. Reação de neutralização das aminas. Fonte: AGUIAR, 2014.	31
Figura 9. Representação das etapas de adsorção de aminas na superfície do quartzo até a formação de hemi-micelas. Fonte: NEDER e LEAL FILHO, 2006.	32
Figura 10. Fórmula estrutural da amilose. Fonte: LEJA, 1982.	34
Figura 11. Fórmula estrutural da amilopectina. Fonte: LEJA, 1982.	34
Figura 12. Estrutura interna de intercrescimento do grânulo de amido. Fonte: DERNADIN e SILVA, 2009.	38
Figura 13. Ilustração das regiões amorfas e cristalinas da amilopectina. Fonte: DERNADIN e SILVA, 2009.	38
Figura 14. Mecanismo de complexação entre o amido de trigo e a superfície da hematita. Fonte: MOREIRA, 2013.	41
Figura 15. Produção mundial de amido. Distribuição por matéria prima. Fonte: Pierin Jr, 2009.	42

Figura 16. Desembolsos por insumo de reagentes na Samarco no ano de 2006. Fonte: Turrer, 2007.	46
Figura 17. Moinho de bolas utilizado na cominuição das amostras.	48
Figura 18. Fluxograma da preparação de amostras para Espectrometria de fluorescência de raios-x.	49
Figura 19. Progresso de gelatinização dos amidos e féculas com adição de Hidróxido de Sódio.	52
Figura 20. A) Tubo de <i>Hallimond</i> modificado (GUIMARÃES <i>apud</i> OLIVEIRA, 2007) e B) Tubo utilizado na pesquisa.	54
Figura 21. Pesagem das amostras na proporção de: (A) 40% quartzo e (B) 60% hematita para os testes de flotação em bancada.	57
Figura 22. Célula de flotação em bancada: (A) equipamento e (B) equipamento em uso.	59
Figura 23. Análise por microscopia eletrônica de varredura de amostras de hematita: (A) x 190 e (B) x 750. Fonte: Labmic/UFG.	63
Figura 24. Análise por microscopia eletrônica de varredura da amostra de quartzo (A) x 190 e (B) x 750. Fonte Labmic/UFG.	64
Figura 25. Principais elementos detectados pelas análises por energia dispersiva de raios-X (EDS) da amostra de hematita.	67
Figura 26. Principais elementos detectados pelas análises por energia dispersiva de raios-X (EDS) da amostra de quartzo.	69
Figura 27. Relação amilopectina/amilose dos amidos e féculas testados na gelatinização.	70
Figura 28. Teste de inchamento dos amidos e féculas testados na gelatinização.	71
Figura 29. Teste de solubilidade dos amidos e féculas testados na gelatinização.	72
Figura 30. Variação do pH com adição de NaOH (10%) até o ponto de gelatinização.	73

Figura 31. Resultado dos ensaios de microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho e a fécula de batata, em diversas dosagens.	75
Figura 32. Resultado dos ensaios de microflotação para hematita e quartzo utilizando depressores amido de milho e a fécula de mandioca, em diversas dosagens.	76
Figura 33. Microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho e a amido de mandioca.	77
Figura 34. Microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho natural a amido de milho modificado com nome comercial HIPIX 100.	78
Figura 35. Microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho natural a amido de milho modificado com nome comercial HIPIX 101.	79
Figura 36. Microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho natural a amido de milho modificado com nome comercial HIPIX 102.	80
Figura 37. Melhores resultados de microflotação com os depressores HIPIX 100, HIPIX 101 e fécula de mandioca para minerais de hematita e quartzo, comparando com o depressor amido de milho convencional.	81
Figura 38. Recuperação do mineral de hematita através de flotação reversa de minério de ferro.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise química e granulométrica dos amidos de milhos. Fonte: MOREIRA (2013)	36
Tabela 2. Composição de amidos de diferentes fontes botânica Fonte: Adaptada de CEREDA (2001).	36
Tabela 3. Produtividade, % de amido base úmida e rendimento potencial de amido das tuberosas amiláceas por hectare. Fonte: Leonel, Oliveira e Duarte Filho, 2005.....	43
Tabela 4. Fatores importantes que ditam a seleção de reagentes (adaptado de NAGARAJ, 2005).....	45
Tabela 5. Consumo mensal de amido nas usinas brasileiras de minério de ferro e fosfato.	47
Tabela 6. Principais parâmetros do ensaio de flotação em tubo de <i>Hallimond</i> modificado.....	53
Tabela 7. Principais parâmetros do ensaio de flotação catiônica reversa de minério de ferro na célula.....	58
Tabela 8. Resultados dos elementos químicos na faixa granuloquímica de 111 µm (150 #)...	69
Tabela 9. Proporções de Amido/NaOH encontrados na gelatinização dos amidos e féculas testados.	73

RESUMO

Os depressores utilizados na flotação de minério de ferro são os amidos, constituídos basicamente de amilose e amilopectina, sendo o de milho mais utilizado devido à sua disponibilidade e viabilidade econômica. O objetivo do trabalho foi estudar o desempenho de sete amidos provenientes de diferentes fontes botânicas na flotação catiônica reversa de minério de ferro, através de ensaios de microflotação e flotação em célula de bancada. Foram avaliados a influência da dosagem de diferentes depressores na flotabilidade dos minerais de quartzo e hematita, nos testes utilizou-se granulometria passante em 180 μm e retido 75 μm (-80# + 200#). Todo material utilizado no presente trabalho estava totalmente liberado, ou seja, sem presença de partículas mistas. As amostras foram analisadas química e fisicamente por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura, Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) e análises químicas. No tubo de *Hallimond* modificado, utilizou-se os seguintes depressores: amidos milho convencional, amido de mandioca, féculas de batata, fécula de mandioca, HIPIX®100, HIPIX®101 e HIPIX®102, nas dosagens 400, 800, 1600, 3200, 4800 e 6400 (g/t) mantendo fixa dosagem de coletor Flotigam EDA da Clariant, na dosagem de 70 g/t, observou-se a influência da dosagem dos depressores testados na flotabilidade dos minerais. Observou-se melhor eficiência nos depressores HIPIX®100, HIPIX®101 e fécula de mandioca. Já na célula de flotação de bancada, modelo ENGENDRAR utilizou-se alimentação com 60% de hematita e 40% de quartzo com alta pureza. Homogeneizou-se previamente e testou-se os seguintes depressores: Fécula de mandioca, amido de mandioca, HIPIX®100, HIPIX®101 e amido de milho convencional (utilizando-o como comparação), nas dosagens 400, 800 e 1600 (g/t). Esta única etapa em célula de flotação em bancada funcionou como uma etapa rougher comparado à empresas de mineração. Os resultados da microflotação e da flotação por bancada foram analisados estatisticamente através da análise de variância (ANOVA), verificando se variação das dosagens dos depressores são fatores que influenciaram na recuperação do mineral comparado ao amido de milho convencional. Nesta etapa os resultados mostram-se possibilidades técnicas para a substituição do amido de milho na flotação catiônica reversa de minérios de ferro, além da substituição do amido de milho convencional, percebeu-se que o desempenho de alguns amidos leva a um menor consumo específico de reagente, o que pode acarretar em ganhos econômicos e ambientais.

Palavras-chave: Minério de ferro, depressores, influência de dosagens.

ABSTRACT

The depressant used in the iron ore flotation are starches, basically made up of amylose and amylopectin, and the most widely used corn because of its availability and economic viability. The objective was to study the performance of seven starches from different botanical sources in reverse flotation cation of iron ore through Microflotation and flotation test bench cell. We evaluated the influence of different dosage depressants in the buoyancy of the minerals quartz and hematite, the tests used to passing particle size of 180 m and held 75 micrometre (-80 + # 200 #). Any material used in the present study was completely released, ie without the presence of mixed particles. The samples were analyzed chemically and physically by Scanning Electron Microscopy, Energy Dispersive X-ray (EDS) and chemical analysis. In the modified Hallimond tube, we used the following depressants: Conventional corn starch, cassava starch, potato flour, cassava flour HIPIX®100, HIPIX®101 and HIPIX®102, the dosages 400, 800, 1600, 3200 , 4800 and 6400 (g / t) maintaining fixed collector dosage Flotigam EDA Clariant at a dosage of 70 g / t was observed to influence the dosing of depressant tested in floatability of minerals. There was better efficiency in depressant HIPIX®100, HIPIX®101 and cassava starch. In the flotation cell counter, model engendering power was used with 60% hematite and 40% quartz with high purity. is homogenized and the following pre-depressant was tested: Cassava flour, cassava starch, HIPIX®100, HIPIX®101 and normal corn starch (using it as a comparison), the measurements 400, 800 and 1600 (g / t). This single step in flotation cell bench worked as a rougher stage compared to mining companies. The results of Microflotation and flotation bench were statistically analyzed by analysis of variance (ANOVA), checking variation of doses of depressants are factors that influence the recovery of the mineral compared to conventional corn starch. At this stage, the results prove to be technically possible to replace the corn starch in the flotation cation reverse iron ore, apart from replacing the conventional corn starch was noticed that the performance of some starches leads to a lower specific consumption reagent, which can result in economic and environmental gains.

Keywords: iron ore, depressants, influence dosages.

1 INTRODUÇÃO

A extração do minério de ferro representa um segmento significativo no cenário econômico para o Brasil. Segundo Sumário Mineral (DNPM, 2014), a produção mundial de minério de ferro em 2013 foi de cerca de 3,0 bilhões de toneladas, sendo que a produção brasileira representou 13,1% desta, ou seja, o Brasil em 2013 produziu aproximadamente 387 milhões de toneladas (Mt), sendo o terceiro maior produtor de minério de ferro do mundo.

Com a exaustão das reservas de altos teores de ferro, as empresas que realizam o aproveitamento econômico das jazidas de minério de ferro vêm na atualidade desenvolvendo estudos técnicos e econômicos para a viabilidade de lavra e beneficiamento de minérios de ferro marginais, isto é, estudam como viabilizar as reservas de baixo teor de ferro.

Dessa forma, estudos fundamentais envolvendo medidas de ângulo de contato, potencial zeta, flotabilidade em tubo de *Hallimond*, assim como testes de flotação em escalas de laboratório e piloto, têm sido realizados com diferentes tipos de minérios e distintos sistemas de reagentes, objetivando subsidiar a separação. A baixa seletividade geralmente obtida é atribuída às similaridades existentes nas propriedades eletrocinéticas, solubilidade e química de superfície desses minerais (HANNA e SOMASUNDARAN *apud* ALBUQUERQUE, 2010). Aproximadamente 81% do ferro produzido no mundo é utilizado na siderurgia, para atender esta aplicação os engenheiros de processo ainda enfrentam grandes desafios nas usinas de beneficiamento de minério de ferro a obtenção de teor final de SiO_2 inferior a 1% (AGUIAR, 2014). O sistema de concentração de minério de ferro consagrado no Brasil desde 1977 é a flotação catiônica reversa, na qual deprime-se os minerais-minério de ferro e flota-se a ganga silicática. Em termos de reagentes, o amido de milho é utilizado como depressor de óxidos e hidróxidos de ferro e a amina como coletor de quartzo e espumante. O condicionamento da polpa de minério de ferro, caso realizado diretamente com amina, tornaria tanto as partículas de minerais de ferro quanto as de quartzo hidrofóbicas. Isto impossibilitaria a concentração por flotação. Por essa razão, a polpa deve ser condicionada previamente em solução de amido, para o amido adsorver nas partículas, essa adsorção ocorre preferencialmente sobre a superfície da hematita, em relação ao quartzo e a densidade de adsorção da amina sobre a superfície do quartzo é maior que a densidade de adsorção deste reagente sobre a superfície da hematita. Estudos semelhantes realizados por (LIMA *apud* TURRIER, 2007) indicaram ainda que a quantidade de amina que se adsorve na superfície da hematita, contendo amido previamente adsorvido, é insuficiente para torná-la hidrofóbica e a

quantidade de amido adsorvido sobre o quartzo, também, é insuficiente para manter o caráter hidrofílico do mineral, após adsorção da amina. Desse modo, ao final, espera-se que a hematita permaneça hidrofílica e o quartzo torne-se hidrofóbico. Devido à alta demanda por ferro, os depósitos ferríferos brasileiros de altos teores têm se tornado escassos, sendo necessário iniciar a exploração de depósitos minerais com teores de ferro menores. O consumo de amina tende a aumentar com o aumento da quantidade de ganga silicática processada e diminuição da granulometria das partículas, juntamente com a demanda por concentrado de minério de ferro, o mercado de amidos vem crescendo e se aperfeiçoando nos últimos anos, levando à busca de produtos com características específicas que atendam às exigências da indústria.

A produção de amidos modificados é uma alternativa que vem sendo desenvolvida há algum tempo com o objetivo de superar uma ou mais limitações dos amidos nativos, e assim, aumentar a utilidade deste polímero nas aplicações industriais, porém esta aplicação deste polímero modificado se restringe quando comparado o crescente valor de amido de milho que ainda é o mais utilizado devido sua disponibilidade em encontro reduções relevantes do concentrado de minério de ferro nestes últimos três anos

Assim sendo, foram realizados neste trabalho testes de flotação com diferentes tipos e dosagens de depressores, utilizando tubo de *Hallimond* modificado e em seguida a célula de flotação em bancada, com objetivo de ter outros amidos e féculas como alternativa de depressores nas usinas de processamento mineral, pois pode se justificar através de uma menor dosagem necessária comparada com o depressor de amido de milho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar a eficiência na depressão de óxido de ferro com diferentes dosagens, visando superar a limitação da utilização de amido de milho, bem como estudar o processo de gelatinização dos mesmos.

2.2 Objetivos específicos

- I. Analisar a proporção depressor/NaOH na gelatinização dos amidos e féculas;
- II. Verificar a influência do depressor da recuperação do ferro e quartzo através do ensaio de microflotação no tubo de *Hallimond*;
- III. Verificar a eficiência do depressor na recuperação do ferro e quartzo através do ensaio de célula de flotação em bancada;
- IV. Verificar a flotabilidade do quartzo como consequência do aumento da dosagem dos depressores em ambos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Minério de ferro

O ferro é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre. Entre os metais só é superado pelo alumínio. Possui concentração na litosfera de 4,2 % (WALDE, 1986). É maleável e dúctil, tem densidade específica de 7,87 g/cm³ em temperaturas baixas é facilmente magnetizável, porém sua magnetização se torna mais difícil com seu aquecimento, até que a 790°C ocorre o desaparecimento desta propriedade, graças à transformação de ferro- α em ferro- β (CRISTIE & BRATHWAITE, 1997).

Dentre os principais minerais portadores de ferro, pode-se citar hematita, goethita e magnetita (pertencentes à classe dos óxidos) como os principais. Com relação à ganga associada, o quartzo é o mais abundante, podendo haver também presença de gibbsita, caulinita, minerais de manganês, mica, sulfetos e carbonatos. Neste tópico serão abordados o quartzo e a hematita, por serem os principais constituintes do minério de ferro, e alvo do presente trabalho.

O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro no mundo, ficando atrás da China. Entretanto, como a produção da China deve referir-se à produção sem tratamento, o Brasil é, provavelmente, o maior produtor de minério beneficiado.

De acordo com DEPEC – Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos 2015, de todo o minério produzido no Brasil, cerca de 387 milhões de toneladas, de 16 % são destinados à produção de granulados que são utilizados pelas siderúrgicas nos fornos de redução direta (ferro gusa), 54 % de *sinter-feed* e 30 % de *pellet-feed* que são utilizados nos processos de aglomeração em sinterização e pelotização.

3.1.1 Hematita

É um dos principais óxidos presentes na natureza e o mais importante mineral-minério de ferro, encontrado em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Apresenta-se na fórmula química Fe₂O₃, aproximadamente (70% de ferro e 30,0% de oxigênio). Seu nome tem origem no grego *hemos*, que significa sangue, devido à cor vermelho-sangue, cinza metálico a preto, dentre as principais características destaca o brilho metálico a esplêndido, fratura subconchoidal, transparência opaca, dureza entre 5,5 e 6,5 na escala Mohs, massa específica 5,26 g/cm³, hábito maciço, compacto ou terroso e sistema cristalino hexagonal.

Pode ocorrer como produto de sublimação em conexão com as atividades vulcânicas. Ocorre nos depósitos metamórficos de contato e, como mineral acessório, nas rochas ígneas feldspáticas, tais como o granito. Substitui também em grande escala as rochas silícicas. Encontrada desde a forma de escamas microscópicas até a de massas enormes em relação com as rochas metamórficas regionais, onde pode ter se originado pela alteração da goethita, siderita ou magnetita. Quanto às propriedades de superfície, o mineral apresenta ponto isoelétrico (PIE) em pH próximo de 6,7 (DEER *et al.*, 1992; MARQUES, 2013; FUERSTENAU, 1976; CROMIERES *et al.*, 2002). Pode ocorrer como produto de sublimação em conexão com as atividades vulcânicas. Ocorre nos depósitos metamórficos de contato e, como mineral acessório, nas rochas ígneas feldspáticas, tais como o granito. Substitui também em grande escala as rochas silícicas. Encontrada desde a forma de escamas microscópicas até a de massas enormes em relação com as rochas metamórficas regionais, onde pode ter se originado pela alteração da goethita, siderita ou magnetita.

3.1.2 Quartzo

É o mineral mais abundante do planeta, representa o principal mineral de ganga para a grande maioria dos minérios. Sua fórmula química SiO_2 aproximadamente (46,74% de silício e 53,26% de oxigênio). Dentre suas principais características estão: traço branco, brilho vítreo, cores variadas, ausência de clivagem, fratura conchoidal, dureza 7,0 na escala Mohs, massa específica $2,65 \text{ g/cm}^3$, hábito prismático a granular, sistema cristalino trigonal. Quanto às propriedades de superfície, apresenta ponto isoelétrico em pH próximo a 2. (MARQUES, 2013; FUERSTENAU, 1976; LOPES e LIMA, 2009).

3.2 Flotação

3.2.1 Aspectos gerais

O desenvolvimento da indústria mundial nos últimos cem anos não teria sido possível sem a descoberta do processo de flotação. Os processos físicos tradicionais, gravimétricos, magnéticos e eletrostáticos, em grande parte baseados nas propriedades naturais dos minerais, não teriam possibilitado a escala de produção necessária dos metais básicos, metais nobres e fosfato, tão necessários ao desenvolvimento da agricultura e da indústria. Trata-se, portanto, sem exagero, de uma das grandes invenções tecnológicas recentes da humanidade. Na natureza existe uma quantidade pequena de minerais naturalmente hidrofóbicos, o que pode

indicar uma aplicação restrita da flotação. Contudo, o caso disseminado desta tecnologia se deve a sua grande versatilidade, pois o caráter hidrofóbico/hidrofílico dos sólidos pode ser induzido, reforçado ou inibido, através da utilização de reagentes químicos específicos (LEAL FILHO, 2007). O método de flotação é conduzido via úmida na presença de bolhas de ar que “capturam” as partículas hidrofóbicas formando o agregado (partícula/bolha). Os agregados formados exibem uma densidade aparente menor do que a do meio fluido e, portanto, “flutuam” até a superfície de um reator, onde são removidos por transbordo ou ação mecânica de pás (PERES *et al.*, 2007; LEAL FILHO, 2007). As operações de concentração mineral requerem três condições básicas (PERES *et al.*, 2012):

- i. Liberalidade, alcançada através de operações de cominuição e classificação;
- ii. Diferenciabilidade, base da seletividade do método;
- iii. Separabilidade dinâmica, relacionada aos equipamentos empregados.

Diante essas condições é importante frisar que a crescente extração dos bens minerais tem aumentado a exploração de jazidas com mineralogias mais complexas e teores mais baixos. Com isso, a liberação tem sido alcançada em granulometrias cada vez menores, o que constitui um desafio à flotação.

A diferenciabilidade do processo baseia-se no fato de que a superfície de diferentes minerais pode apresentar distintos graus de hidrofobicidade (repelência a água). O conceito oposto de hidrofobicidade é a hidrofilicidade (afinidade com água). Em termos de polaridade, se uma partícula é hidrofóbica significa que sua superfície é apolar, por outro lado, se uma partícula é hidrofílica significa que sua superfície é polar (PERES *et al.*, 2007). Deste modo, a separação entre as partículas é possível fazendo-se passar um fluxo de ar (bolhas) através de uma suspensão aquosa, contendo as duas espécies. As partículas hidrofóbicas são carregadas pelas bolhas de ar até a camada de espuma, e as partículas hidrofílicas permanecem em suspensão, sendo posteriormente deprimidas (PERES *et al.*, 2007). Uma vez estabelecido o ambiente químico ideal para a coleta, o desempenho da flotação vai depender das condições hidrodinâmicas dos equipamentos de flotação. Os equipamentos que conduzem a flotação são sistemas físicos dinâmicos, caracterizados por conferirem trajetórias distintas às partículas com diferentes graus de hidrofobicidade. Seus projetos devem ser bem dimensionados, pois controlam a ocorrência de três eventos que devem acontecer com sucesso para a eficiência do processo (RODRIGUES, 2010):

- i. Colisão da partícula com a bolha que é controlada pela hidrodinâmica do meio.
- ii. Adesão das partículas hidrofóbicas às bolhas de ar, formando agregados estáveis. Este evento é controlado pelas propriedades físico-químicas interfaciais.
- iii. Estabilidade do agregado partícula/bolha durante sua ascensão até a camada de espuma. Para que o agregado sobreviva a tal deslocamento, a tenacidade da adesão deve predominar sobre as influências das forças viscosas, gravitacionais e inerciais atuantes.

Quando estes três fenômenos ocorrem consecutivamente, a flotação é descrita por uma cinética de primeira ordem. Entretanto, caso um destes eventos falhe, a cinética será de ordem superior a unidade (LEAL FILHO, 2007).

Leal Filho (2007) afirma que a flotação é influenciada por fatores relacionados às características do minério que são aqueles inerentes à sua composição mineralógica e também às características físicas, químicas e tecnológicas dos minerais presentes, fatores relacionados à preparação do minério que compreendem toda a história pregressa do mesmo, começando pela lavra, passando pelo manuseio, britagem, peneiramento, homogeneização, moagem, atrição, deslamagem, e por último fatores relacionados à flotação que compreendem as condições dos equipamentos, características da água, pH, reagentes, tempos de condicionamento e tempos de flotação.

3.2.2 Reagentes de flotação

Reagentes de flotação são compostos orgânicos e inorgânicos que apresentam atividade interfacial e são utilizados com o objetivo de controle das características das interfaces envolvidas no processo (PERES *et al.*, 2007). A escolha do reagente, dosagem, tempo de condicionamento depende das exigências mercadológicas, máxima recuperação de mineral útil de modo que se viabilize técnica e economicamente o processo de concentração. Os reagentes de flotação são classificados conforme sua função no processo de acordo com a Figura 1 a seguir.

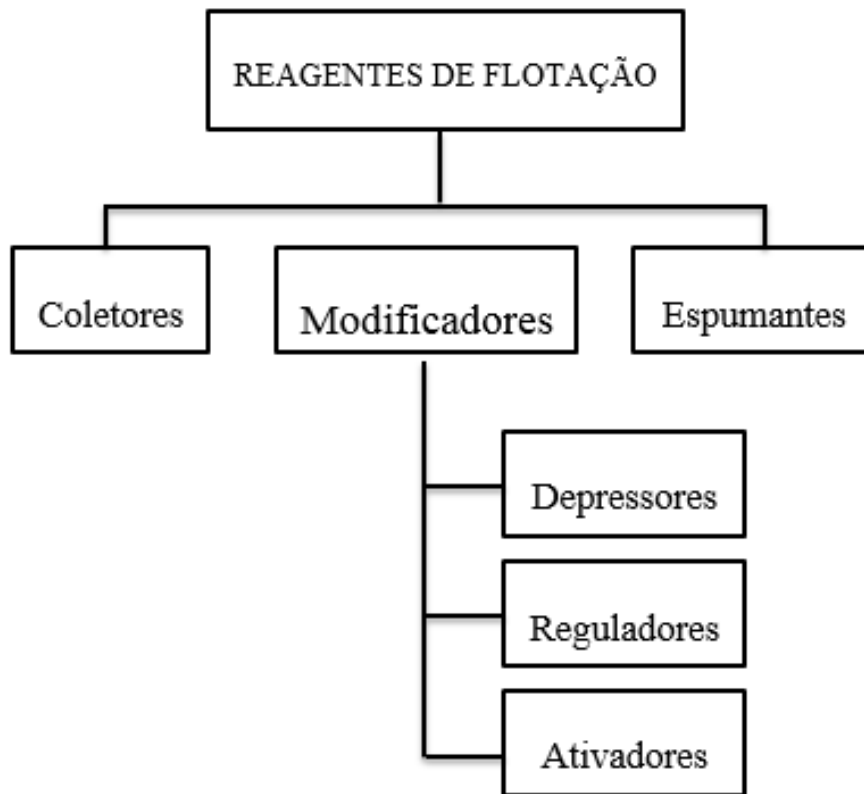


Figura 1. Classificação dos reagentes de flotação. Fonte: HORTA, 2014.

3.2.2.1 Coletores

São espécies químicas surfatantes que adsorvem seletivamente na interface mineral/solução, alterando a superfície mineral induzindo ou reforçando sua hidrofobicidade. Possuem uma cadeia hidrocarbônica ligada a grupo(s) polar (es), que exibe um momento de dipolo permanente, atribuindo a esta parte da molécula um caráter hidrofílico. Já a cauda hidrocarbônica, representada pela letra R da Figura 2, não possui dipolo permanente e representa a parte hidrofóbica da molécula (LEAL FILHO, 2007).

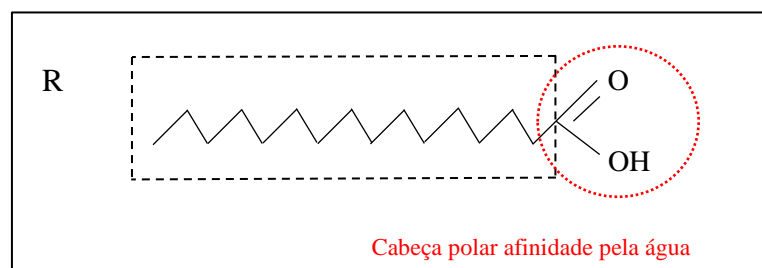


Figura 2. Aspecto de uma molécula de coletor. Fonte: HORTA, 2014

Para uma substância coletora transformar uma partícula naturalmente hidrofílica em hidrofóbica é fundamental que a parte polar da molécula do coletor interaja com sítios da interface mineral/solução, de modo a se formar um filme da substância sobre a superfície da partícula. Para que isso ocorra é necessário que a molécula da substância migre do seio da solução para a superfície da partícula e aí se deposite. Assim, a partícula reveste a bolha, apresentando uma nova superfície revestida dessa substância hidrofóbica (CHAVES; LEAL FILHO, 2004).

Os coletores são classificados de acordo com a carga iônica da parte polar em catiônicos, aniônicos e não iônicos. Os coletores não iônicos geralmente são alcoóis adicionados para diminuir a repulsão entre as moléculas do coletor principal durante a adsorção.

3.2.2.2 Modificadores

Segundo Leal Filho (2007), os modificadores são espécies que agem tanto na interface mineral/solução quanto na própria solução. E atuam “preparando o terreno” para a ação do coletor. Apresentam funções distintas, sendo classificados de acordo com estas funções:

i. Depressores: são utilizados com o objetivo de adsorver preferencialmente na superfície dos minerais que não se deseja flotar, inibindo a ação dos coletores nestes minerais destinando-lhes a uma trajetória de precipitação, aumentando desta forma, a seletividade do processo. Os depressores são sais ou polímeros ricos em grupos funcionais polares (-OH alcoólico, -OH fenólico, -COOH, -NH₂, etc).

ii. Ativadores: são geralmente sais inorgânicos que quando adicionados à polpa são capazes de tornar mais eficaz e/ou seletiva a ação dos coletores.

iii. Reguladores: são substâncias que atuam na solução (reguladores de pH, pCa, pMg, promotores de formação de micelas) ou nas interfaces mineral/solução (dispersantes) ou ainda na interface ar/solução, regulando a espuma com o intuito de estabilizar o processo e promover condições ótimas para a atuação dos demais reagentes.

3.2.2.3 Espumantes

São compostos não iônicos que geralmente pertencem ao grupo dos alcoóis ou dos éteres. Suas moléculas apresentam cadeias ramificadas ligadas a vários grupos polares não-iônicos, principalmente OH. Os espumantes são espécies capazes de adsorver na interface

ar/solução, rebaixando a tensão interfacial, com isto, produzir condições ótimas de geração de espuma, além de agilizar a cinética de interação entre partículas e bolhas (LEAL FILHO, 2007). As moléculas do espumante exercem um papel importante durante a formação do agregado partícula/bolha, pois, elas alinham seus dipolos quando há aproximação da partícula com a bolha. Tal alinhamento ocorre no sentido de reduzir as forças eletrostáticas entre bolha e partícula favorecendo a ruptura do filme aquoso existente entre ambas (LEAL FILHO, 2007).

3.3 Flotação em circuito

A flotação é difícil obter o teor e a recuperação desejados numa única etapa.

Genericamente, executa-se uma primeira flotação, chamada “rougher”, onde se obtém um concentrado pobre e um rejeito que ainda contém teores dos minerais úteis. O concentrado é re-lavado numa segunda flotação, denominada “cleaner”, onde é produzido um concentrado final e um rejeito de teor elevado. O rejeito rougher é repassado numa outra flotação, chamada “scavenger”, onde se obtém um rejeito muito pobre (rejeito final) e um concentrado que reúne os minerais úteis que estavam no rejeito rougher, mas que é pobre para ser considerado produto final. Tanto o rejeito como o concentrado scavenger ainda contém minerais úteis e por isso são retornados à célula rougher (LUZ *et al.*, 2004, p. 426).

No mesmo circuito flotação (Figura 3) é possível se realizar flotação reversa, onde se flota a ganga (ex.: minério de ferro) e afunda o concentrado que será o método utilizado nos testes do presente trabalho e flotação direta, onde se flota o concentrado e afunda a ganga (ex.: Fosfato).

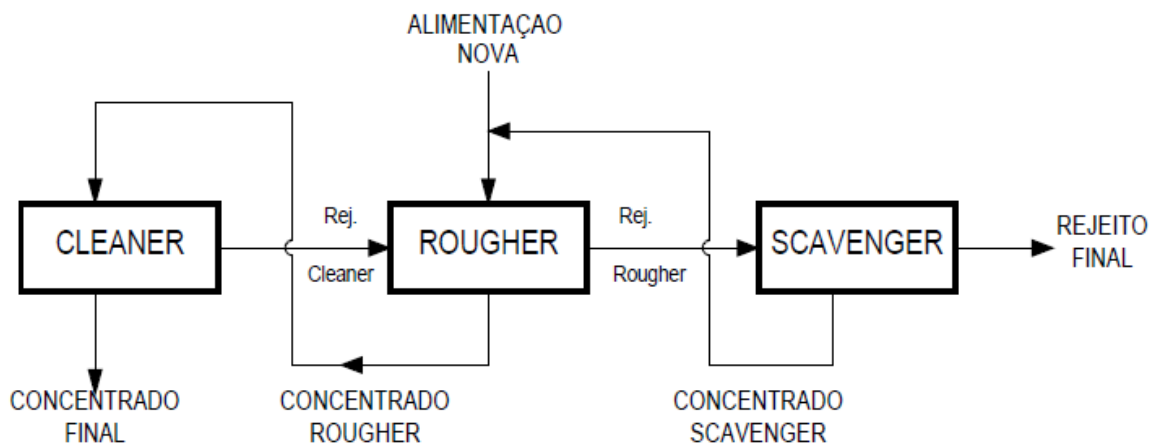


Figura 3. Circuito de flotação. Fonte: CETEM, 2010.

3.4 Flotação catiônica reversa de minério de ferro

O quartzo é o principal mineral de ganga nos minérios de ferro e existem diferentes rotas de flotação para separá-lo: flotação catiônica reversa de quartzo, flotação aniônica direta de óxidos de ferro e flotação aniônica reversa de quartzo ativado. A flotação catiônica de minério de ferro, o termo catiônico refere-se ao fato de utilizar o coletor amina, um surfactante iônico carregado positivamente. Já, a designação reversa se deve a promoção da flotação dos minerais de ganga, no caso o quartzo, e depressão da hematita e outros minerais portadores de ferro. O quartzo é flotado em presença do coletor eteramina que é utilizado também como espumante. Como a solubilidade da amina em meio aquoso é muito baixa, utilizam-se diversos tipos de ácidos (principalmente acético) para neutralizá-la, aumentando sua solubilidade. Diversas formas têm sido estudadas a fim de aumentar essa solubilidade, das quais se pode citar a inserção de grupos éter na estrutura das aminas ou até mesmo a substituição por óleos não-polares (óleo diesel) na forma de emulsão, já que o valor econômico do óleo diesel mostra-se inferior ao da amina, sem impactos ambientais significativos (SANTOS, 2010).

Porém, os minerais de ferro estão susceptíveis à flotação na presença da amina, principalmente de cadeias maiores, fazendo-se necessário a adição de um agente depressor que permitirá a seletividade do coletor para o quartzo, impedindo a interação entre o coletor e os minerais de ferro. Os depressores utilizados são os amidos, constituídos em sua composição química basicamente de amilose e amilopectina, sendo o de milho mais utilizado devido à sua disponibilidade e viabilidade econômica (ARAÚJO *et al.*, 2005). O amido deve ser solubilizado usando-se água aquecida ou Hidróxido de sódio (NaOH) em um processo chamado de gelatinização.

O amido gelatinizado é o primeiro reagente a ser adicionado no processo. Sua adsorção ocorre preferencialmente nas partículas de óxido de ferro, cuja superfície passará a ter caráter hidrofílico. Após o condicionamento e adsorção do amido, o próximo reagente a ser adicionado é a amina (acetato de eteramina), reagente que adsorve nas partículas de quartzo conferindo à sua superfície um caráter hidrofóbico.

O mecanismo de adsorção da amina na superfície do quartzo é de natureza não-específica. A cabeça polar do grupo amino NH_2 carregada positivamente é atraída pelos sítios negativos da interface quartzo/solução (adsorção eletrostática) (LEAL FILHO, 2007).

Brandão *apud* Moreira (2013) relata que a quantidade de amina que se adsorve na hematita, contendo amido previamente adsorvido, é insuficiente para induzir-lhe a

hidrofobicidade e a quantidade de amido adsorvido sobre o quartzo, também, é insuficiente para proporcionar neste, o caráter hidrofílico, após adsorção da amina. Por outro lado, Aguiar (2014) mostra evidências que a hidrofobicidade do quartzo, após a adsorção da amina pode ser comprometida pela adição de amido, que é capaz de adsorver-se mutuamente com a amina, possivelmente devido à formação de um complexo entre os reagentes, denominado de clatrato, termo utilizado para denominar o composto molecular formado pelo alojamento das moléculas de amina no interior das moléculas de amido, que resulta na depressão de quartzo. A formação de clatratos pode justificar o indesejado aumento do teor de Si₂O no concentrado, o que compromete a qualidade. Assim, o quartzo readquire caráter hidrofílico, uma vez que a amina é envolvida pelo invólucro de amido, proporcionando queda na flotabilidade do quartzo.

3.4.1 Princípios de propriedades das interfaces

Uma fase pode ser definida como uma porção homogênea, fisicamente distinta e mecanicamente separável de um sistema. Considerando-se os três estados da matéria - sólido, líquido e gasoso - é possível a identificação de cinco tipos de interface: sólido/sólido, sólido/líquido, sólido/gás, líquido/líquido e líquido/gás. Uma interface sólido/sólido é exemplificada por uma partícula mineral recoberta por lamelas de outra espécie, através de um mecanismo essencialmente de atração eletrostática, conhecido como *slimes coating*, onde a partícula perde totalmente sua identidade superficial. Uma partícula mineral imersa em meio aquoso caracteriza uma interface sólido/líquido, já uma bolha de gás aderida a uma partícula mineral exemplifica uma interface sólido/gás, supondo-se que no momento da adesão a película líquida que circunda a bolha sofre um processo de afinamento até a ruptura. Alguns reagentes de flotação são imiscíveis em água, caracterizando uma interface líquido/líquido, para facilitar o acesso desses reagentes às interfaces sólido/líquido e líquido/gás, muitas vezes, faz-se necessária sua emulsificação. O melhor exemplo da interface líquido/gás é a película líquida que envolve uma bolha, apesar de geralmente a literatura citar como exemplo desse tipo de interface uma bolha imersa em meio aquoso. A espessura da interface é muito pequena, especialmente quando uma fase gasosa está envolvida, não passando de poucas vezes as dimensões moleculares das espécies presentes (CHAVES, 2013).

A pequena espessura das interfaces inviabiliza qualquer tentativa de observação direta de fenômenos interfaciais, mesmo diante a tecnologia inviabiliza a observação direta dos

fenômenos interfaciais, assim, baseia-se em modelos empíricos e em medidas experimentais de três grandezas: tensão superficial, potencial zeta e adsorção.

3.4.2 Adsorção

Adsorção é a concentração na interface, que por sua vez é considerada bidimensional, quantificada em termos de massa/área.

A classificação tradicional da adsorção em física e química (fisissorção e quimissorção) foi desenvolvida para a adsorção de gases em sólidos. Segundo Chaves, 2013, as seguintes considerações podem ser feitas para adaptá-la a sistemas de flotação:

- Interações envolvendo ligações de Van der Waals e forças Coulômbicas entre adsorvato (aquele que se adsorve) e adsorvente (aquele sobre o qual ocorre a adsorção) são designadas como físicas.
- A fisissorção pode apresentar (e geralmente apresenta) multicamadas. Muitas vezes é difícil distinguir-se adsorção de reação química em solução seguida de precipitação superficial.
- A quimissorção se caracteriza por ligações dos tipos iônica, covalente (normalmente o caráter da ligação é covalente parcialmente iônico) e ponte de hidrogênio. A adsorção química se restringe a monocamadas, já que seu mecanismo básico envolve transferência ou compartilhamento de elétrons.
- A adsorção química restringe-se a monocamadas, já que seu mecanismo básico envolve transferência ou compartilhamento de elétrons.

3.4.3 Tensão superficial

Se apresenta na interface líquido/gás, pode ser observada em fatos rotineiros como a água em um copo ou em um lago (na ausência de vento) mostra uma superfície plana, já em pequenas quantidades as gotas mostram uma superfície curva convexa (pequenas gotas e bolhas de ar são esféricas); a imersão de um tubo de vidro capilar em água faz com que o líquido suba e a superfície se torne côncava; a estabilidade de bolhas de sabão na tradicional brincadeira infantil requer a presença de um agente espumante. A tensão superficial geralmente é afetada pela concentração do soluto. A presença de sais e bases (com exceção do hidróxido de amônio) elevam a tensão superficial em relação à da água. A maioria dos surfactantes (alcoóis, carboxilatos, sulfatos, sulfonatos, aminas e sais quaternários de amônio etc.) reduzem a tensão superficial. Os tio-compostos causam um decréscimo desprezível na

tensão superficial. A Figura 4 ilustra a variação da tensão superficial em função da concentração do soluto para sais inorgânicos, tio-composto e alcoóis.

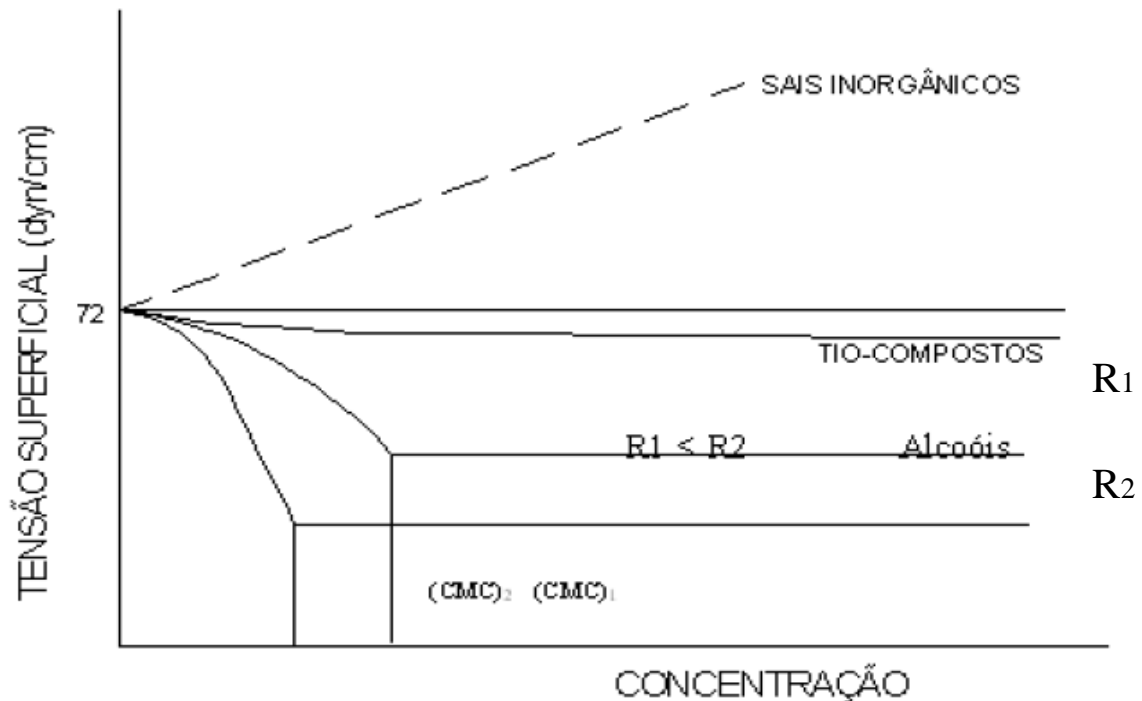


Figura 4. Variação da tensão superficial da solução em função da concentração do soluto. Fonte: CHAVES, 2013.

3.4.4 Potencial zeta (ζ)

É a variação do potencial eletrostático ao longo da interface, na dupla câmara elétrica (DCE) o único potencial que pode ser medido experimentalmente é o potencial zeta (ζ), o potencial é medido no plano de cisalhamento entre a partícula e a solução, quando os dois estão em movimento relativo, na presença de um campo elétrico. O deslocamento diferencial das partes da DCE leva ao aparecimento de um potencial eletrocinético, podendo ser medido por meio dos quatro fenômenos ou efeitos eletrocinéticos: eletroforese, eletrosmose, potencial de escoamento e potencial de sedimentação. As técnicas mais usadas na determinação do potencial ζ são a eletroforese e o potencial de escoamento. A técnica de eletroforese consiste em medir a mobilidade eletroforética das partículas carregadas em uma suspensão aquosa (as partículas eletricamente carregadas, suspensas em uma polpa, movimentam-se sob a ação de um campo elétrico aplicado).

A importância das interações coulômbicas em sistemas de flotação, especialmente no caso de oxi-minerais, levou Parks (1975) a classificar a adsorção em não específica e específica, conforme a predominância, respectivamente, de mecanismos eletrostáticos ou outros. Adsorção estritamente não específica é incapaz de reverter a carga do sólido. Considerando-se que a carga elétrica dos sólidos suspensos numa polpa aquosa atrai uma "atmosfera" de íons de carga contrária, sendo parte dessa atmosfera difusa, pode-se adotar como representativa da dupla camada elétrica a estrutura ilustrada na Figura 5.

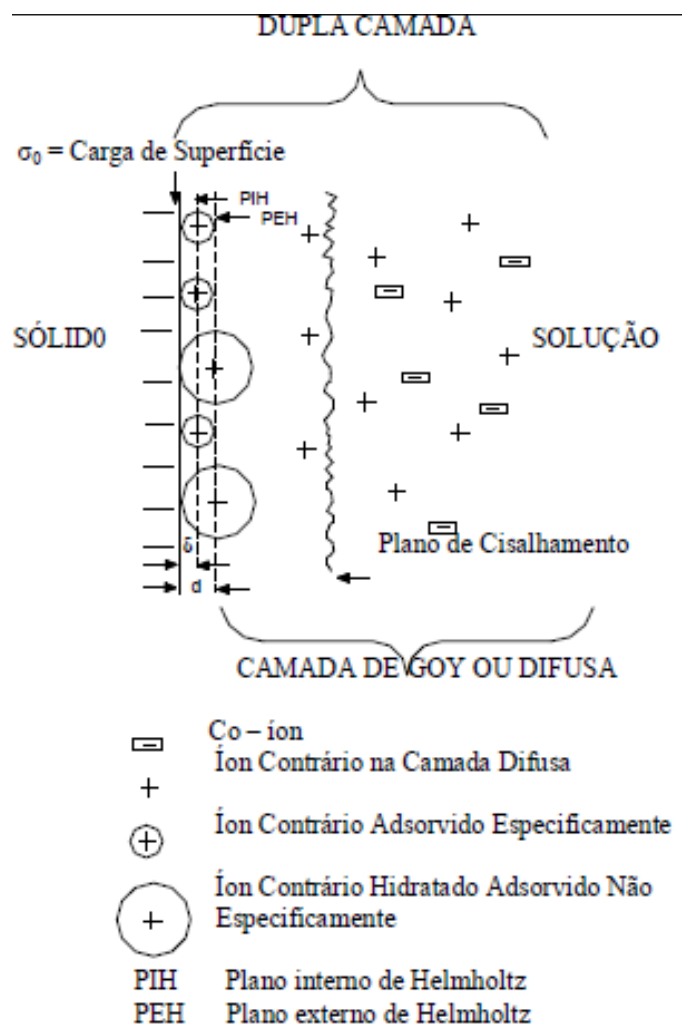


Figura 5. Estrutura da dupla camada elétrica. Fonte: CHAVES, 2013.

3.4.5 Reagentes utilizados na flotação de minério de ferro

Na flotação catiônica reversa de minérios de ferro, aminas são utilizadas como coletores de quartzo e espumante, e amido é utilizado como depressor de hematita. Estes reagentes serão abordados a seguir.

3.4.6 Aminas

Aminas são compostos orgânicos derivados da amônia (NH_3), onde um, dois ou três hidrogênios são substituídos por grupos alifáticos monovalentes, gerando, respectivamente, amina primária, secundária e terciária, como ilustrado na Figura 6. Suas cadeias carbônicas possuem entre 8 e 22 átomos de carbono (SOLOMONS, 1996; ROSE e ROSE *apud* AGUIAR, 2014).

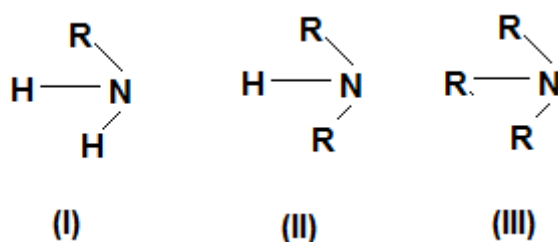


Figura 6. Molécula genérica de amina primária (I), secundária (II) e terciária (III). Fonte: AGUIAR, 2014.

Neder e Leal Filho (2006) estimam que aproximadamente 5.500 toneladas de derivados de aminas sejam utilizados anualmente no Brasil em processos de concentração de hematita, willemita, calamina, pirocloro, calcita, magnesita, silvita e alguns tipos de apatita. As aminas graxas têm em sua molécula uma parte hidrofóbica de origem oleosa ligada ao hidrogênio, cuja fonte pode ser animal, vegetal ou mineral. São derivadas de ácidos graxos através da conversão dos ácidos em nitratos, seguida por hidrogenação catalítica das nitrilas em aminas (AGUIAR, 2014).

Eteraminas são produzidas através de reação de álcool com acrilonitrila, este tipo de amina contém um grupo polar $\text{O}-(\text{CH}_2)_3$ entre a cadeia hidrocarbônica e a cabeça polar NH_2 . Devido à presença da ligação covalente C-O, característica da função orgânica éter, reagentes pertencentes a esta classe são designados eteraminas. A presença do oxigênio confere caráter hidrofílico ao grupo hidrofóbico, aumentando a solubilidade da molécula, e facilitando assim o acesso do reagente às interfaces sólido/líquido e líquido/gás. Também aumenta a elasticidade do filme líquido que envolve as bolhas e afeta o momento de dipolo da cabeça polar, melhorando suas características de espumante, uma vez que reduz o tempo de alinhamento dos dipolos durante a aproximação partícula/bolha (ARAUJO *et al.*, 2006).

Papini *et al.*, *apud* Araujo *et al.*, (2006), testaram diferentes coletores catiônicos na flotação de minério de ferro e constataram que as etermonoaminas apresentaram maior eficiência coletora que as eterdiaminas, contrariando a expectativa de que um segundo grupo

polar aumentaria o poder de coleta. Por outro lado, quando associadas com querosene, as eterdiaminas apresentaram maior eficiência de coleta que as etermonoaminas.

Condensados de amina são produtos da reação de poliamina com ácidos orgânicos. Apresentam curto comprimento de cadeia hidrocarbônica, com três ou mais átomos de nitrogênio presentes. Geralmente são sólidos e não são tão importantes quanto as aminas graxas e eteraminas (AGUIAR, 2014).

As aminas exibem propriedades de eletrólitos fracos, dissociando-se em meio aquoso, com a predominância da forma molecular ou iônica em função do pH do meio. Em meio muito alcalino existe uma carência de íons amina (R-NH_3^+) e um excesso de moléculas neutras (R-NH_2). Já em faixas de pH ácido verifica-se o contrário, como mostra a Figura 7 (VIANA; ARAUJO; PERES, 2006).

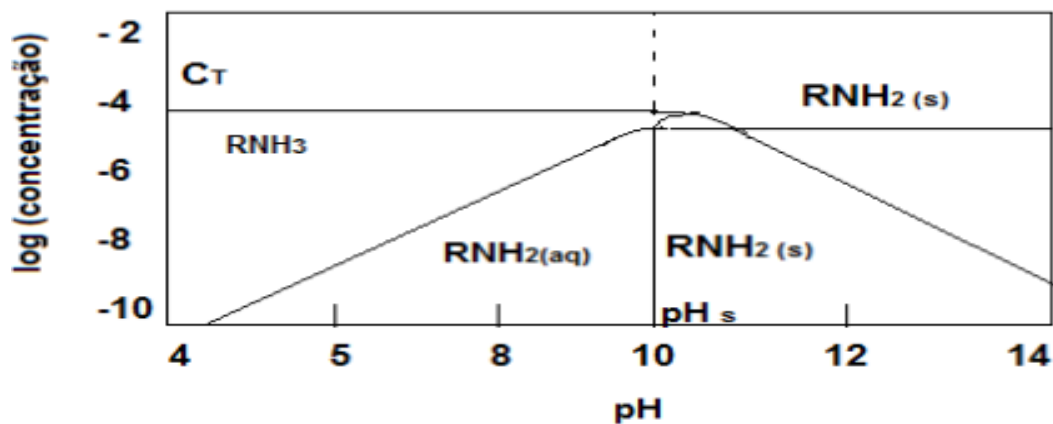


Figura 7. Concentração de espécies versus pH para uma amina primária. Fonte: LEAL FILHO, 2007.

A flotação deve ser executada em pH que estabilize tanto as espécies catiônicas quanto as espécies moleculares, tornando possível que as primeiras atuem como coletoras e as segundas como espumantes (ARAÚJO *et al.*, *apud* AGUIAR, 2014). Outra função importante das espécies moleculares (neutras) é ação cooperativa com as espécies catiônicas na interface mineral/solução, onde as moléculas neutras se posicionam em um modelo tipo “sanduíche” entre moléculas ionizadas, minimizando a repulsão eletrostática e favorecendo a formação de um filme adsorvido mais compacto e coeso (LEAL FILHO, 2007).

Teoricamente, a utilização de etermonoaminas no pH que favoreça sua forma iônica seria suficiente para obtenção de adequado grau de solubilidade. Entretanto, na prática isso não acontece, tornando-se necessário realizar neutralização parcial das mesmas, geralmente feita com ácido acético conforme a reação da Figura 8 (MOREIRA, 2013).

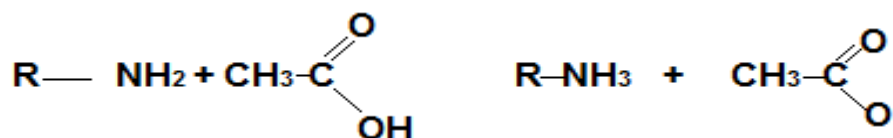


Figura 8. Reação de neutralização das aminas. Fonte: AGUIAR, 2014.

Graus de neutralização elevados impedem a presença de espécies não ionizadas, por outro lado, graus de neutralização baixos não ionizam cátions do grupo amina o suficiente. Atualmente as eteraminas já são comercializadas neutralizadas. (AGUIAR, 2014).

Uma característica dos coletores catiônicos, indesejável ao processo de flotação, é a capacidade de formar agregados em solução aquosa após uma determinada concentração de saturação. Estes agregados são denominados micelas e constituem organizações das moléculas do reagente em formas eletrostaticamente estáveis. Possuem geometria que varia de acordo com o tipo de tensoativo e de acordo com o meio no qual estão solubilizados. Em geral, as micelas são esféricas, de raio equivalente ao comprimento da cauda hidrocarbônica, mas micelas cilíndricas ou placoides também são possíveis de serem formadas (NEDER e LEAL FILHO, 2006). A concentração na qual se inicia o processo de formação dessas estruturas micelares é chamada de concentração micelar crítica (CMC), que é uma propriedade intrínseca e característica de cada produto. A partir da CMC os reagentes podem perder completamente sua capacidade de coleta, tanto por causar aprisionamento de coletores quanto por reverter a carga na superfície do mineral (NEDER e LEAL FILHO, 2006).

Para coletores catiônicos, percebe-se que quanto maior a cadeia hidrocarbônica, menor é a CMC, sendo que a presença de eletrólitos também faz com que a CMC seja reduzida. Waltson e Manser (1968) observaram que nas proximidades da CMC as aminas primárias, tipo dodecilamina, simplesmente perdem a capacidade de flotar silicatos, portanto, a otimização da quantidade de tensoativos é essencial para o sucesso do processo de flotação. Como em solução as moléculas de amina são portadoras de cargas positivas e a interface quartzo/solução é carregada negativamente em uma ampla faixa de pH ($\text{pH} > 2$), a adsorção é favorecida por atração eletrostática (adsorção não-específica). A amina adsorve como contra-íon na dupla camada elétrica existente na superfície das partículas de quartzo, reduzindo o potencial zeta das partículas e transformando-a o caráter hidrofílico em hidrofóbico (LEAL FILHO, 2007). Além da atração eletrostática, existe também interações de Van der Waals, desenvolvidas lateralmente entre as cadeias hidrocarbônicas das aminas adsorvidas. Estas

interações compactam ainda mais o filme hidrofóbico formado na superfície do mineral e contribuem para a formação de hemi-micelas (NEDER e LEAL FILHO, 2006).

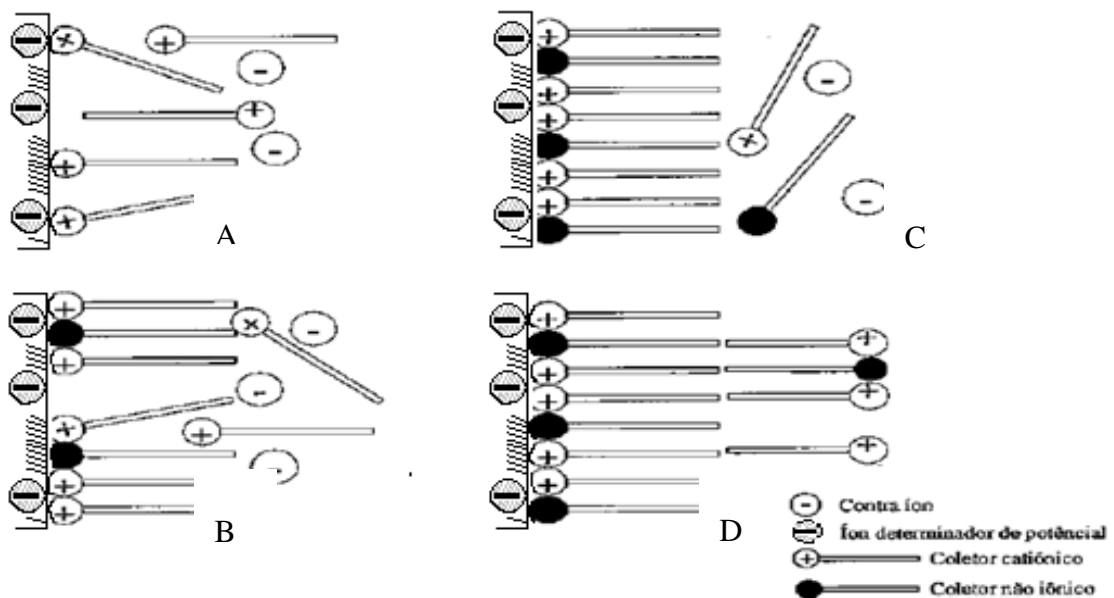


Figura 9. Representação das etapas de adsorção de aminas na superfície do quartzo até a formação de hemi-micelas. Fonte: NEDER e LEAL FILHO, 2006.

As etapas da adsorção das aminas sobre o quartzo ilustradas na Figura 9 são detalhadas a seguir:

Etapa - 1: É o estágio inicial onde se tem a adsorção individual de íons ($R-NH_3^+$) como contra-íon na superfície negativa do quartzo (Figura 9 - A). Como a densidade de adsorção ainda é muito baixa, o potencial zeta permanece praticamente inalterado, provavelmente devido à pequena carga elétrica total introduzida na dupla camada elétrica. Nesta etapa, as cadeias hidrocarbônicas da amina apresentam orientação desordenada devido à repulsão entre as cabeças polares e a atração entre as cadeias hidrocarbônicas (VIANA; ARAUJO; PERES, 2006).

Etapa - 2: Com o aumento da densidade de adsorção, inicia-se a formação de hemi-micelas, ou íons associados na interface mineral/solução (Figura 9 - B). Neste caso, ocorre associação das cadeias hidrocarbônicas da amina por forças laterais de Van der Waals. Tais hemi-micelas podem ser entendidas como cátions polivalentes possivelmente combinados com moléculas de amina livres, isto é, neutras ($R-NH_2$), que diminuem a repulsão entre as cabeças polares positivas. Essas associações moleculares na interface mineral/solução exibem sua parte polar voltada para o mineral e sua parte apolar direcionada para a solução (FUERSTENAU, 1995).

Ainda segundo esse autor, o início da formação de hemi-micelas coincide com um pronunciado aumento na flotabilidade dos oximinerais.

Etapa - 3: Aumentando ainda mais a densidade de adsorção do coletor, a camada de moléculas adsorvidas se torna cada vez maior e mais compacta até que se constrói uma monocamada com moléculas verticalmente orientadas e densamente empacotadas, como na (Figura 9 - C). Antes que tal situação esteja completamente estabelecida, as mais altas recuperações do mineral estariam ocorrendo (NEDER e LEAL FILHO, 2006).

Etapa - 4: Caso a concentração de coletor seja maior ou igual a concentração micelar crítica (CMC), a flotabilidade do mineral fica comprometida devido a adsorção de uma segunda camada onde as moléculas apresentam orientação reversa, como na (Figura 9).

3.4.7 Amido

Nos sistemas de flotação, o amido é largamente utilizado como depressor de óxidos de ferro (flotação catiônica reversa de minério de ferro), depressor de ganga carbonática e ferrífera (flotação direta de minério fosfático), depressor de ganga (argilo-minerais) na flotação direta de Silvinita com aminas e depressor de hiperstênio (silicato de ferro e magnésio) na flotação direta de sulfeto de cobre (AGUIAR, 2014). Dentre as vantagens de se utilizar os amidos no processamento mineral estão, disponibilidade, atoxidade, biodegradabilidade, baixo custo e facilidade de produção (HADZERIGA e GIANNINI, 1988; ALBUQUERQUE, 2010).

O amido é encontrado em todos componentes dos vegetais de folhas verdes, seja nas suas raízes, caules, sementes ou frutas. Depois dos açúcares mais simples (glicose, frutose, maltose e sacarose) é o principal carboidrato que as plantas superiores sintetizam (CEREDA *apud* MOREIRA, 2013). Trata-se de um polissacarídeo formado pela condensação de moléculas de D-glicose geradas através do processo fotossintético de vegetais, sendo utilizado pelos mesmos como reserva energética na forma de partículas discretas ou grânulos. Apresenta a fórmula simplificada $(C_6H_{10}O_5)_n$, onde **n** é o número de unidades de D-glicose ou aldo-hexose (ALBUQUERQUE, 2010; AGUIAR, 2014).

Este depressor é uma substância de alto peso molecular, obtido de várias raízes, tubérculos e cereais. Sua característica hidrofílica se deve à presença dos grupos OH nas unidades glicose. Basicamente é constituído por dois polímeros, amilose e amilopectina, de

composição química similar, mas com estrutura de cadeia distinta (LEJA *apud* ALBUQUERQUE, 2010):

i. Amilose: formada por unidades de glicose unidas por ligações glicosídicas α (1 \rightarrow 4), originando uma cadeia linear (Figura 10). Em solução, sua molécula apresenta estrutura em forma de hélice, devido as pontes de hidrogênio intramolecular entre os grupos OH.

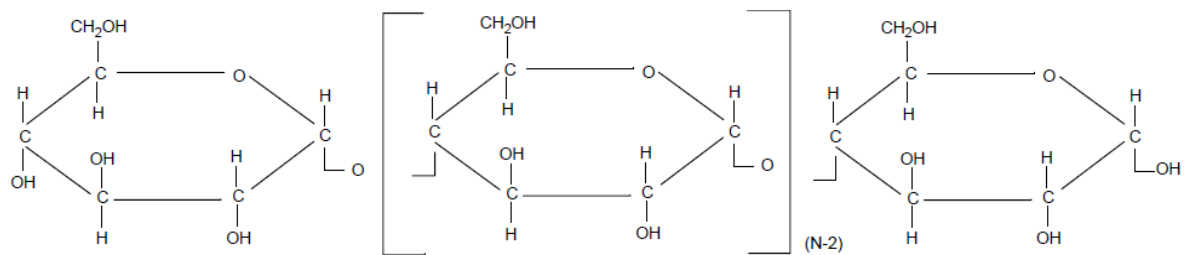


Figura 10. Fórmula estrutural da amilose. Fonte: LEJA, 1982.

ii. Amilopectina: polímero de massa molecular muito alta, formado por unidades de glicose unidas em α (1 \rightarrow 4), e α (1 \rightarrow 6), formando uma estrutura ramificada, conforme a Figura 11.

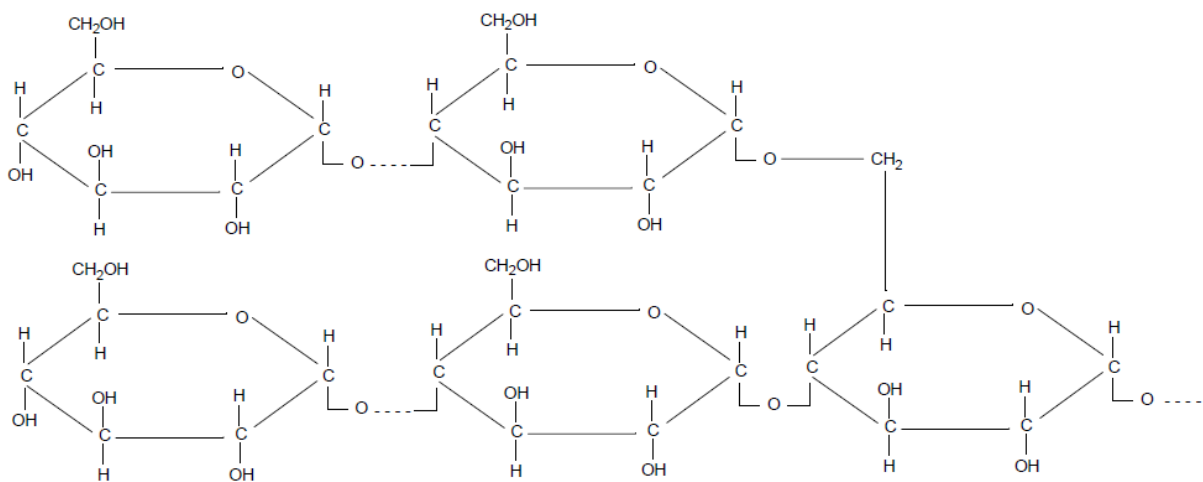


Figura 11. Fórmula estrutural da amilopectina. Fonte: LEJA, 1982.

Segundo Peres e Araújo *apud* Albuquerque (2010), o número de unidades D-glicose para a amilose se encontra na faixa de 200 a 1.000 e para amilopectina supera 1.500. A proporção amilopectina/amilose difere em relação às variedades das espécies botânicas, de acordo com o grau de maturação da planta. No caso do amido de milho, a relação 3/1 prevalece para as modalidades comuns do milho amarelo. Já o amido ceroso e o arroz glutinoso possuem 100% de amilopectina. Além de amilopectina/amilose, os amidos não

modificados contêm matéria mineral, proteínas, umidade, fibras e óleo. O teor do óleo acima de 1,5%, são nocivos, pois atuam inibindo o processo de espumação.

O efeito de amidos com altos teores de óleo (triglicerídeos) na inibição de espumas de flotação tem sido detectado industrialmente em diversas usinas do Quadrilátero Ferrífero. No caso de minerais de ferro teores de óleo superiores a 1,8% inibem a formação de espumas, prejudicando o processo de flotação (ARAÚJO *et al.*, 2004).

Peres e Correa (1996) demonstraram através de ensaios de microflotação em tubo de *Hallimond* que a zeína, proteína proveniente do milho, também é um depressor eficiente de hematita, assim como a amilopectina e o amido de milho convencional.

Pinto, Araújo e Peres (1992) mostraram que a ação depressora das espécies constituintes dos amidos sobre os minerais apatita, calcita, hematita e quartzo obedecem à seguinte ordem decrescente:

- i. Apatita e calcita: amido (~75% amilopectina + ~25% amilose) > amilopectina > amilose;
- ii. Quartzo: amido (~75% amilopectina + ~25% amilose) > amilose > amilopectina;
- iii. Hematita: Amilopectina > amido (~75% amilopectina + ~25% amilose) > amilose.

Denardin e Silva *apud* MOREIRA (2013) afirmam que a amilopectina é estruturalmente a fração mais importante, pois sozinha é suficiente para formar o grânulo, como ocorre em mutantes que são desprovidos de amilose (amidos *waxy* ou cerosos). Quanto à amilose, sua posição exata dentro do grânulo é de difícil detecção. Acredita-se que ela esteja localizada entre as cadeias da amilopectina e aleatoriamente entremeada entre as regiões amorfas e cristalinas.

Aguiar (2014) reporta que para averiguação da origem de um determinado grânulo de amido é necessário caracterizá-lo através da determinação de seu tamanho e formato, bem como de suas proporções relativas de amilopectina e amilose. Isto é feito através de microscopia e titulações potenciométricas ou espectrofotométricas com reações ao iodo. Já Moreira (2013) acrescenta a temperatura de gelatinização e a posição do hilo (parte central de grânulo de amido) como características também utilizadas para distinguir amidos de diferentes origens botânicas.

O amido mais utilizado nos processos físico-químicos de concentração de minérios é o amido de milho, seja o fubá ou gritz de milho (popularmente conhecido como canjuquinha de milho), com composição aproximada de 25% de amilose e 75% de amilopectina. A Tabela 1

mostra algumas características físicas e químicas do amido de milho usualmente empregado nas operações de processamento mineral.

Tabela 1. Análise química e granulométrica dos amidos de milhos. Fonte: MOREIRA (2013).

Propriedade	Unidade	Amido de Milho	
		Fubá	Gritz
Umidade	%	13,5	13,0
Conteúdo Amiláceo	%	85,0	76,0
Teor de Proteínas	%	-	8,6
Teor de Óleo	%	1,5	0,6
Fibra + Outros	%	-	1,0
1000 µm	% Ret. Simples	-	1,0
592 µm	% Ret. Simples	5,0	35,0
419 µm	% Ret. Simples	5,0	47,0
297 µm	% Ret. Simples	10,0	8,0
149 µm	% Ret. Simples	15,0	4,0
74 µm	% Ret. Simples	30,0	2,0
-74 µm	% Passante	35,0	3,0

A composição química da fração amilácea e a importância quantitativa dos outros constituintes variam de acordo com a origem botânica da qual é extraído. A Tabela 2 adaptada de Cereda (2001) mostra a composição química de algumas fontes de amido utilizadas por Moreira (2013).

Tabela 2. Composição de amidos de diferentes fontes botânica Fonte: Adaptada de CEREDA (2001).

Nome Científico	Nome Popular	Amido Total (%) ²	Açúcar Total (%) ²	Fibras (%) ²	Proteína (%) ²	Matéria Graxa (%) ²	Cinzas (%) ²	Outros (%) ³	Amilopectina (%)	Amilose (%)
Maranta arundinacea	Araruta ²	82	2,4	3,7	5,8	0,2	1,5	4,4	80	20
Dioscorea esculenta	Inhame ²	78	1,3	1,2	8,2	0,1	1,1	10,1	93	7
Ipomoea batatas	Batata doce ²	83	4,6	2,4	1,9	0,4	1,3	6,4	82	18
Manihot esculenta	Mandioca ²	82,5	2,2	2,7	2,6	0,3	2,4	7,3	80	18
Colocasia esculenta	Taro ¹	83	2,6	2,2	2,3	0,5	1,2	8,2	93	7
Arracacia xanthorrhiza	Batata baroa ²	83	4,5	2,8	3,9	0,3	0,2	5,4	82	18
Musa paradisiaca	Banana Caturra ²	83	1,7	2	2,8	0,3	1,1	9,1	80	20
Zea mays	Milho ²	80	0,7	4	8,9	0,8	0,4	5,3	75	25
Zea mays waxy	Milho Ceroso ²	95	1	0,5	0	0	1	2,5	95	5

3.4.7.1 Cristalinidade do grânulo de amido

Análises do grânulo de amido com microscópio ótico de luz polarizada mostram que os mesmos, em seu estado nativo, exibem birrefringência, evidenciando uma estrutura altamente organizada do grão. A refração pelas suas regiões cristalinas resulta no modelo típico de “Cruz de Malta”, o que caracteriza a orientação radial das macromoléculas. A cristalinidade é confirmada através da difração de raios-X, que fornece três tipos diferentes de padrões de difratogramas (DERNARDIN e SILVA, 2009):

- i. Cristalinidade A: de cereais e grãos. Descrita como uma unidade celular monocíclica altamente condensada e cristalina, onde 12 resíduos de glicose de duas cadeias no sentido anti-horário abrigam quatro moléculas de água entre as hélices;
- ii. Cristalinidade B: de tubérculos e raízes. Composta por uma unidade básica de cadeias que são empacotadas em um arranjo hexagonal, onde a unidade celular tem duas duplas hélices no sentido anti-horário, alinhadas e arranjadas em paralelo. Essa estrutura contém 36 moléculas de água para cada 12 resíduos de glicose. A metade dessa água é fortemente ligada às duplas hélices, e a outra metade é concentrada em um eixo em parafuso;
- iii. Cristalinidade C: de vários feijões, ervilha e banana. Apresenta mistura de células unitárias A e B, possuindo uma forma de empacotamento cristalino intermediária entre os dois primeiros tipos.

Uma característica estrutural que tem sido identificada são os anéis de intercrescimento do grânulo (Figura 12). Estas estruturas sugerem que o amido recém-sintetizado vai se depositando em círculos concêntricos aumentando o tamanho do grânulo progressivamente. Assim, a primeira camada (*hilum*) corresponde ao centro, que contém grande proporção de terminais redutores das moléculas de amido e é normalmente menos organizada que o resto do grânulo. Os terminais não redutores da amilose e amilopectina irradiam para a superfície, permitindo a adição de mais resíduos de glicose para aumentar as cadeias de amilopectina (DERNARDIN e SILVA, 2009).

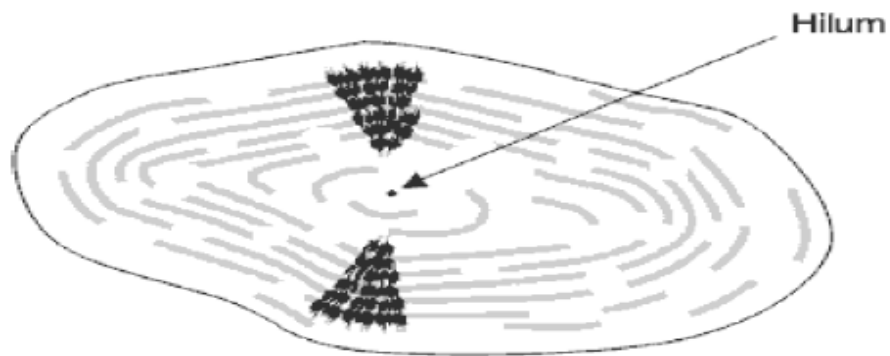


Figura 12. Estrutura interna de intercrescimento do grânulo de amido. Fonte: DERNADIN e SILVA, 2009.

Os anéis de crescimento são organizados em regiões cristalinas e amorfas alternadas, motivo pelo qual é frequentemente descrito como um polímero semicristalino. A fusão desses cristais e o rompimento dessa estrutura organizada formam a base para a gelatinização. A região cristalina é constituída pelas duplas hélices das cadeias paralelas A e B da amilopectina, sendo mais compacta, enquanto que a região amorfa, menos ordenada, contém os pontos de ramificação das cadeias laterais da amilopectina e possivelmente alguma amilose (Figura 13) (OATES,1997; ELIASSON *apud* DERNADIN e SILVA, 2009).

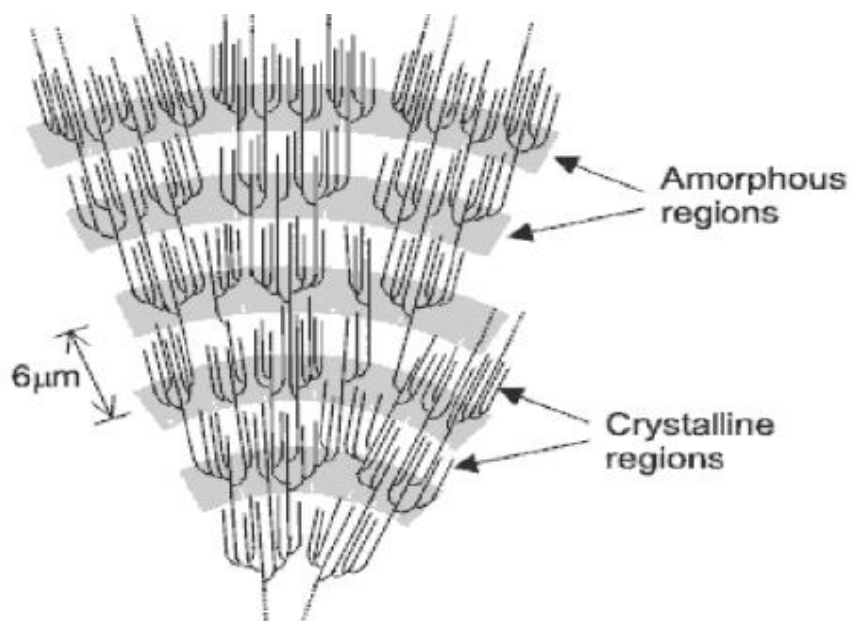


Figura 13. Ilustração das regiões amorfas e cristalinas da amilopectina. Fonte: DERNADIN e SILVA, 2009.

3.4.7.2 Gelatinização e Retrogradação

Os amidos não são solúveis em água fria. A solubilização, também denominada gelatinização, pode ser realizada por tratamento térmico ou por uso de solução de hidróxido de sódio (tratamento químico). Neste processo, as pontes de hidrogênio intergranular são rompidas e ocorre a perda da organização estrutural (perda da birrefringência), com o conseqüente inchamento dos grânulos, devido a absorção de água, e aumento da transparência e viscosidade da suspensão (AGUIAR, 2014).

A gelatinização por efeito térmico consiste no aquecimento de uma suspensão de amido em água a uma temperatura superior a 56°C. Já a gelatinização por soda cáustica consiste na absorção de parte do álcali da solução diluída de hidróxido de sódio pelas moléculas da suspensão de amido (AGUIAR, 2014). O processo de gelatinização tem seu início no *hilum* do grânulo, por ser uma região amorfa com poucas pontes de hidrogênio, e se expande para as extremidades com maior cristalinidade (DERNADIN e SILVA 2009).

Depois da desnaturação das moléculas de amido pela quebra das pontes de hidrogênio intergranular, há a exposição dos terminais OH para a solução, aumentando a solubilidade desta espécie por ligações de hidrogênio com a água. Grânulos de diferentes composições e tamanhos gelatinizam-se em diferentes condições de tempo, temperatura e dosagem de soda cáustica. O parâmetro temperatura de gelatinização, por exemplo, é útil para identificação de um determinado amido, uma vez que a temperatura de gelatinização diminui com o aumento do conteúdo de amilopectina (PINTO *et al.*, 1992).

Segundo Dernardin e Silva (2009) amidos com maior conteúdo de amilose, por apresentarem mais regiões amorfas e menos regiões cristalinas, apresentam menores temperaturas de gelatinização. Entretanto, estudos realizados com amido de arroz têm apontado resultados contraditórios com relação à influência da amilose nas propriedades de gelatinização.

Eliasson *apud* Dernardin e Silva (2009) elucida que, quando é armazenado e resfriado, o amido gelatinizado pode sofrer um fenômeno denominado de retrogradação. Com o passar do tempo, as moléculas do amido perdem energia e as ligações de hidrogênio se restabelecem, assim, as cadeias se (re)associam na forma de hélices. Com isso, a solução vai se tornando turva e a viscosidade aumenta (viscosidade de *setback*). Dependendo do grau de retrogradação pode haver precipitação de grânulos insolúveis de amido levando a separação de fases. Após a gelatinização, portanto, recomenda-se que o tempo de armazenamento não seja longo. A

amilopectina retrograda apenas 10% em 100 dias, ao passo que a retrogradação da amilose leva apenas algumas horas, sendo favorecida por baixas temperaturas (PAVLOVIC, 2002).

Para caracterizar o comportamento dos grânulos frente à gelatinização utilizam-se técnicas como: difração de raios X, dispersão de nêutrons de pequeno ângulo, microscopia ótica com luz polarizada e, principalmente, calorimetria diferencial de varredura (DSC – *Differential Scanning Calorimetry*) e medições da viscosidade da pasta de amido através de equipamentos como o viscoamilógrafo Brabender (RVA – *rapid viscoanalyser*) e os viscosímetros de rotação (MOREIRA, 2013).

3.4.7.3 Mecanismo de adsorção do amido nos óxidos de ferro

A adsorção de polissacarídeos na interface mineral/solução ainda não é bem compreendida e constitui objeto constante de estudo. Inicialmente acreditava-se que a principal responsável pela atração entre a molécula de amido e uma determinada superfície mineral seriam ligações de hidrogênio. Com o surgimento de novas técnicas analíticas, os estudos até então realizados sugerem a formação de uma ligação química entre esses dois componentes (TURRER *apud* MOREIRA, 2013).

O amido se adsorve na interface mineral/solução predominantemente através de interações entre grupos hidroxila (OH) existentes em sua estrutura molecular e cátions metálicos hidroxilados (MOH) existentes na estrutura cristalina dos minerais, formando um hidroxicomplexo (OH/MOH) (LEAL FILHO, 2007). Apesar de outras contribuições de menor importância, como pontes de hidrogênio e ligações hidrofóbicas, a adsorção do amido no quartzo se dá por mecanismos de complexação. Assim, esta adsorção é de natureza específica e ocorre em maior intensidade na faixa de pH em que o cátion metálico (exposto na superfície) estiver hidroxilado (LEAL FILHO, 2007). Weissenborn *et al. apud* Moreira (2013) investigaram os mecanismos de adsorção de amido de trigo na hematita. Os resultados de espectroscopia sugeriram que ocorria a formação de um complexo na superfície mineral. Evidências suportando esses resultados foram obtidas através de testes de dessorção e pela complexação de amilopectina em solução de Fe^{3+} . A existência de ligações de hidrogênio entre o amido e a superfície mineral não foi descartada, uma vez que o método utilizado não era capaz de distinguir ligações de hidrogênio formadas durante a adsorção das intramoleculares existentes no amido. Desse modo, os autores indicaram o esquema de adsorção ilustrado na Figura 14 a seguir.

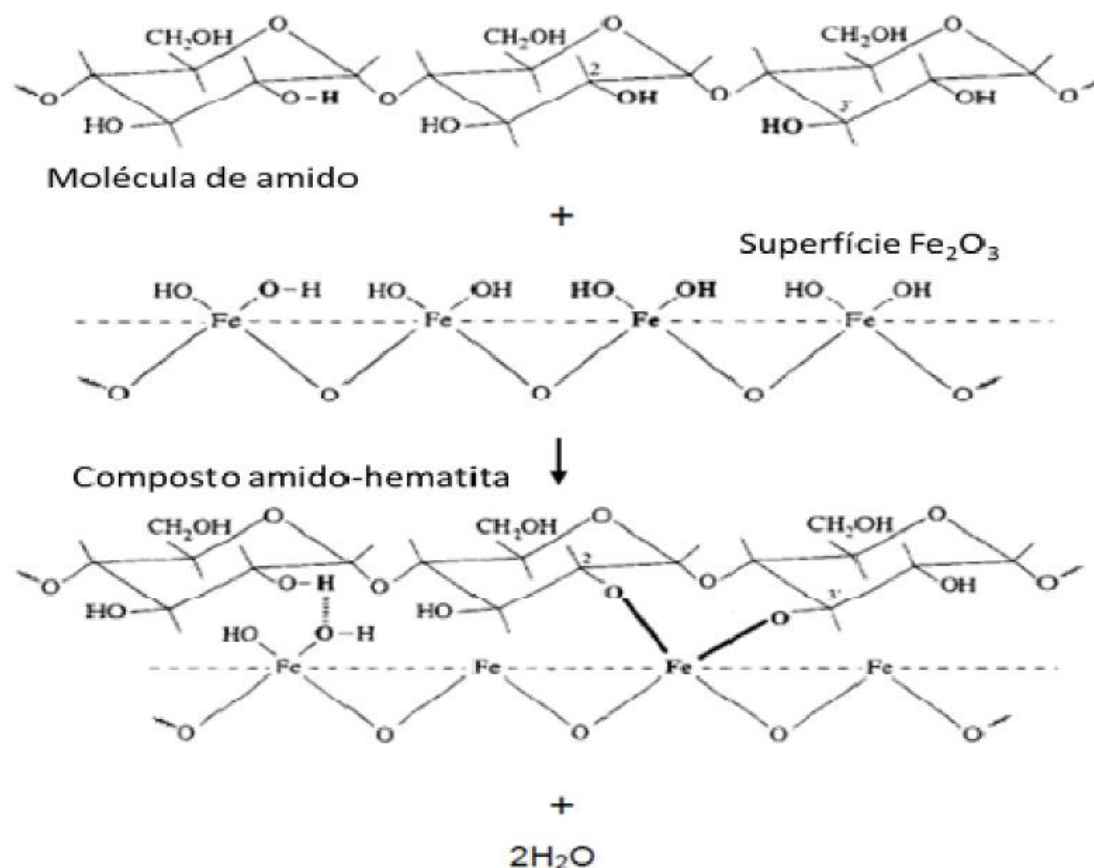


Figura 14. Mecanismo de complexação entre o amido de trigo e a superfície da hematita. Fonte: MOREIRA, 2013.

Pavlovic e Brandão *apud* Moreira (2013) através de espectrometria no infravermelho (EIV) mostraram que a adsorção de amido é preferencial na superfície da hematita se comparada a adsorção na superfície do quartzo.

3.4.7.4 Aspectos econômicos dos amidos e féculas

A principal fonte comercial de amido é o milho (Figura 15). Outras fontes comuns são as raízes e tubérculos, como a mandioca e a batata, e os cereais como o trigo e o arroz. No mundo são produzidos cerca de 48,5 milhões de toneladas de amido, sendo os EUA responsáveis pela maior produção de amido de milho (24,6 milhões de toneladas, 62,4%) e a União Europeia a maior produtora de amido de batata (1,8 milhões de toneladas, 69,2%) e trigo (2,8 milhões de toneladas, 68,3%), sendo a produção mundial de outros amidos na ordem de 2,5 milhões de toneladas, com a mandioca como principal fonte (FRANCO *et al*, 2001).

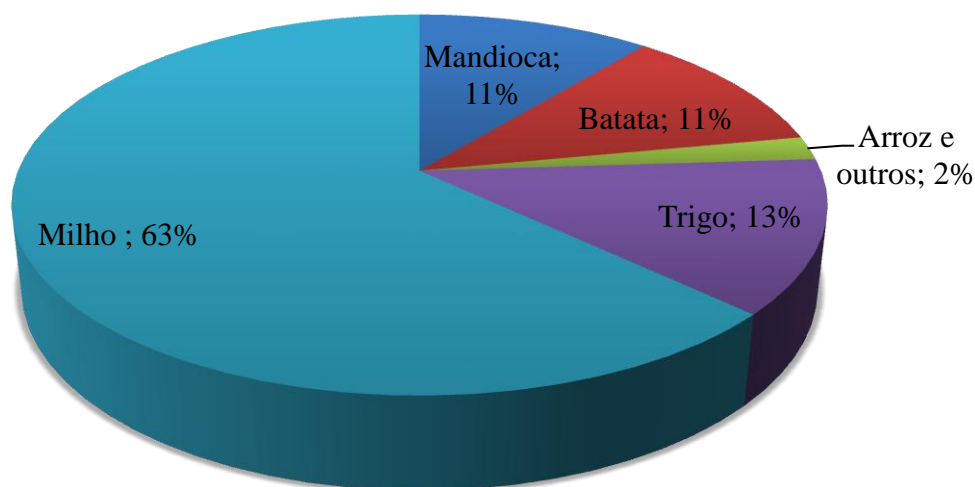


Figura 15. Produção mundial de amido. Distribuição por matéria-prima. Fonte: Pierin Jr, 2009.

Estimativas recentes calculam que o mercado de amido no Brasil esteja em torno de 1,6 milhões de toneladas/ano, ocupando o amido de mandioca 35% a 40% desse total (VILPOUX, 2004). O crescimento do consumo do amido de mandioca em geral é decorrente do uso no beneficiamento mineral nas indústrias. Este fato devido às suas características especiais, tais como menor temperatura de gelatinização, formação de pastas claras, menor quantidade de substâncias acompanhantes (óleos, fibras) e resistência à retrogradação, este tem apresentado vantagens sobre outros amidos em alguns mercados (LEONEL; OLIVEIRA; DUARTE FILHO, 2005).

Leonel, Oliveira e Duarte Filho (2005) estabeleceram a produtividade potencial de amido por hectare cultivado para várias culturas de tuberosas tropicais, conforme pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3. Produtividade, % de amido base úmida e rendimento potencial de amido das tuberosas amiláceas por hectare. Fonte: Leonel, Oliveira e Duarte Filho, 2005.

Tuberosas	Produtividade (toneladas/ha)	% amido (base úmida)	Rendimento potencial de amido por hectare em toneladas
Açafrão	8 a 11	8,83	0,71 a 0,97
Ahipa	8 a 30	7,68	0,61 a 2,30
Araruta	6 a 20	24,23	1,45 a 4,86
Batata doce	10 a 50	14,72	1,47 a 5,36
Gengibre	20 a 40	11,42	2,28 a 4,57
Inhame	20 a 40	20,43	4,09 a 8,17
Mandioca	10 a 40	31,09	3,11 a 12,44
Milho	17 a 20	28,3	10 a 18
Salsa	10 a 20	15,75	1,58 a 3,15
Taioba	15 a 40	24,69	3,70 a 9,88
Taro	4 a 17	13,9	0,56 a 2,36

Bermudez *apud* Franco *et al.* (2001) afirma que na América do Sul, as numerosas fontes de raízes e tubérculos são subutilizadas, pois esses amidos, pouco estudados até o momento, são susceptíveis de apresentar características físico-químicas diferentes dos amidos comuns de utilização industrial. Assim, pesquisas com amidos de tuberosas tropicais podem levar ao desenvolvimento de novas oportunidades de mercado, além de melhorar a renda dos agricultores.

As duas principais produtoras de amido de milho, em território nacional, detêm cerca de 70% da produção, são as multinacionais americanas Corn Products Brasil, hoje Ingredion, e a Cargill. A forte concentração deste mercado dificulta o acesso aos dados de produção. Já no caso da fécula de mandioca existem informações disponíveis, principalmente com os dados da Associação Brasileira de Amido de Mandioca (ABAM).

A literatura enfatiza o uso do amido no setor alimentício, principalmente como base para alimentos industrializados, no setor papelero, melhorando as propriedades físicas do papel, químico, em plásticos biodegradáveis, têxtil, metalurgia e mineração (FRANCO *et al.*, 2001). O processo de extração do amido consiste na moagem da planta em água, filtragem da polpa para obtenção de grânulos de amido e posterior coleta por centrífugas e secagem dos grânulos (RAVVE, 1995).

Em mineração, o amido permite a separação seletiva entre os minerais, pois adsorve na superfície de óxidos de ferro e carbonatos, conferindo-lhes caráter hidrofílico e impedindo a adsorção de outras espécies químicas adicionadas posteriormente. Segundo Franco 2001, quanto maior é o conteúdo de amilopectina no amido, melhor é a separação dos minerais, fato

que favorece a fécula de mandioca, que contém teores de amilopectina superiores ao amido de milho. O custo dessa matéria prima é muito importante, o que explica o uso de fubá de milho e de farinha de mandioca, produtos com altos teores de amido, mas com presença de fibras.

No Brasil, todas as grandes unidades produtoras de *pellet-feed* utilizam a rota de flotação catiônica reversa da sílica, empregando amido de milho como agente depressor dos óxidos e hidróxidos de ferro e eteramina como coletor de silicatos (TURRER e PERES, 2010).

A utilização de outros polímeros naturais ou sintéticos, como depressores de minerais portadores de ferro vem ganhando destaque nos últimos anos. Vários estudos já comprovaram a eficácia da utilização desses reagentes frente ao amido de milho.

Turrer (2007) investigou a ação depressora da carboximetilcelulose, lignossulfonato, poliácridamidas, goma de guar e ácido húmico na hematita e quartzo. Os resultados obtidos mostram que o amido e goma de guar são os reagentes mais aconselháveis para a separação da hematita do quartzo durante a flotação. Ácido húmico e carboximetilcelulose exibiram comportamento intermediário, enquanto todos os outros reagentes exibiram baixo desempenho.

Kar *et al.*, (2013) avaliou o desempenho do amido solúvel, amido de milho, amido de batata e amido de arroz, como depressores de hematita, na presença do coletor de quartzo dodecilamina (DDA). Verificaram que os quatro amidos têm ação depressora eficaz para a hematita em pH neutro a levemente alcalino. Entretanto, a utilização do amido solúvel proporcionou a máxima recuperação de ferro (89,6%), dentre os amidos testados, para uma dosagem de 400 g/t. Os autores supracitados ainda afirmam que considerando o aspecto comercial, o amido de milho é o mais preferível, uma vez que é mais barato do que o amido solúvel.

Santos (2001) testou amidos de algumas variedades de inhame em comparação ao amido de milho, padrão utilizado na mineração. Com relação à porcentagem de Fe no concentrado, os amidos de inhame apresentaram valores inferiores ao do padrão. Já com relação ao teor de SiO₂ no concentrado, os amidos de todas variedades de inhame obtiveram valores maiores que o padrão. Como as diferenças entre os resultados do amido padrão e os amidos de inhame foram pequenas, o autor concluiu que o amido de inhame atende às exigências da indústria de mineração no processo de flotação.

3.4.7.5 Uso de diferentes amidos na Flotação

A Samarco S/A, empresa mundialmente reconhecida pelo desenvolvimento em aspectos relacionados à flotação de minério de ferro, como a instalação de circuito de flotação para material fino que era descartado como rejeito e emprego de misturas de amina e diamina como coletor do quartzo e de amido de mandioca como depressor da hematita (Mapa *et al.*, *apud* Turrer (2007)). A seleção de um reagente de flotação, segundo Nagaraj (2005), deve ser feita considerando fatores técnicos e limitações conforme listados na Tabela 4.

Tabela 4. Fatores importantes que ditam a seleção de reagentes. Adaptado de NAGARAJ (2005).

FATORES TÉCNICOS	LIMITAÇÕES
Química do reagente	Manuseio
Características da espuma	Questões de toxidade e ambientais
Química da água e minerais de ganga	Odor
Estabilidade	Manufaturador
Distribuição do tamanho de partícula	Custo
Efeitos em processos subsequentes	Ajuste estratégico
Recuperação de minerais de valor secundário	
Circuito do concentrador, condições do processo	
Limitações do concentrador	
Compatibilidade com outros reagentes	

O amido por ser biodegradável, não tóxico, de baixo custo e atender aos requisitos técnicos é sem sombra de dúvidas, a opção mais atrativa para a depressão mineral. Turrer (2007) estima que no Brasil, a cada ano, são tratadas 80 milhões de toneladas de minério de ferro por meio de flotação e que são consumidas anualmente cerca de 45 mil toneladas de amido neste processo. Segundo Turrer (2007), o custo de aquisição do amido utilizado para processamento mineral está em torno de R\$ 400/tonelada do produto.

De acordo com informações internas da empresa Ingredion, fornecedora dos amidos Hipix's o preço médio do amido de milho Hipix é de R\$ 2,00/kg. No setor minerário, ainda é um desafio encontrar depressores alternativos de baixo custo e alto rendimento. Em 2006, o amido foi responsável por 30 % dos gastos com reagentes do concentrador da Samarco (Figura 16). Isto não considerando a soda (NaOH) utilizada para sua gelatinização (TURRER, 2007).

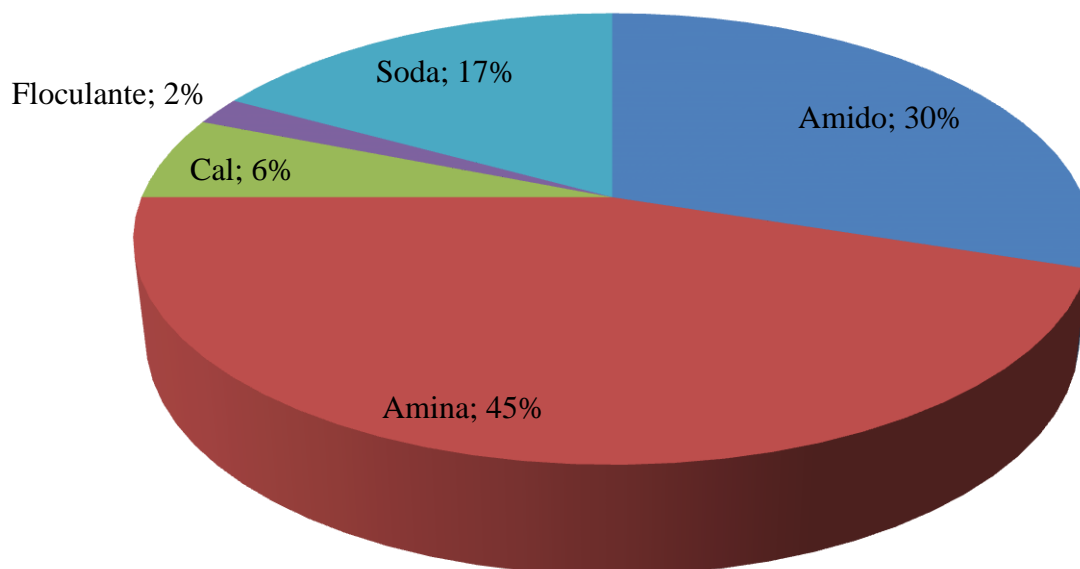


Figura 16. Desembolsos por insumo de reagentes na Samarco no ano de 2006. Fonte: Turrer, 2007.

Os concentradores de minério de ferro e fosfato consomem juntos aproximadamente 55 mil toneladas de amido por ano. A Tabela 5 expressa com mais detalhes esse número.

Tabela 5. Consumo mensal de amido nas usinas brasileiras de minério de ferro e fosfato.

Indústria mineral	Empresa	Consumo (toneladas/mês)
Ferro	Samarco	1500
	Vale Conceição	500
	Vale Cauê	450
	Vale Timbopeba	300
	Vale Alegria	350
	Vale Pico	300
	Vale Vargem Grande	260
	CSN Casa de Pedra	160
Fosfato	Fosfertil Tapira	250
	Fosfertil Catalão	160
	Bunge Araxá	265
	Bunge Cajati	35
	Copebrás	75

Fonte: Turrer, 2007

4 METODOLOGIA

4.1 Preparação das amostras e caracterização

Utilizou-se amostras de hematita e quartzo. A Hematita utilizada nos ensaios de flotação no tubo de *Hallimond* e na célula em bancada foi proveniente da mina do Pico – VALE S/A, cidade de Itabirito-MG, já o quartzo foi proveniente a mineração Zé da Estrada, na cidade de Araçuaí - MG.

4.1.1 Preparação das amostras

As amostras de hematita e quartzo foram preparadas em etapas similares, cominuidas em moinho de bolas, com diâmetro externo de 32 cm, diâmetro interno de 30,4 cm e comprimento interno de 29 cm. A quantidade de mineral inserido no moinho para a cominuição foi de 5 kg, e o procedimento ocorreu pelo período de 10 min, à rotação de aproximadamente 36 rpm. Foram utilizadas como corpos moedores 184 bolas de aço com massa média de 75 g. A Figura 17 apresenta o moinho e os corpos moedores utilizados.



Figura 17. Moinho de bolas utilizado na cominuição das amostras.

Após a moagem, o material foi submetido ao peneiramento, que foi realizada a úmido, com o intuito de facilitar a passagem dos finos pela tela. O equipamento utilizado foi o peneirador suspenso, marca Marconi, o material retido em 180 μm (80 #) retornava para o moinho e material passante em 180 μm e retido em 75 μm (200 #) foi a granulometria empregada no presente trabalho, já o material passante em 75 μm foi descartado em forma de lama.

4.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise de diferentes alíquotas das amostras de quartzo e hematita na granulometria de 111 μm (150 #) no microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado a um espectrômetro de raios-x dispersivo em energia (EDS) permitiu obter uma descrição das seguintes características do minério: formas das partículas; liberação entre os minerais de interesse nas partículas e composição química.

A caracterização microestrutural foi realizada no Laboratório de Multiusuário de Microscopia de Alta Resolução (Labmic) na Universidade Federal de Goiás por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), Jeol, JSM – 6610, equipado com EDS, Thermo scientific NSS Spectral Imaging.

4.1.3 Espectrometria de fluorescência de raios-x via FRX

As análises químicas foram realizadas no Laboratório químico da empresa Anglo American, conforme procedimentos internos. O aparelho utilizado para realizar a fluorescência de raios-x (FRX) foi um espectrômetro da empresa Axios (AXIOS MAX DY5001). A preparação das amostras segue o fluxograma da Figura 18 a seguir:

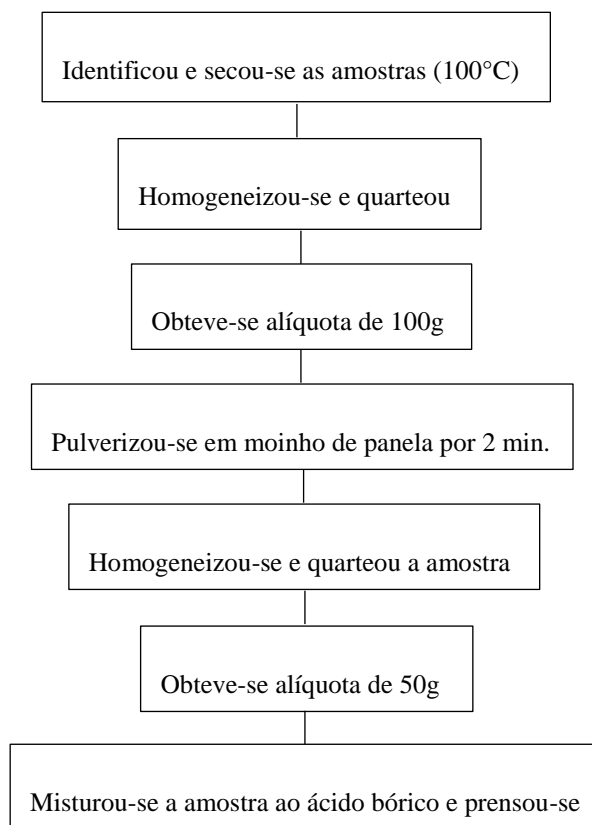


Figura 18. Fluxograma da preparação de amostras para Espectrometria de fluorescência de raios-x.

Obs.: A superfície da amostra tem que estar lisa e polida, para não ocorrer erro na leitura. Os resultados das análises foram expressos em % e geralmente esta análise pelo método do pó prensado não fecha em 100% devido ao processo de perda ao fogo.

4.2 Caracterização dos amidos

Foram realizados testes com as seguintes fontes de amido: amido de milho, amido de mandioca, fécula de batata e fécula de mandioca todos fornecidos pela empresa de nome Cargill e amidos de milho com nome comercial HIPIX®100, HIPIX®101 e HIPIX®102 doados pela empresa Ingredion. Primeiramente caracterizou-se os amidos e féculas, para isso foi escolhido testes que segundo a bibliografias consultadas são mais relevantes para entender a gelatinização dos amidos e féculas. O primeiro teste foi para determinação da amilose, através do método de AACC- American Association Cereal Chemists 1995, que consiste preparação de amostras de amidos e féculas em mistura com a solução de 1 mL de ácido acético 1 mol/L e 2 mL de solução de iodo-iodeto de potássio que ao reagir com o amido forma uma complexo de coloração azul desenvolvida devido ao aprisionamento do iodo no interior da cadeia de amilose, logo ficou em repouso por 30 min em câmara escura, em seguida foi feita a leitura de absorvância a 620 nm no Espectofotometro marca Biospectro, modelo SP220.

O conteúdo de amilose foi calculado inserindo os valores das absorvâncias onde leu-se cada amostra na equação da reta obtida através da curva de calibração feita com amilose pura (Sigma-Aldrich) na faixa de 0,004 – 0,024 mg/mL ($R^2 = 0,998$). Os resultados foram expressos em mg/ml e realizados em triplicata. Além do teste de amilose foi feito o teste de inchamento e solubilidade, a solubilidade foi calculada pela relação da massa solúvel e massa inicial de amido, expressa em percentagem, enquanto o poder de inchamento foi obtido pela relação da massa final intumescida pela massa inicial de amido. A última etapa da caracterização dos amidos foi observado no Microscópio Eletrônico de Varredura – (MEV), Jeol, JSM – 6610, os amidos e féculas, após desidratação a vácuo, foram colocados em suportes de alumínio e recobertos com uma película de ouro no aparelho Mini Sputterr Coater SC 7620, marca Polaron e (LEO 440i-Leica).

4.2.1 Gelatinização dos amidos

Visou padronizar a proporção depressor/NaOH ideal e equacionar a correta temperatura e dosagem de NaOH, evitando seu uso excessivo e permitindo maior controle do

pH na solução final usada nos testes de microflotação. Inicialmente preparou-se uma solução de NaOH a 10%. Pesou-se 20g os amidos e féculas analisados, em um béquer de 600ml, que era mantido sobre um agitador magnético equipado com uma chapa aquecedora modelo C MAG HS 4 da marca Ika. Às amostras eram adicionados 200 ml de água destilada em temperatura ambiente 25°C iniciando a partir daí uma agitação a 1200 rpm da mistura por meio de um agitador mecânico modelo 712 da marca Fisatom.

Essa agitação buscou a diluição completa do amido. Um pHmetro HI2221 pH/ORP METER da empresa HANNA INSTRUMENTS era mantido no béquer, de modo a obter a constante leitura do pH da mistura e para o monitoramento da temperatura. Após a completa diluição do amido o valor do pH foi anotado. A partir desse ponto, a bureta contendo a solução de NaOH foi então inserida sobre o béquer e iniciou-se a dosagem da solução de NaOH, 1mL por vez, condicionado à mistura durante 2 minutos após o pHmetro manter estável sua leitura que por vez foi anotada. O processo se repetiu até o ponto que a solução de amido se apresentava viscoso, como mostrado na Figura 20. Todo processo de titulação foi repetido variando a temperatura da água destilada de 25°C até 60°C, variando de 5 em 5°C para os 7 diferentes amidos e féculas.



(A)

(B)

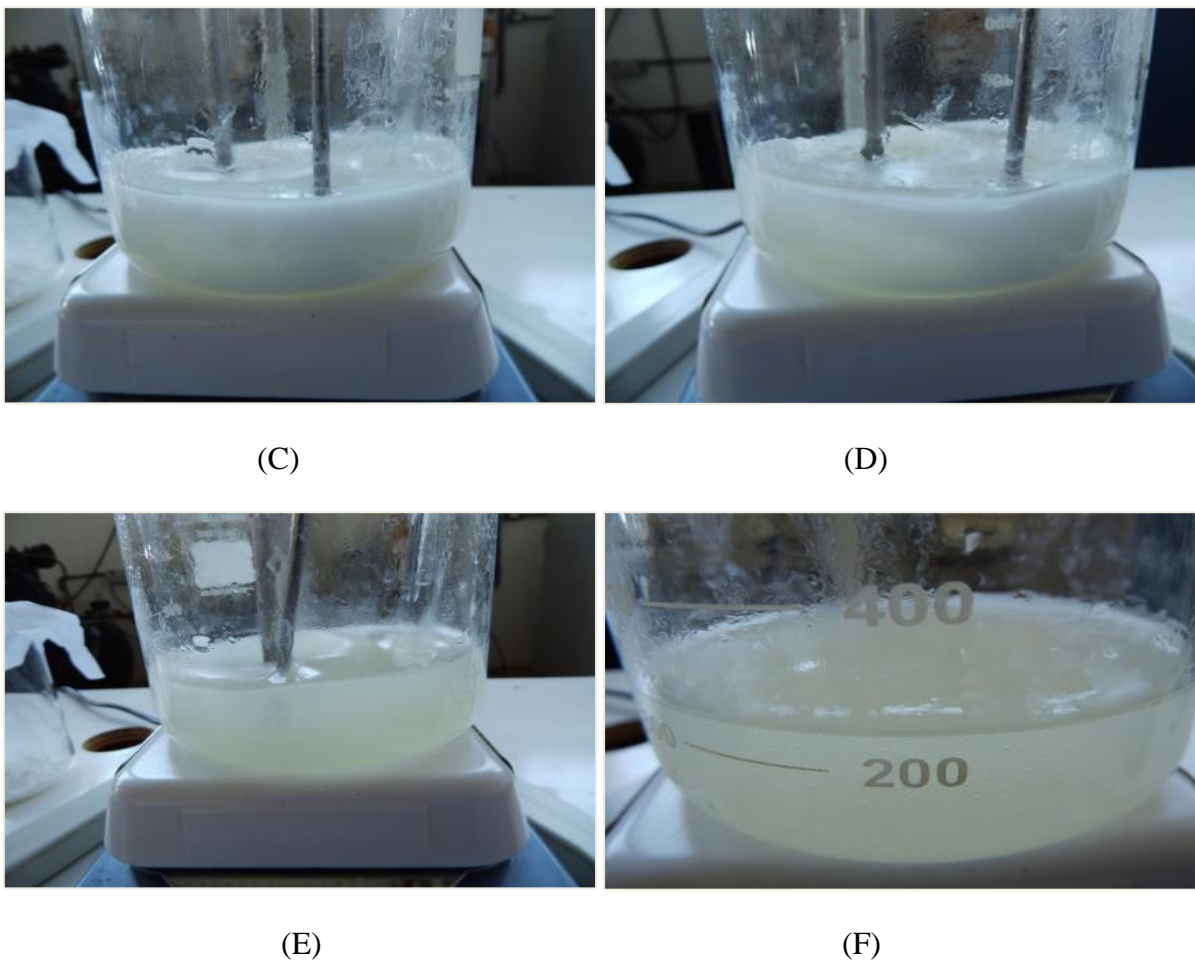


Figura 19. Progresso de gelatinização dos amidos e féculas com adição de Hidróxido de Sódio.

Depois de equacionar a correta temperatura e dosagem de NaOH, para formar um líquido viscoso e transparente, fez-se gelatinização com 5g de amido para uso imediato ao decorrer do trabalho.

4.2.2 Preparação da Amina 1% p/v

Pesou-se aproximadamente 1 g de coletor em um béquer de 150 ml previamente tarado contendo um bastão de agitação magnética. Adicionou-se aproximadamente 100 g de água destilada e dispôs o conjunto em um agitador magnético. Ligou-se a agitação atentando-se para que a velocidade não projetasse a solução para fora do béquer até sua completa homogeneização.

4.3 Ensaio em Microflotação

Os testes de microflotação foram realizados em tubo de *Hallimond* modificado de 320 mL de volume com o auxílio de um agitador magnético e extensor de altura para evitar arraste

hidrodinâmico das partículas. A Tabela 6 apresenta os principais parâmetros do ensaio de microflotação em tubo de *Hallimond* modificado.

Tabela 6. Principais parâmetros do ensaio de flotação em tubo de *Hallimond* modificado.

Condições	Valores	Unidades
Massa do mineral	1	g
Massa específica do Quartzo (picnometria)	2,57	
Massa específica do Hematita (picnometria)	5	
Teor de Fe ₂ O ₃ na alimentação (análise FRX)	96,68	%
Teor de SiO ₂ na alimentação (análise FRX)	94,68	%
Volume útil da cuba	320	mL
pH de trabalho	10 a 11	
Dosagem de coletor	70	g/t
Dosagem do depressor	0, 400, 800, 1.600, 3.200, 4.800 e 6.400	g/t
Tempo de condicionamento do depressor	5	Min
Tempo de condicionamento do coletor	1	Min
Tempo de flotação	3	min
Vazão de ar	40	cm ³ /min
Pressão	68,95	kPa (10 psi)
Faixa granulométrica	[180; 75]	µm
Coletor	Flotigan EDA	
Depressores	Relação depressor/NaOH	
HIPIX 100;	19,3	
HIPIX 101;	20,7	
HIPIX 101;	21,4	
Fécula de mandioca;	14,6	
Fecula de batata;	35,7	
Amido de milho;	13,3	
Amido de mandioca;	15	

Na Figura 20 encontra-se o tubo de *Hallimond* modificado utilizado no presente trabalho, composto de uma célula de vidro constituída de duas partes encaixáveis por meio de uma junta esmerilhada. A parte inferior tem um fundo poroso de vidro sinterizado, que permite aeração uniforme do ar injetado no sistema e movimentação suave da barra magnética colocada no interior do tubo. A parte superior tem a função de coletar o material flotado. Foi inserido um terceiro segmento entre as porções inferior e superior do tubo, aumentando a distância a ser percorrida pelas partículas hidrofóbicas, dificultando assim o arraste pelo fluxo de ar.

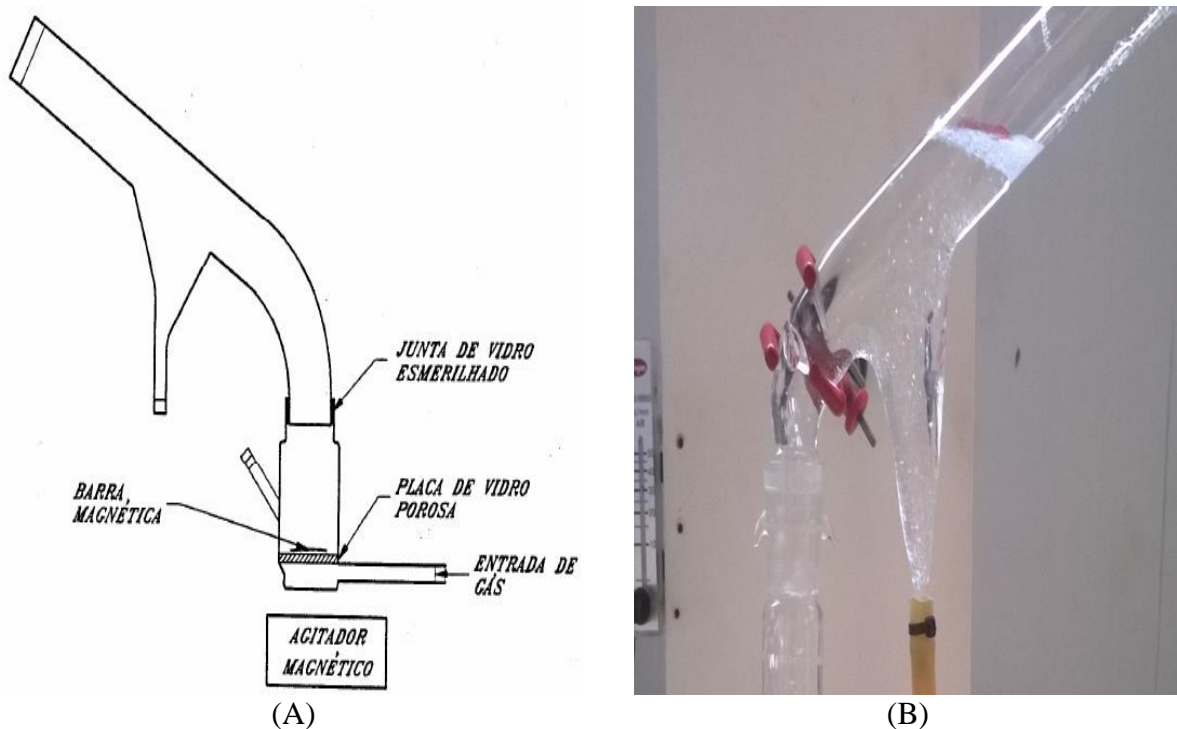


Figura 20. (A) Tubo de *Hallimond* modificado (GUIMARÃES *apud* OLIVEIRA, 2007) e (B) Tubo utilizado na pesquisa.

Os ensaios de microflotação foram conduzidos objetivando-se estudar a seletividade dos depressores na flotação catiônica reversa de minérios de ferro. Para isso, realizou-se o estudo das principais variáveis do processo, concentração de reagentes e pH de flotação. O conceito de potencial zeta e o PIE são extremamente importantes, uma vez que permitem prever o estado de agregação em suspensões e a eficácia de reagentes no processo de flotação, as concentrações do coletor e depressor também foram baseadas nas pesquisas.

Os testes de microflotação foram realizados em triplicata e os resultados são representados a partir de sua média. As condições dos testes foram definidas conforme pesquisas bibliográficas supracitadas. A vazão de ar foi definida em $40 \text{ cm}^3/\text{min}$, valor este que proporciona menor arraste hidráulico da hematita e do quartzo no tubo de *Hallimond* de acordo com os testes iniciais variando a vazão. O tempo de condicionamento foi de 5 min para condicionamento do depressor e depois mais 1 minuto para condicionamento do coletor conforme sugerido pela metodologia Clariant que forneceu o reagente coletor. O tempo de flotação e a massa do mineral são, respectivamente 1 minuto e 1g. As concentrações do coletor também foi baseada em pesquisas realizadas pela empresa Clariant, onde no presente trabalho optou-se por fixar o valor do coletor em 70g/t (dosagem máxima recomendada pela Clariant), assim variando somente os depressores. O pH de flotação, variável entre 10 e 11, considerou o potencial zeta da hematita e do Quartzo, observado na literatura, e a faixa de pH sugerida pela Clariant para aplicação do Flotigam EDA.

O procedimento detalhado de microflotação é descrito a seguir:

1. Pesou-se 1 g (0,005g) de mineral puro com tamanho entre 180 μm (80 #) e retido em 75 μm (200 #) tomando-se o cuidado de separar um recipiente para cada mineral, evitando-se ao máximo contaminações;
2. Pesou-se os papéis filtro e identificou-se os mesmos com o número de cada amostra, seguido de F para flotado e A para afundado. Tomou-se nota da massa de cada filtro;
3. Preparou-se solução de coletor, depressor e água deionizada, ajustando-se o pH no valor desejado.
4. Introduziu-se 1g do mineral e a barra magnética na parte inferior do tubo;
5. Limpou-se o béquer que continha a amostra com água deionizada, para evitar qualquer perda de massa;
6. Condicionou-se a solução de depressor por 5 minutos, mantendo-se agitação constante;
7. Condicionou-se a solução de coletor por 1 minuto, mantendo-se agitação constante;
8. As partes superiores do tubo foram montadas e assim que completou-se 1 minuto de condicionamento foi adicionado água destilada já no pH desejado para o teste até completar os 320ml;
9. Abriu-se o ar, onde se inicia a flotação que durou 1 minuto, com o auxílio de um cronômetro. Após este tempo cessou-se a vazão de ar;
10. Retirou-se o material flotado através de decantação, aliviando-se o grampo preso à mangueira ligada à parte de vidro superior;

11. Coletou-se o material afundado através de decantação, aliviando-se o grampo preso à mangueira ligada à parte de vidro inferior;
12. Coletou-se o restante do material flotado através da lavagem da haste superior;
13. Coletou-se o restante do material afundado através da lavagem da parte inferior de vidro, lavando também a barra magnética com pescador, removendo-se alguma partícula que tenha ficado presa a ela;
14. Filtrou-se o flotado e o afundado através do filtro a vácuo Primatec, modelo 132;
15. Secou-se os papéis de filtro em estufa a 70° C (aproximadamente) por 12 horas;
16. Retirou-se os papéis e após atingir a umidade ambiente (3 horas após sua retirada), pesou-se os papéis filtro;
17. Calculou-se a porcentagem de material flotado, considerando a massa total obtida da soma dos dois produtos, flotado e afundado, através da equação (1).

$$\text{Flotabilidade (\%)} = \left[\frac{\text{massa do flotado}}{\text{massa do flotado} + \text{massa do afundado}} \right] \times 100 \quad (1)$$

4.4 Ensaios de flotação em bancada

Após testes de microflotação com amostras de hematita e quartzo, foram realizados testes de flotação em escala de bancada. Para iniciar o ensaio do presente trabalho, foi feito um levantamento sobre as variáveis da flotação em célula com os minerais de hematita e quartzo. Após o entendimento das principais variáveis do processo de flotação em célula de bancada, preparou-se para os testes exploratórios. A proporção do minério foi feita no laboratório, com intuito de facilitar a análise da real eficiência dos depressores testados, assim tendo a composição de hematita e quartzo, amostras de alto grau de pureza verificadas em análise química (FRX), a amostra utilizada nos ensaios de flotação em bancada foram às mesmas utilizadas nos ensaios de microflotação, preparadas da mesma forma descrita no item 4.1.1, as massas utilizadas nos testes foram na proporção de 40 % de quartzo e 60 % de hematita, preparadas em saquinhos com massa de 480 gramas, sendo 192 gramas de quartzo e 288 gramas de hematita, como na Figura 21.

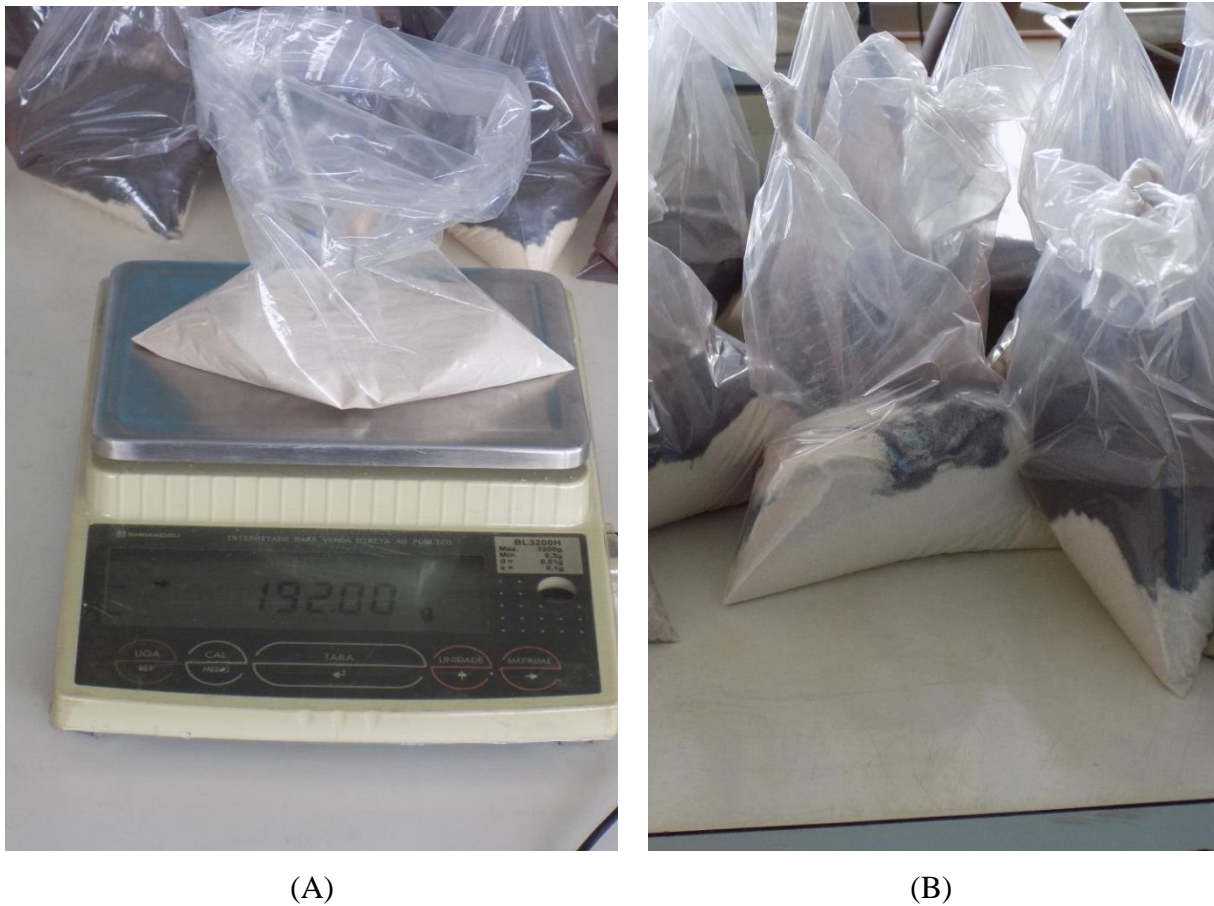


Figura 21. Pesagem das amostras na proporção de: (A) 40% quartzo e (B) 60% hematita para os testes de flotação em bancada.

Logo foi calculado a densidade do sólido de hematita e do sólido de quartzo através da picnometria, depois de conhecer a densidade dos minerais, calculou-se a densidade do sólido (D_s) através da equação (2).

$$D_s = [(\% \text{ do SiO}_2 \times \text{densidade SiO}_2) + (\% \text{ da Fe}_2\text{O}_3 \times \text{densidade Fe}_2\text{O}_3)] \quad (2)$$

Depois de calculado a densidade dos sólidos na proporção desejada para os testes na célula de bancada, calculou-se a densidade da polpa através da equação (3).

$$D. \text{ polpa} = \frac{100}{\frac{(\% \text{ sólidos})}{D. \text{ sólidos}} + \frac{100 - (\% \text{ sólidos})}{D. \text{ água}}} \quad (3)$$

Na célula em bancada foram feitos 45 testes com os amidos que apresentaram os melhores resultados no tubo de *Hallimond*, HIPIX®100, HIPIX®101 e fécula de mandioca, foi feito também com amido de milho, pois é o amido mais utilizado nas indústrias, devido

sua disponibilidade, contudo usado no presente trabalho como comparação, aos amidos propostos como alternativos para a indústria e por ultimo foi feito o teste com amido de mandioca que não apresentou um bom resultado no tubo de *Hallimond*, então fez-se a contra prova para analisar a eficiência na célula, ao todo foram 5 diferentes depressores utilizados variando apenas as dosagens em 400, 800 e 1600 g/t, dosagens estas que apresentaram os melhores resultados no tubo de *Hallimond*. A Tabela 7 apresenta os principais parâmetros do ensaio de flotação catiônica reversa de minério de ferro na célula.

Tabela 7. Principais parâmetros do ensaio de flotação catiônica reversa de minério de ferro na célula

Condições	Valores	Unidades
Massa do mineral	480	G
Densidade do sólido (calculada)	4	g/cm ³
Teor de Fe ₂ O ₃ na alimentação (análise FRX)	96,68	%
Teor de SiO ₂ na alimentação (análise FRX)	94,68	%
Porcentagem de sólidos	40	%
Densidade da polpa	1,35	g/cm ³
Volume útil da cuba	1.000	mL
Concentração de NaOH	5	%
pH de trabalho	10,5	
Dosagem de coletor	70	g/t
Dosagem do depressor	400, 800, 1600	g/t
Volume de H ₂ O adicionado	850	mL
Tempo de condicionamento do depressor	5	Min
Tempo de condicionamento do coletor	1	Min
Tempo de flotação	3	Min
Vazão de ar	40	cm ³ /min
Velocidade do rotor	1400	RPM
Faixa granulométrica	[180; 75]	µm
Coletor	Flotigan EDA	
Depressores	Relação depressor/NaOH	
HIPIX 100;	19,3	
HIPIX 101;	20,7	
Fécula de mandioca;	14,6	
Amido de milho;	13,3	
Amido de mandioca.	15	

O equipamento utilizado que foi a célula de flotação de bancada, Modelo CFB 1000N, marca Engendrar. A Figura 22 apresenta a imagem da célula de flotação usada no presente trabalho.

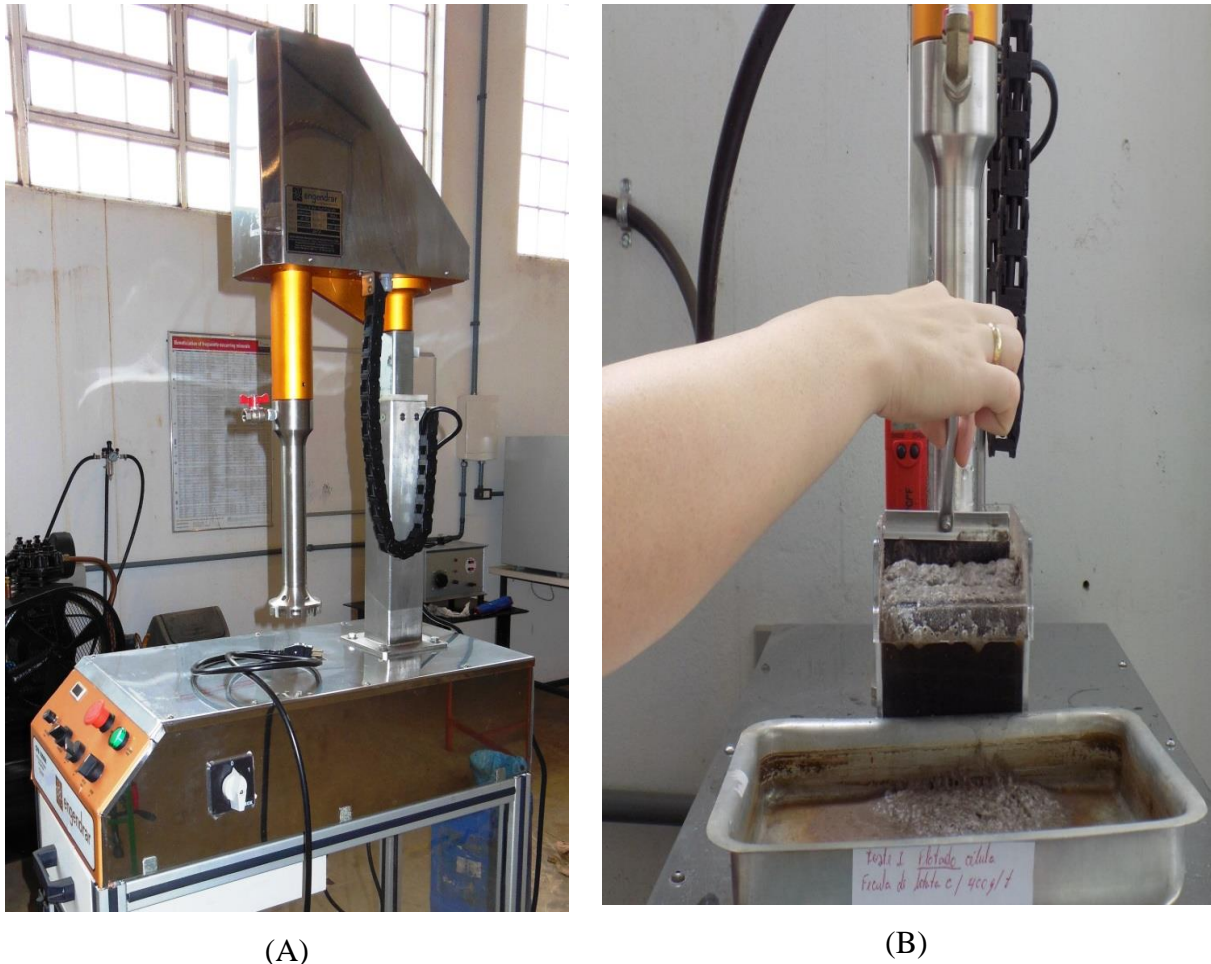


Figura 22. Célula de flotação em bancada: (A) equipamento e (B) equipamento em uso.

O procedimento detalhado da flotação em bancada é descrito a seguir:

- 1 - Adicionou-se 850ml de água na cuba de flotação de 1 L;
- 2 - Posicionou-se o eletrodo do pHmetro, na altura correta de medição da massa de água;
- 3 - Ligou-se o rotor da célula de flotação a uma velocidade de 1400 rpm;
- 4 - Adicionou-se 480 gramas de amostra de minério de ferro, previamente seca, na cuba de flotação. Para um teor de sólidos de 40% no ensaio;
- 5 - Condicionou-se a polpa durante 1 minuto e mede-se o pH inicial da polpa, anotando o valor em formulário apropriado;

- 6 - Condiçionou-se o amido ou fécula já gelatinizado com NaOH, como explicado no item 4.2.2.
- 7 - Condiçionou-se a polpa durante 5 minutos;
- 8 - Ajustou-se o pH para 10,5 com NaOH;
- 9 - Adicionou-se o coletor Clariant na dosagem de 70g/t;
- 10 - Com rotor ainda ligado aguarde 1 minuto para condiçionamento da polpa;
- 11 - Verificou-se o valor de pH e caso mantenha-se em 10,5 retira lavando-o. Caso contrário ajusta-se o pH para o valor desejado a 10,5;
- 12 - Abriu-se a entrada de ar para que se forme a camada de espuma;
- 13 - Realizou-se a flotação imediatamente após o início da formação de espuma, recolhendo-a de maneira sempre constante, de forma criteriosa por aproximadamente 3 minutos;
- 14 - Após o termino da camada de espuma passível de ser retirada, adiciona-se água para elevar o nível de polpa. Neste instante recolher o remanescente do flotado;
- 15 - Transferiu-se as frações do afundado e flotado para bandejas previamente identificadas;
- 16 - Secou-se as frações em estufa a aproximadamente 105°C durante 12 horas;
- 17 - Após a completa secagem, pesa-se a massa do flotado e do afundado (em formulário apropriado) para a determinaçaõ da recuperaçaõ em massa.

Depois de pesar o material completamente seco, com rigor para não haver contaminação, o material foi quarteado e homogeneizado, retirou-se uma alíquota de 25g para fazer a análise química e guardou-se o restante do material. Isto repetiu-se para todo o material flotado e afundado.

CÁLCULOS PARA RECUPERAÇÃO MÁSSICA

$$\text{Rec. Massa conc. (\%)} = \frac{\text{massa concentrado(g)}}{\text{massa alimentação(g)}} \times 100 \quad (4)$$

CÁLCULOS PARA RECUPERAÇÃO METALÚRGICA

$$\text{Rec. Met conc. (\%)} = \frac{\% \text{ Fe}_2\text{O}_3 \text{ concentrado}}{\% \text{ Fe}_2\text{O}_3 \text{ alimentação}} \times \text{Rec. massa concentrado} \quad (5)$$

4.5 Análise estatística dos resultados - ANOVA

Com intuito de analisar a influência das dosagens de depressores na flotação em tubo de *Hallimond* e na flotação por bancada dos minerais de hematita e quartzo, considerou-se as interações entre os fatores: dosagem do depressor, fonte do amido usado como depressor e recuperação. Os resultados foram submetidos a testes estatísticos, por meio da análise de variância – ANOVA (Analysis of Variance). A aplicação deste método teve como objetivo avaliar os resultados de variação de dosagens de depressor, com 6 fontes alternativas de amidos comparado ao amido de milho convencional.

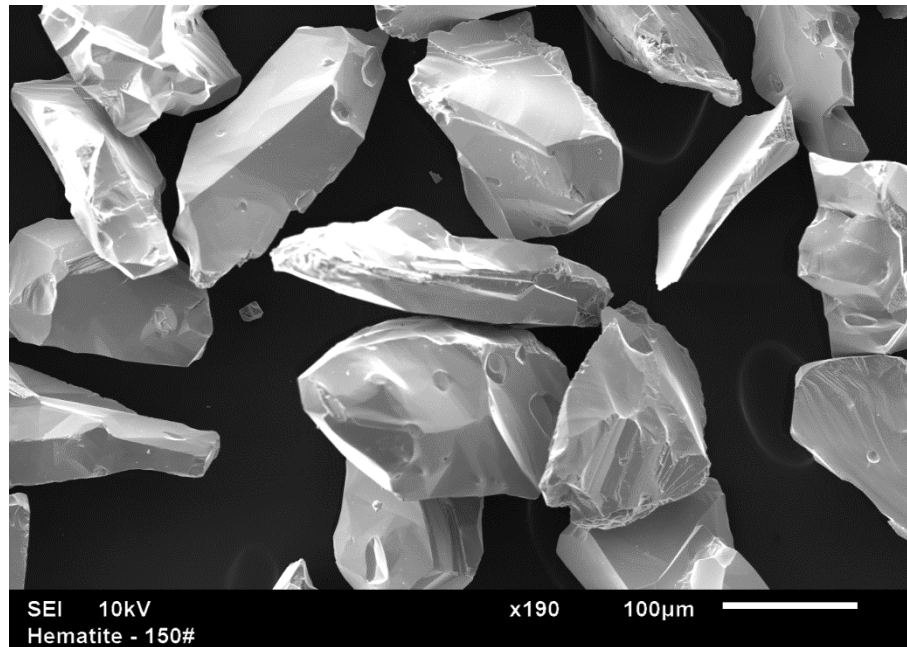
Os testes estatísticos foram realizados no software Statistica, versão 8.0 e no Microsoft Office Excel, versão 2013. Os testes foram realizados considerando um nível de 95% de confiança. Utilizou-se teste ANOVA para analisar a real influência de dosagens na flotabilidade dos minerais, em tubo de *Hallimond*, nas dosagens 0, 400, 800, 1.600, 3.200, 4.800 e 6.400 g/t, para os amido de milho convencional, amidos de mandioca, féculas de batata, fécula de mandioca, HIPIX®100, HIPIX®101 e HIPIX®102, analisou-se através da ANOVA a real influência de diferentes dosagens na flotabilidade dos minerais, em uma célula de bancada nas dosagens de 400, 800 e 1.600 g/t, para os amidos HIPIX®100, HIPIX®101, féculas de batata, amidos de mandioca e amido de milho convencional.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

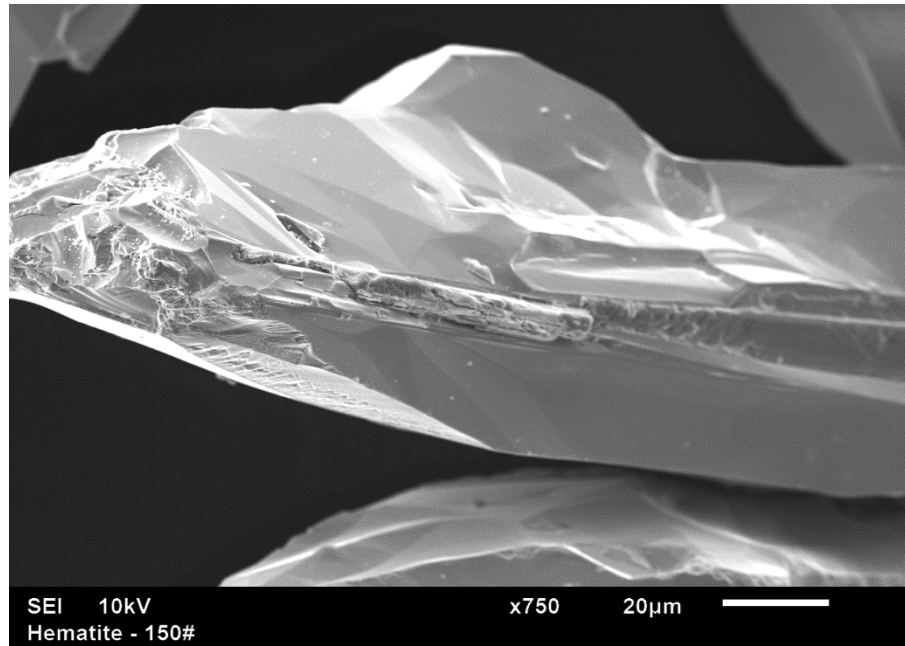
5.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

5.1.1 Hematita

As amostras utilizadas no presente trabalho possuem elevada pureza. Pode-se observar na Figura 23 que a amostra de hematita utilizada no presente trabalho tem alta pureza e uma forma lamelar, a imagem indica uma boa liberação nesta faixa granulométrica, pois está praticamente livre de partículas mistas que podem destacar em outra cor, como cinza mais escuro ou mais claro.



(A)

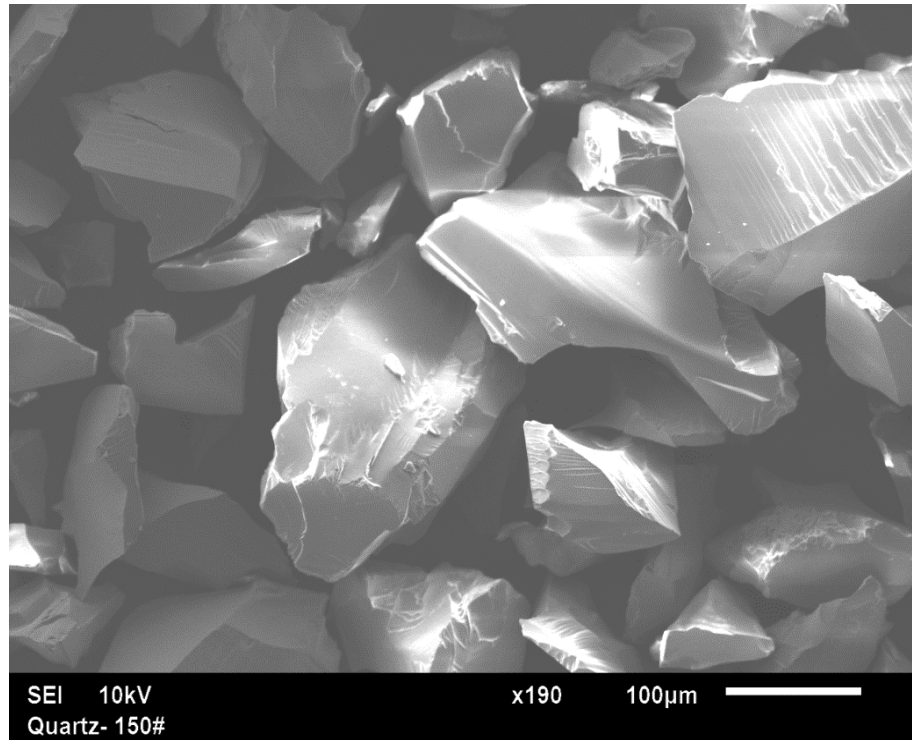


(B)

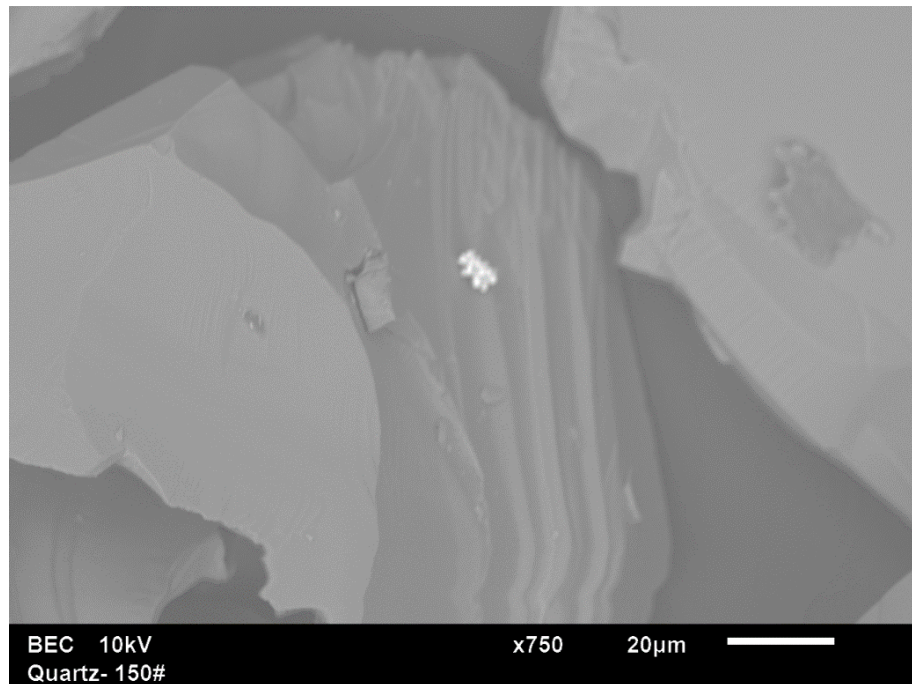
Figura 23. Análise por microscopia eletrônica de varredura de amostras de hematita: (A) x 190 e (B) x 750. Fonte: Labmic/UFG

5.1.2 Quartzo

Pode-se observar na Figura 24, a amostra de quartzo utilizada no presente trabalho é maciço com fraturas conchoidais e assim como a hematita a imagem indica uma boa liberação nesta faixa granulométrica, pois está praticamente livre de partículas mistas que podem destacar em outra cor, como cinza mais escuro ou mais claro.



(A)



(B)

Figura 24. Análise por microscopia eletrônica de varredura da amostra de quartzo (A) x 190 e (B) x 750. Fonte Labmic/UFG.

5.2 Energia Dispersiva de Raios-x (EDS)

5.2.1. Hematita

A análise por energia dispersiva de raios-X (EDS), comprova-se este aparente grau de pureza das imagens das amostras apresentadas. A Figura 25 apresenta os principais elementos detectados pelas análises por energia dispersiva de raios-X (EDS) da amostra de hematita, os quais foram Fe, C, O no primeiro ponto e nos demais pontos Fe, C, O, Ca, P, F, Al e U, portanto, para ambos os pontos, comprovou-se que as amostras de hematita são, predominantemente, compostas por Ferro.

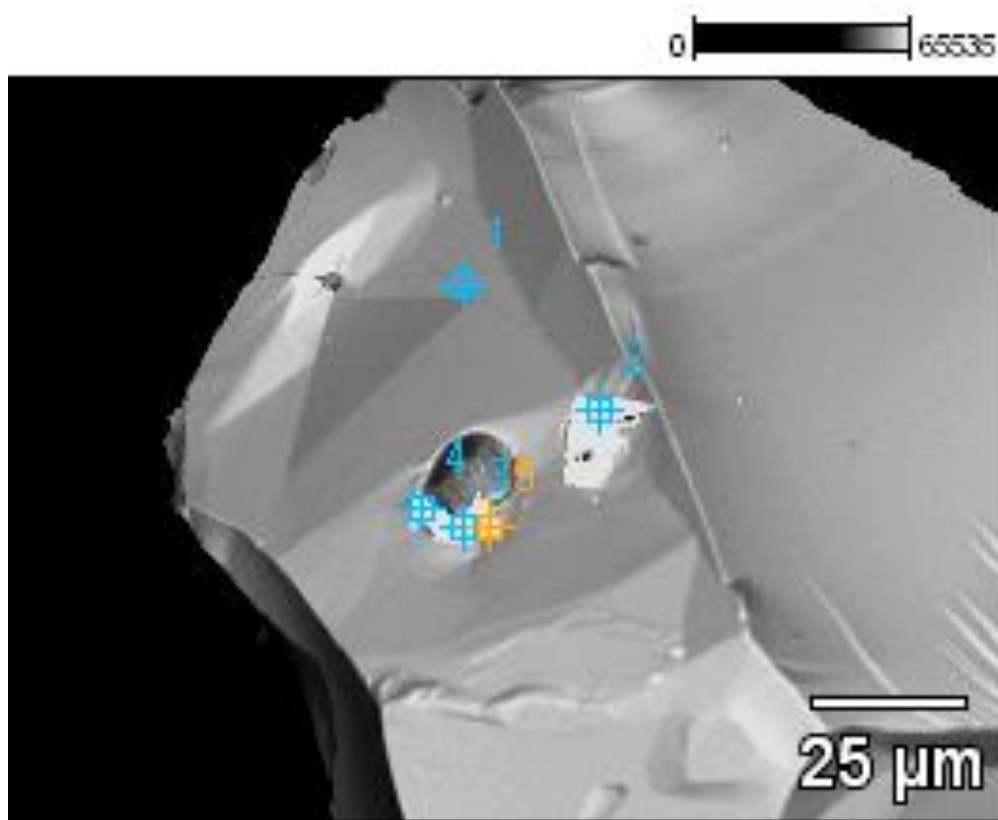
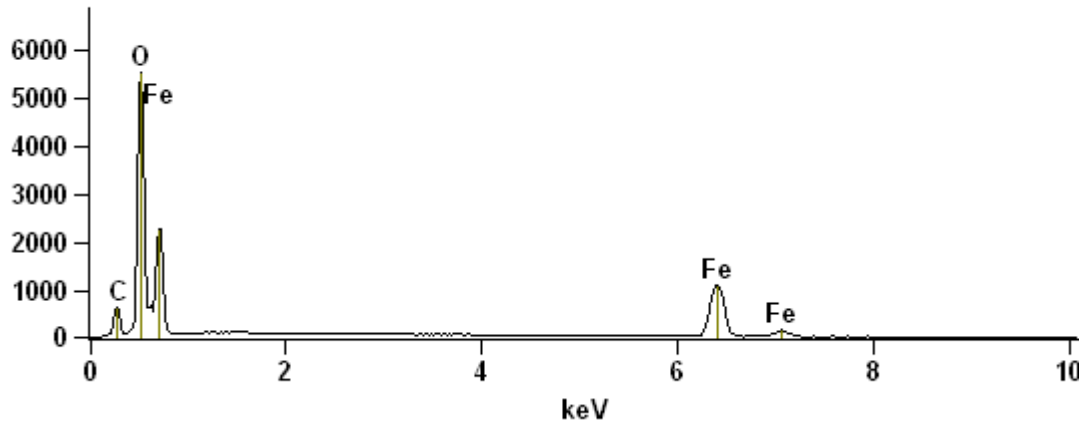


Image Name: Hematite - 150#(3)
Accelerating Voltage: 15.0 kV
Magnification: 750

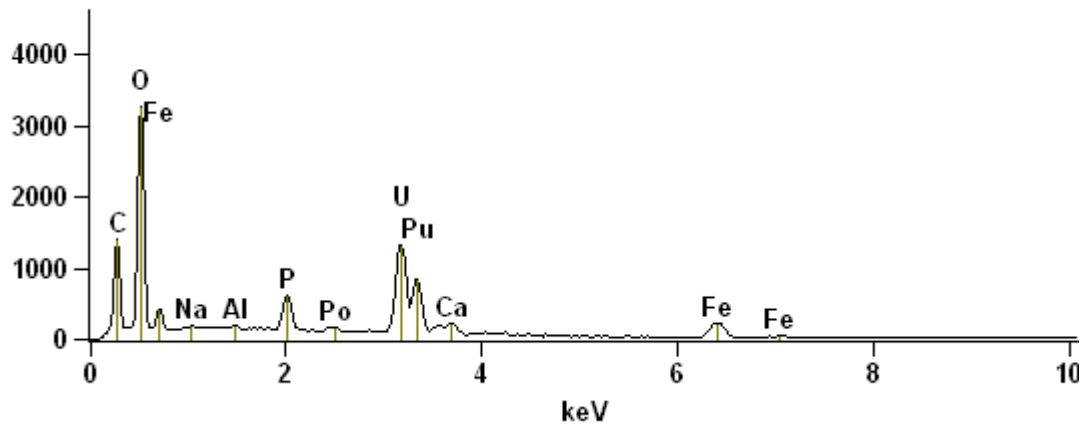
Full scale counts: 5509

Hematite - 150#(3)_pt1



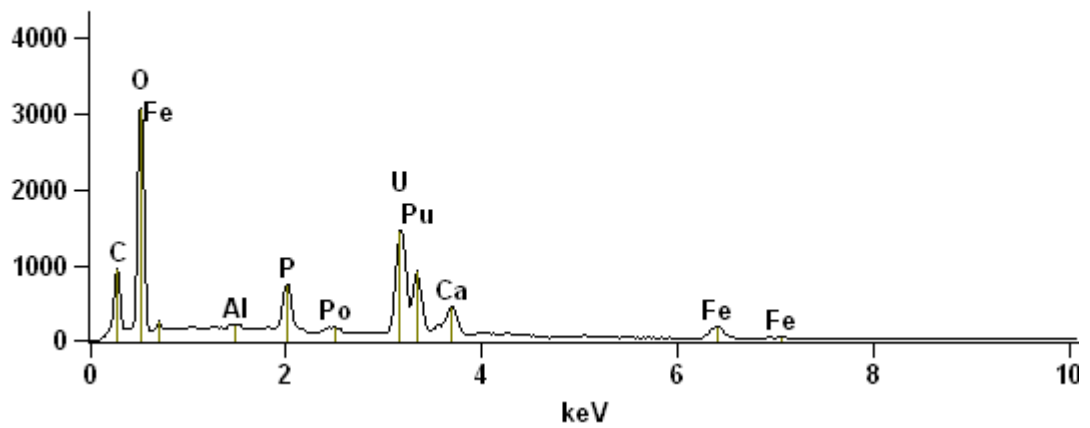
Full scale counts: 3266

Hematite - 150#(3)_pt2



Full scale counts: 3072

Hematite - 150#(3)_pt3



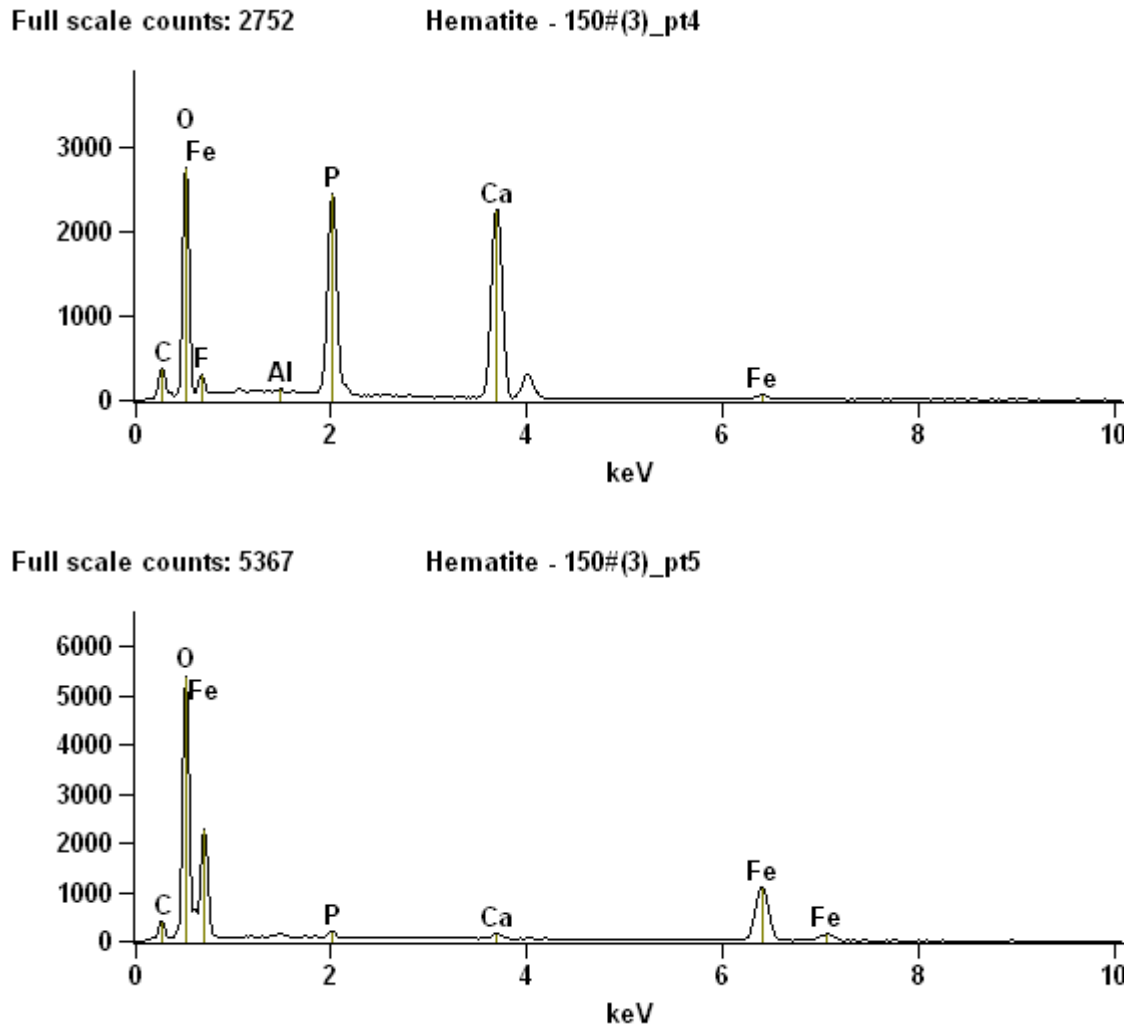


Figura 25. Principais elementos detectados pelas análises por energia dispersiva de raios-X (EDS) da amostra de hematita.

5.2.2. Quartzo

A Figura 26 apresenta os principais elementos detectados pelas análises por energia dispersiva de raios-X (EDS) da amostra de quartzo, os quais foram C, O e Si, portanto, para ambos os pontos, comprovou-se que as amostras de hematita são, predominantemente, compostas por Silício.

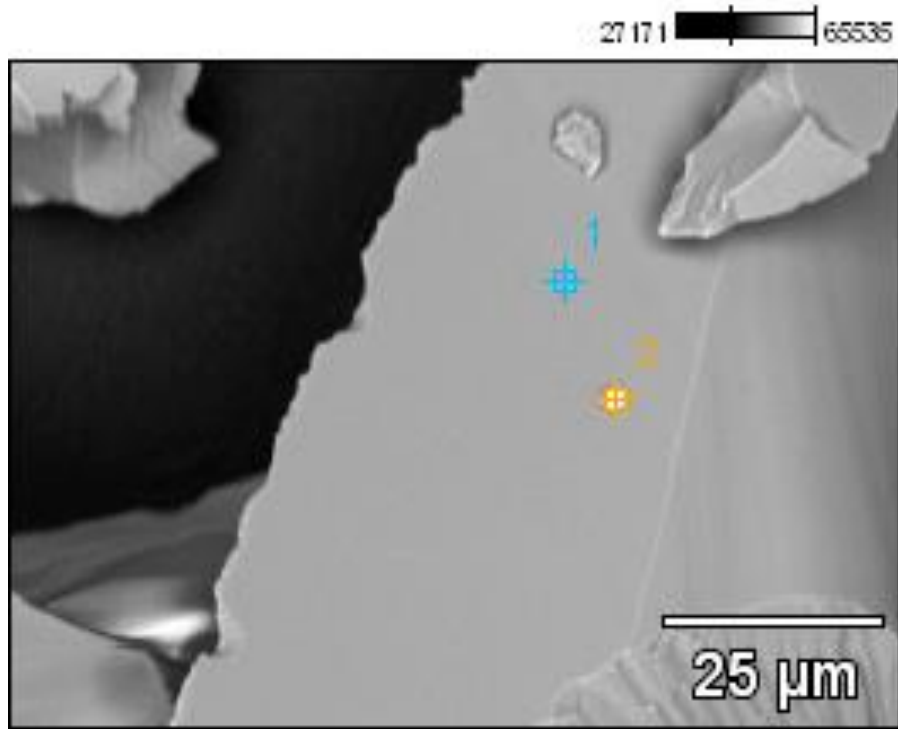
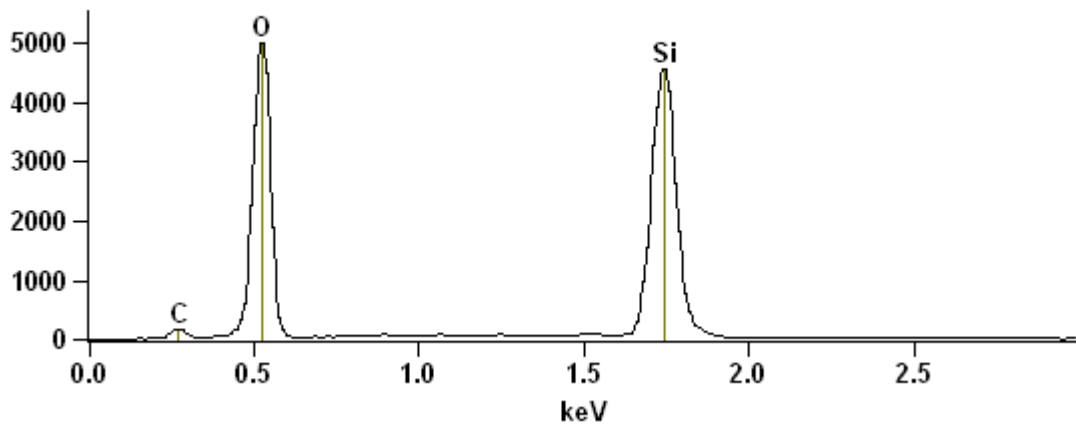


Image Name: Quartz - 150#(2)
Accelerating Voltage: 10.0 kV
Magnification: 1200

Full scale counts: 4976

Quartz - 150#(2)_pt1



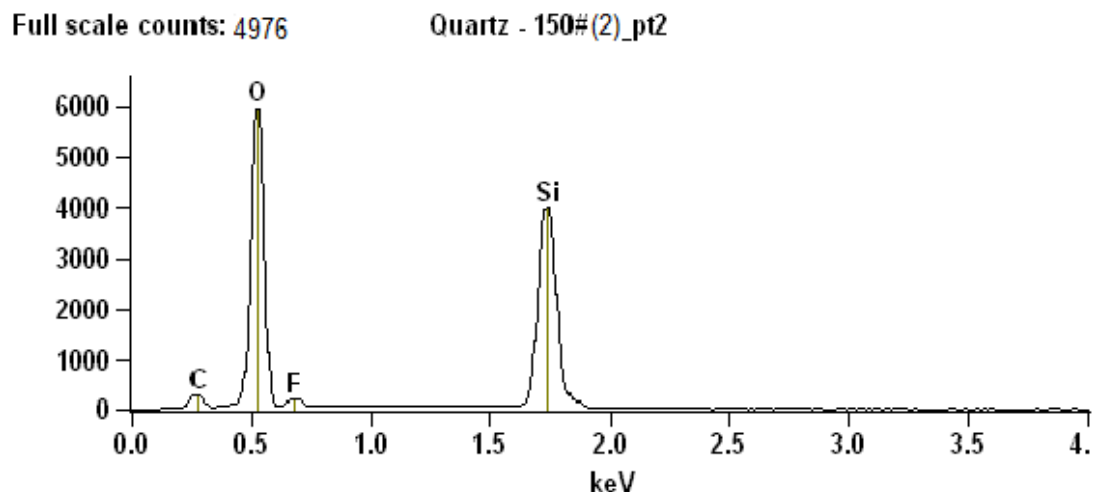


Figura 26. Principais elementos detectados pelas análises por energia dispersiva de raios-X (EDS) da amostra de quartzo.

5.3 Caracterização Análise química via FRX

As amostras foram analisadas em relação aos teores químicos dos seus elementos na faixa granulométrica de 111 μm (150 #), pode-se observar o elevado grau de pureza das amostras usadas para o presente trabalho. Os resultados da análise química por faixa são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados dos elementos químicos na faixa granuloquímica de 111 μm (150 #).

Semiquantitativa	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Co ₃ O ₄	Ta ₂ O ₅	BaO	I	SiO ₂	TiO ₂
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
562549-HEMATITA	0.15	2.59	0.16	96.68	0.19	0.23				
562548-QUARTZO	0.04	4.31	0.12	0.16			0.05	0.58	94.68	0.05

5.4 Caracterização dos amidos e féculas

Teste de determinação da amilose

Através do método de AACC - American Association Cereal Chemists 1995, como mostra na Figura 27, foi determinada a concentração de amilose e por exclusão foi

determinada a amilopectina. Pode-se observar em ordem crescente a quantidade de amilopectina expresso em percentagem presente nos amidos e féculas testados, começando pela a fécula de batata, HIPIX®101, HIPIX®100 e HIPIX®102, amido de mandioca, fécula de mandioca e amido de milho, que em comparação com a trabalhos já publicados pode confirmar a proximidade da proporção amilose: amilopectina das féculas de mandioca e batata e dos amidos de milho e mandioca. O amido de milho modificado que tem o nome comercial HIPIX®101 e HIPIX®100 como esperado tem 81,9% e 78,1 respectivamente de amilopectina, valor bem mais expressivo do que amido de milho natural que conta com 28,4 % de amilopectina, já os amidos de milho de nome comercial e HIPIX®102, pode apresentar-se em diferentes espécies botânicas.

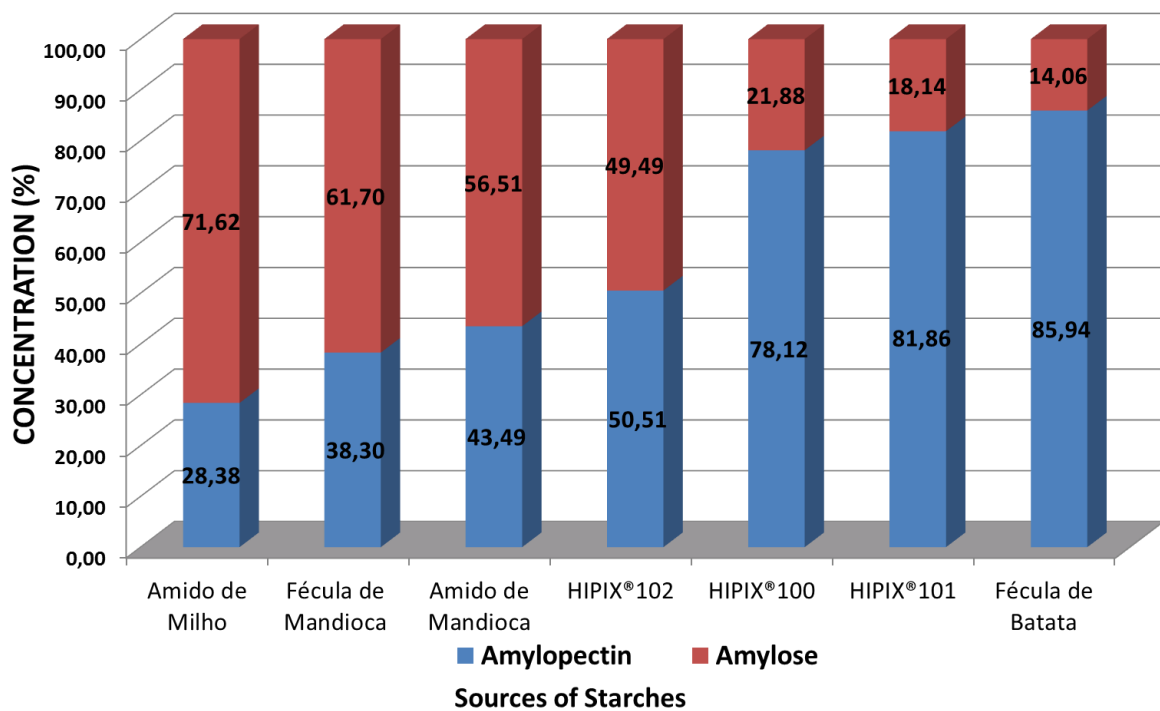


Figura 27. Relação amilopectina/amilose dos amidos e féculas testados na gelatinização.

Teste de determinação solubilidade e inchamento

Segundo SINGH *et al.* (2003), quando as moléculas de amido são aquecidas em água, a estrutura cristalina é rompida, e as moléculas de água formam pontes de hidrogênio entre a amilose e amilopectina, expondo seus grupos hidroxil, o que causa um aumento no inchamento e na solubilidade do grânulo. Esse poder de inchamento e solubilidade varia de acordo com a fonte do amido, fornecendo evidências da interação entre as cadeias de amido

dentro dos domínios amorfos e cristalinos. A extensão destas interações é influenciada pela proporção amilose:amilopectina devido as características moleculares distribuídas, peso molecular, grau, comprimento de ramificações segundo (DENARDIN e SILVA, 2009).

Na Figura 28, podemos observar que o poder de inchamento dos amidos e féculas testados não segue uma tendência de acordo com a porção de amilopectina. Podendo assim levar em conta mais variáveis em relação ao inchamento dos amidos, visto que a amilose e a amilopectina não são únicos componentes dos amidos e féculas, pois contêm impurezas como fibras, minerais, óleo e proteínas, além do que temperatura de gelatinização do amido varia em função da fonte e do tipo de modificação a que ele é submetido. Diferentes tipos de amidos exibem diferentes densidades granulares que afetam a facilidade com que estes grânulos absorvem água.

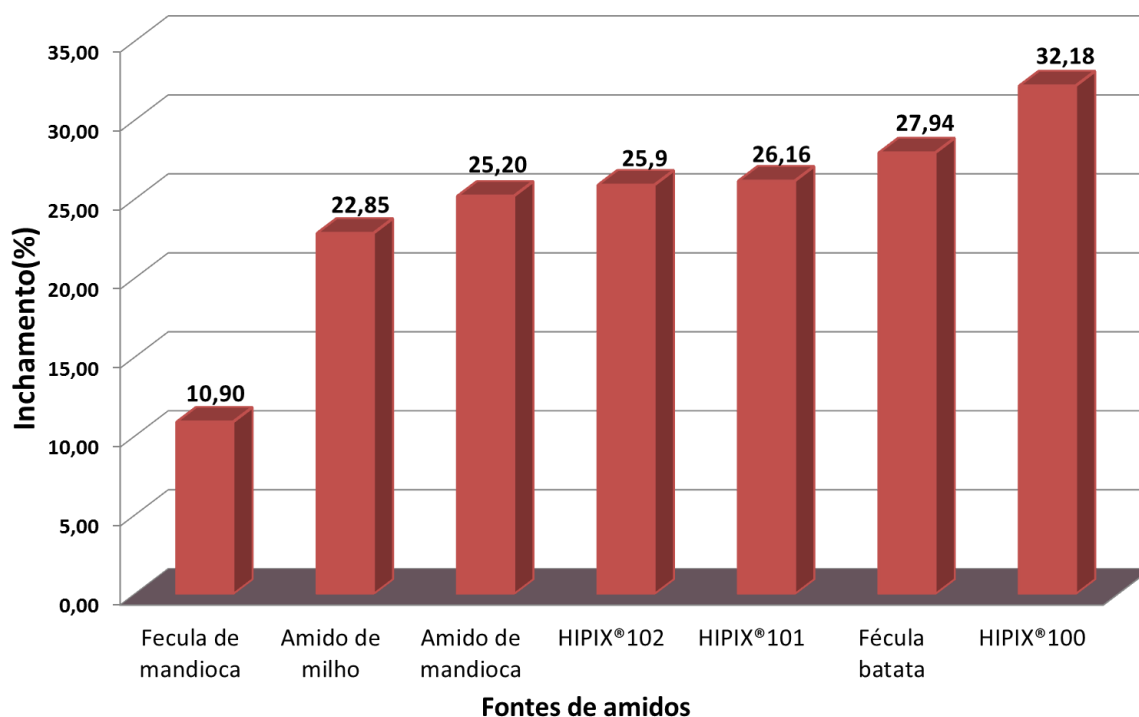


Figura 28. Teste de inchamento dos amidos e féculas testados na gelatinização.

A solubilidade é consequência do lixiviamento da amilose. A redução na solubilidade dos amidos tratados com calor e baixa umidade indica que houve um fortalecimento das ligações, com o aumento nas interações entre as moléculas de amilose e amilopectina e entre as moléculas de amilopectina formando uma estrutura mais estável e reduzindo o lixiviamento das moléculas de amilose dos grânulos (GOMES *et al.*, 2005), como apresentado pela Figura 29.

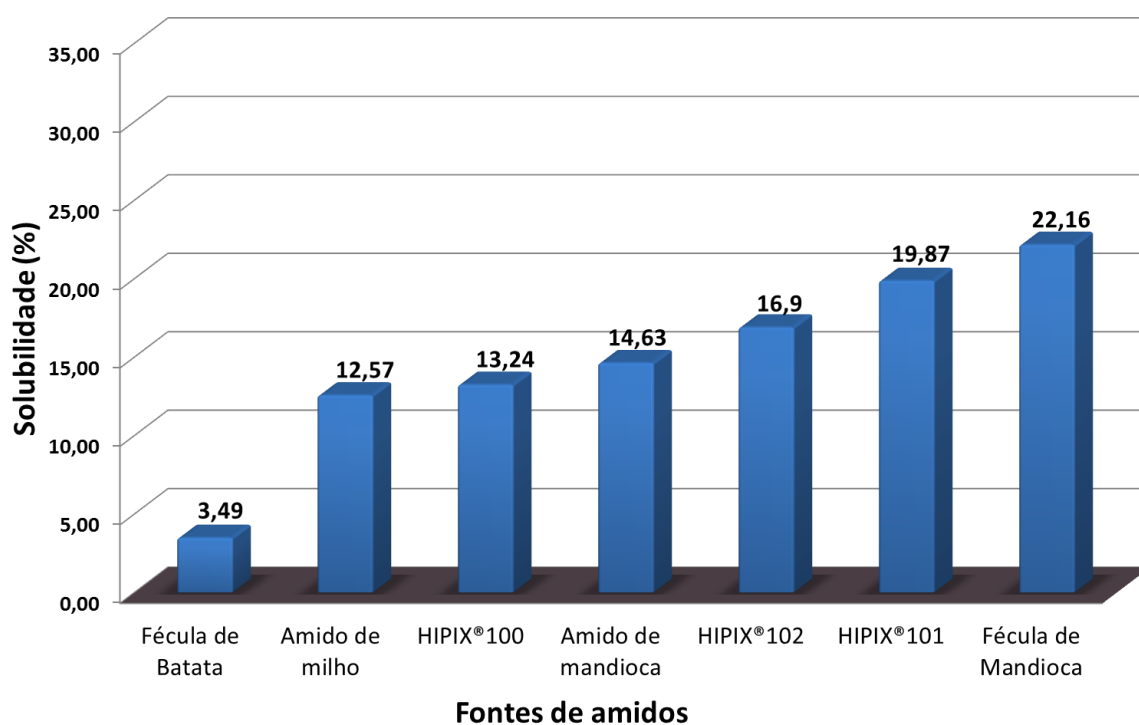


Figura 29. Teste de solubilidade dos amidos e féculas testados na gelatinização.

5.5 Gelatinização dos amidos

Segundo Pinto *et al.*, (1992) quanto maior a porcentagem de amilopectina, menor a temperatura de gelatinização. Para os testes de gelatinização, foram usados dois métodos simultâneos, que consiste na gelatinização térmica e gelatinização química, com intuito de entender melhor o processo para diferentes amidos e féculas. O uso inadequado da quantidade de NaOH dificulta a etapa da flotação, devido o aumento do pH e posterior necessidade de controle do mesmo, gerando uma gama de eletrólitos livres.

Na tentativa de diminuir a proporção amido/NaOH, foi variado a temperatura e também a dosagem de NaOH, depois de realizado 162 testes constata-se que necessita aquecer a água até a 40°C para depois conseguir usar uma menor dosagem de NaOH. Na Figura 30 percebe-se a influência da proporção de amilopectina no ponto de gelatinização, analisando em ordem decrescente da proporção de amilopectina têm-se fécula de batata, HIPIX®101, HIPIX®100 e HIPIX®102, amido de mandioca, fécula de mandioca e amido de milho. Nesta mesma ordem pode-se observar o ponto de gelatinização das féculas e amidos testados.

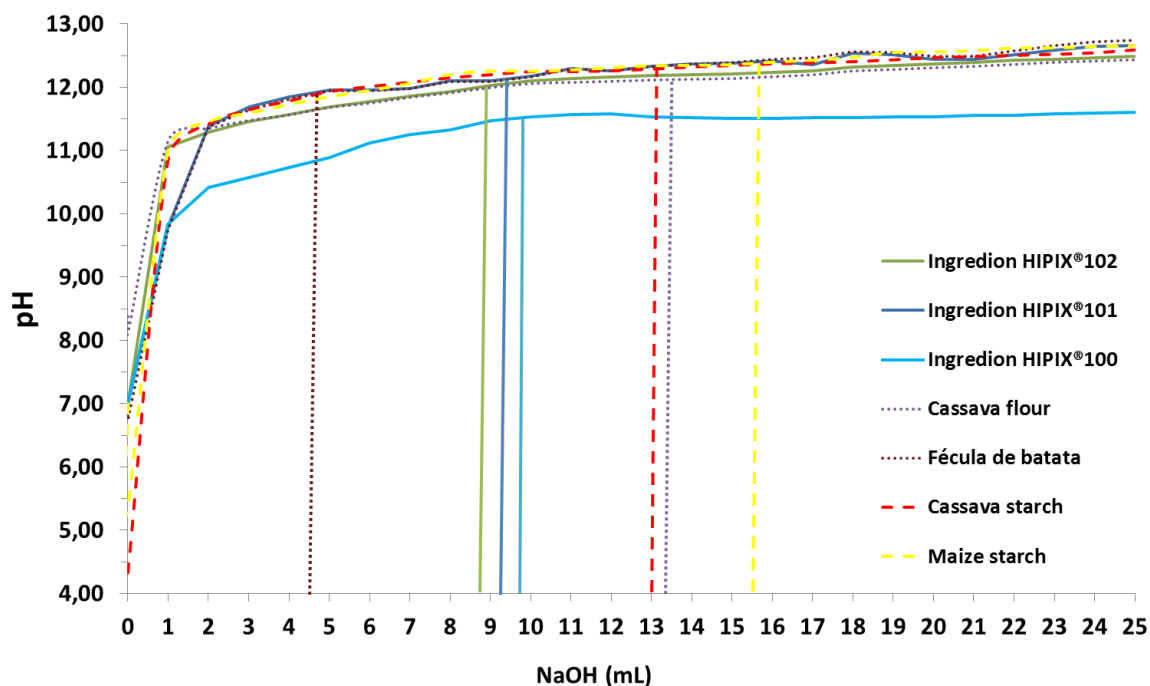


Figura 30. Variação do pH com adição de NaOH (10%) até o ponto de gelatinização.

A titulação com NaOH na complexa solução amido/NaOH mostrou-se uma ferramenta interessante para análise do ponto de gelatinização. A presença de grânulos não rompidos ou inchados varia de acordo com a relação entre amido/NaOH e tempo de reação.

No entanto o entendimento do consumo do Hidróxido de sódio na solução de amido e água é fundamental, pois pode ter uma gelatinização bem sucedida com menores participações de NaOH, como mostrado nos testes realizados. Podemos observar a tabela V.2, a proporção Amido/NaOH (Hidróxido de Sódio) comercialmente chamando de Soda Caustica encontrada para cada amido e fécula testado.

Tabela 9. Proporções de Amido/NaOH encontrados na gelatinização dos amidos e féculas testados.

Proporção Amido/NaOH (Hidróxido de Sódio) encontrado nos testes de gelatinização						
Fécula de batata	HIPIX®102	HIPIX®101	HIPIX®100	Amido de Mandioca	Fécula de Mandioca	Amido de Milho
35.7/1	21.4/1	20.7/1	19.3/1	15.0/1	14.6/1	13.3/1

O amido atua na seletividade do processo de flotação que é influenciado pelo estado de liberação das cadeias de amilose e amilopectina. Os resultados destes testes foram

satisfatórios diante ao propósito de alternativas para essa etapa de uso racional de NaOH na gelatinização de amidos e féculas nas indústrias.

5.6 Microflotação

No total foram realizados 252 testes de microflotação para compor os gráficos expostos nas Figuras 31, 32, 33, 34, 35 e 36. Nestes gráficos são apresentadas as médias obtidas entre três ensaios.

1ª etapa – Análise da flotabilidade do quartzo e hematita usando depressores alternativos em diferentes dosagens e o coletor eteramina FLOTIGAM EDA na dosagem de 70 g/t. O amido de milho convencional foi o parâmetro de comparação para todos os testes do presente trabalho.

A Figura 31 apresenta o resultado dos ensaios de microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho e a fécula de batata, em diversas dosagens, observa-se que em dosagens mais altas o amido de milho adsorve-se mais na superfície do quartzo do que a fécula de batata. Entretanto, no caso do quartzo, o máximo de flotabilidade foi atingido em concentração de 0g/t de depressor, enquanto que para a hematita apenas em concentrações superiores a 1600g/t tem-se uma excelente recuperação, próximo de 95% de recuperação, que era esperado, diante da quantidade de amilopectina apresentada pela mesma que representa 85,9 % de sua composição. Estes resultados estão de acordo com resultados observados por Pinto (1989), que observou maior eficiência na ação depressora da amilopectina, comparada à amilose.

De acordo com PAVLOVIC (2002), a amilopectina é um floculante poderoso, desempenhando papel de um depressor mais efetivo de minerais de ferro. Vale ressaltar que para alcançar adequada seletividade na flotação catiônica reversa de minérios de ferro, propõe-se um depressor que adsorva na superfície da hematita que será deprimida e não prejudique a flotabilidade do quartzo. No entanto, apesar de alcançar boa recuperação do ferro, a fécula de batata também adsorveu na superfície do quartzo, o que era esperado, porém pode ser justificado por Aguiar (2014) a possibilidade do componente de amilose formar clatratos com a amina através de sua estrutura helicoidal.

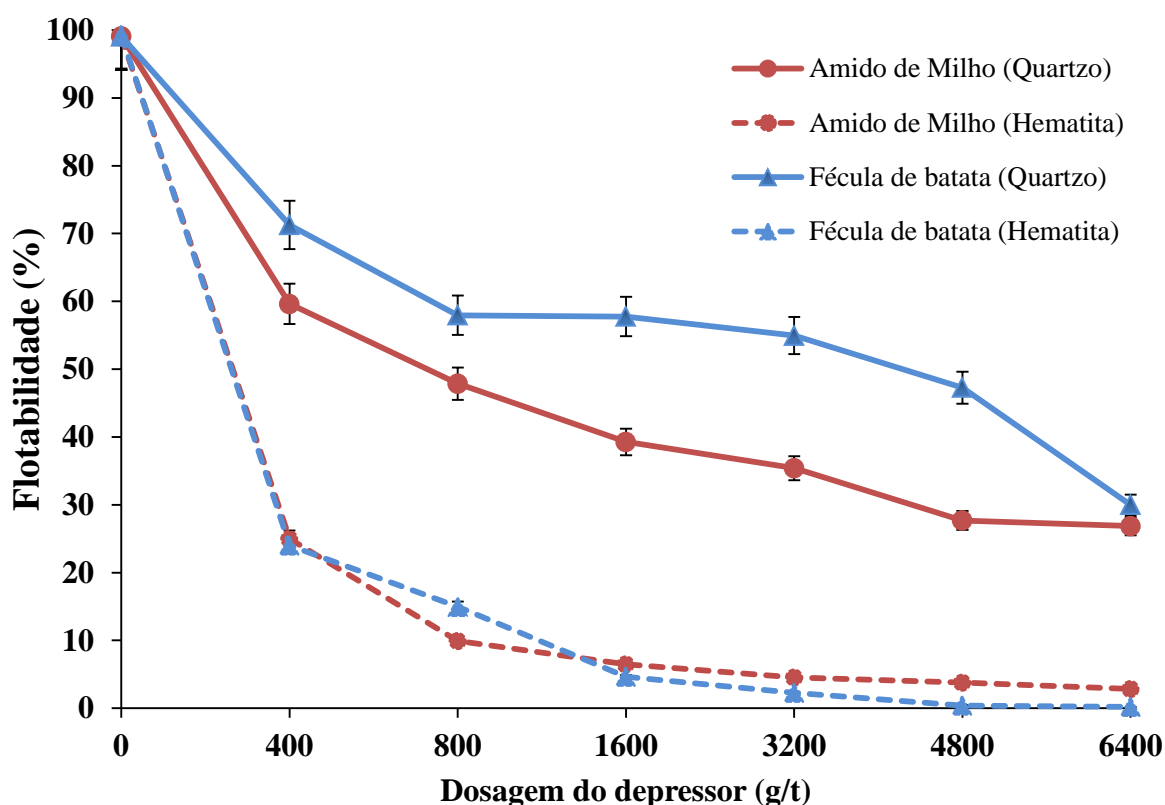


Figura 31. Resultado dos ensaios de microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho e a fécula de batata, em diversas dosagens.

A Figura 32 apresenta o resultado dos ensaios de microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho e a fécula de mandioca, em diversas dosagens, observa-se que em dosagens mais altas o amido de milho adsorve-se mais na superfície do quartzo e na superfície da hematita necessita de uma dosagem maior que 1600g/t para ter recuperação de ferro, o que não justifica, devido a alta adsorção do amido de milho na superfície do quartzo provocando sua depressão e consequente contaminação no produto desejado, já a fécula de mandioca apresentou um excelente resultado, pois teve boa recuperação da hematita na menor dosagem usada e em concentrações mais elevadas não afetou a flotabilidade do quartzo que é retirado de forma reversa no processo.

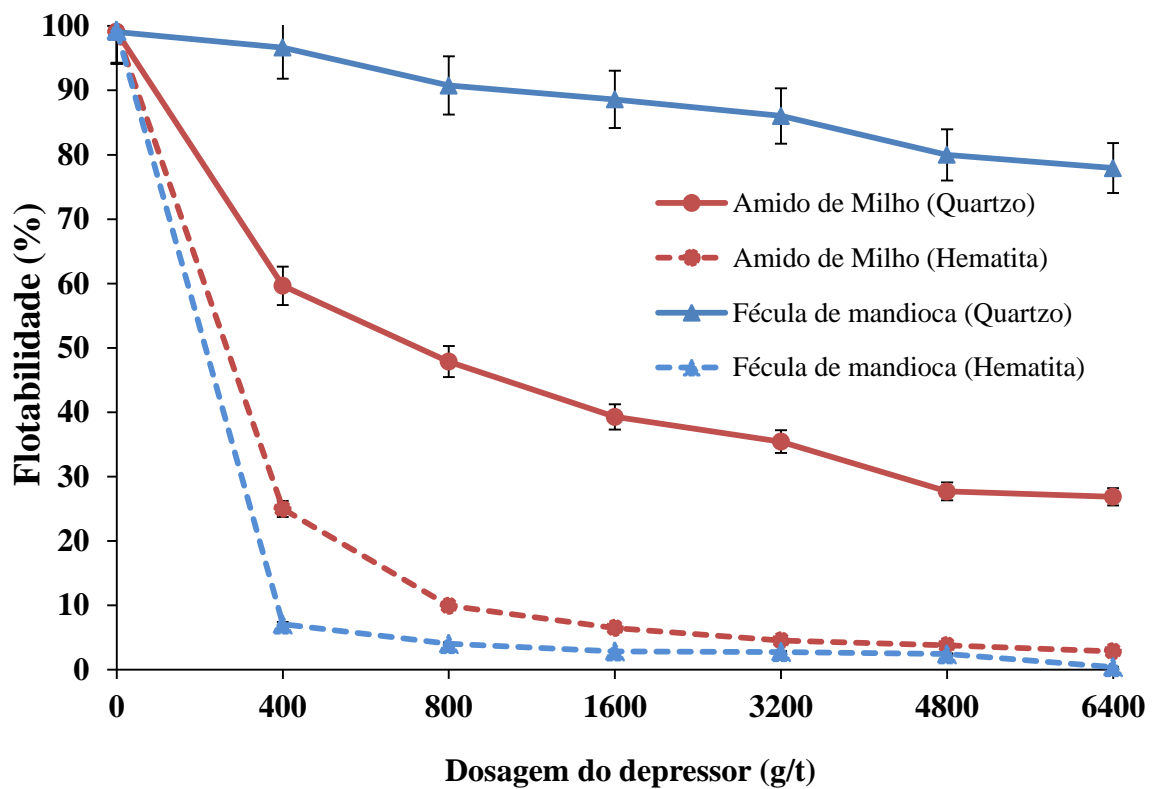


Figura 32. Resultado dos ensaios de microflotação para hematita e quartzo utilizando depressores amido de milho e a fécula de mandioca, em diversas dosagens.

A Figura 33 apresenta o resultado dos ensaios de microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho e o amido de mandioca, em diversas dosagens, observa-se que em dosagens mais altas, tanto o amido de milho como o amido de mandioca, adsorvem-se na superfície do quartzo atrapalhando sua flotabilidade e as baixas dosagens de amido de milho e amido de mandioca não são suficientes para ter uma boa recuperação de hematita no afundado.

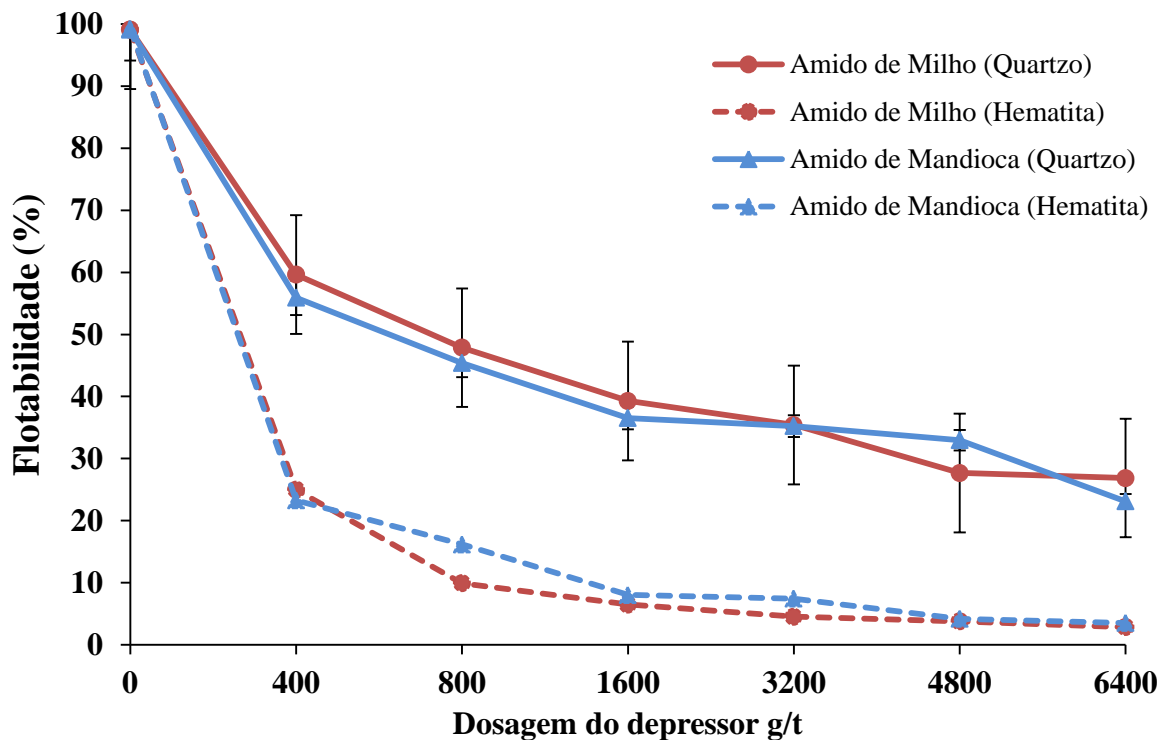


Figura 33. Microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho e a amido de mandioca.

A Figura 34 apresenta o resultado dos ensaios de microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho e o amido de milho modificado de nome comercial HIPIX 100, em diversas dosagens, observa-se que o amido de milho adsorve na superfície do quartzo levando uma depressão do quartzo, contaminando assim o produto desejado, no caso o Ferro. Já o amido de milho modificado de nome comercial HIPIX 100, que é o amido modificado deprime a hematita em baixa dosagem e não influencia a flotabilidade do quartzo em dosagens usuais pela indústria. Era esperado essa boa recuperação do ferro, diante a alta composição de amilopectina apresentando 78,1%, mas ao contrário da fécula de batata não influenciou na flotabilidade do quartzo.

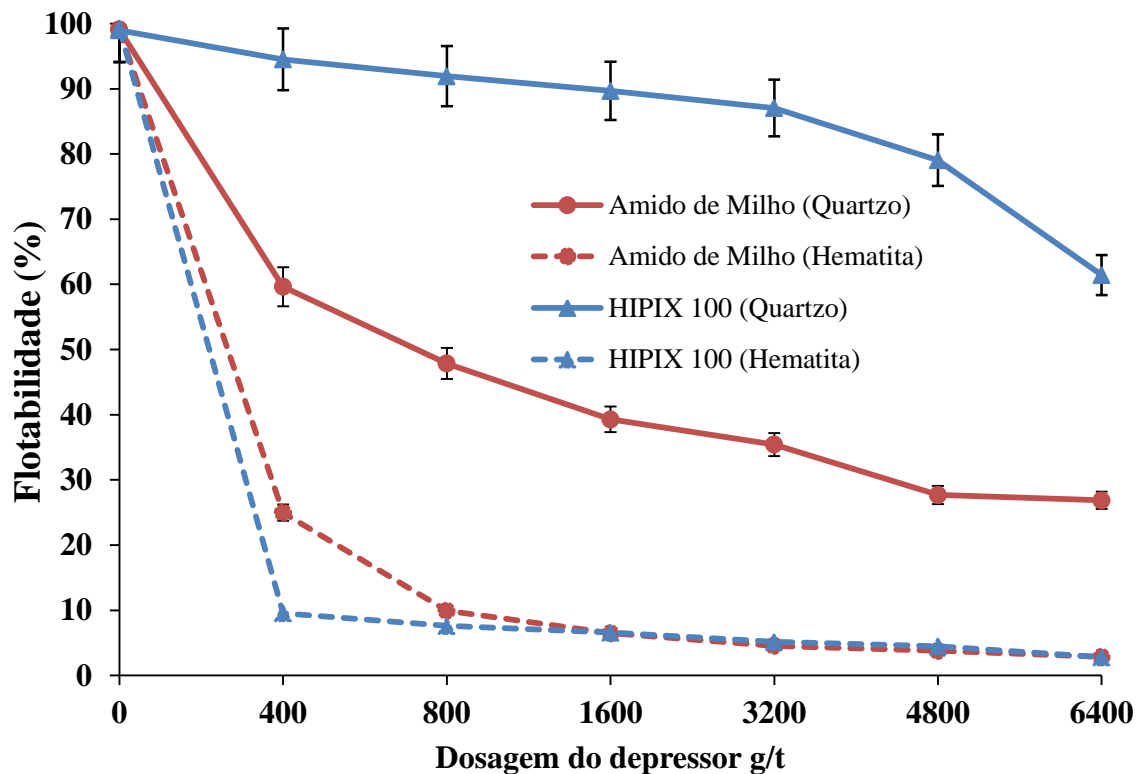


Figura 34. Microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho natural a amido de milho modificado com nome comercial HIPIX 100.

A Figura 35 apresenta o resultado dos ensaios de microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho e o amido de milho modificado de nome comercial HIPIX 101, em diversas dosagens, observa-se que o amido de milho adsorve na superfície do quartzo levando a sua depressão. Já o amido HIPIX 101, que é o amido deprime a hematita em baixa dosagem, mas também influencia a flotabilidade do quartzo nas dosagens acima de 1600g/t. Assim como a fécula de batata o amido de milho HIPIX 101 apresenta alta porção de amilopectina, apresentada por 81,9% teve uma boa recuperação do material deprimido, mas influenciou na flotabilidade do quartzo nas dosagens expressivas, o que segundo AGUIAR, 2014 pode ser justificado pela formação de clatratos com a amina através de sua estrutura helicoidal.

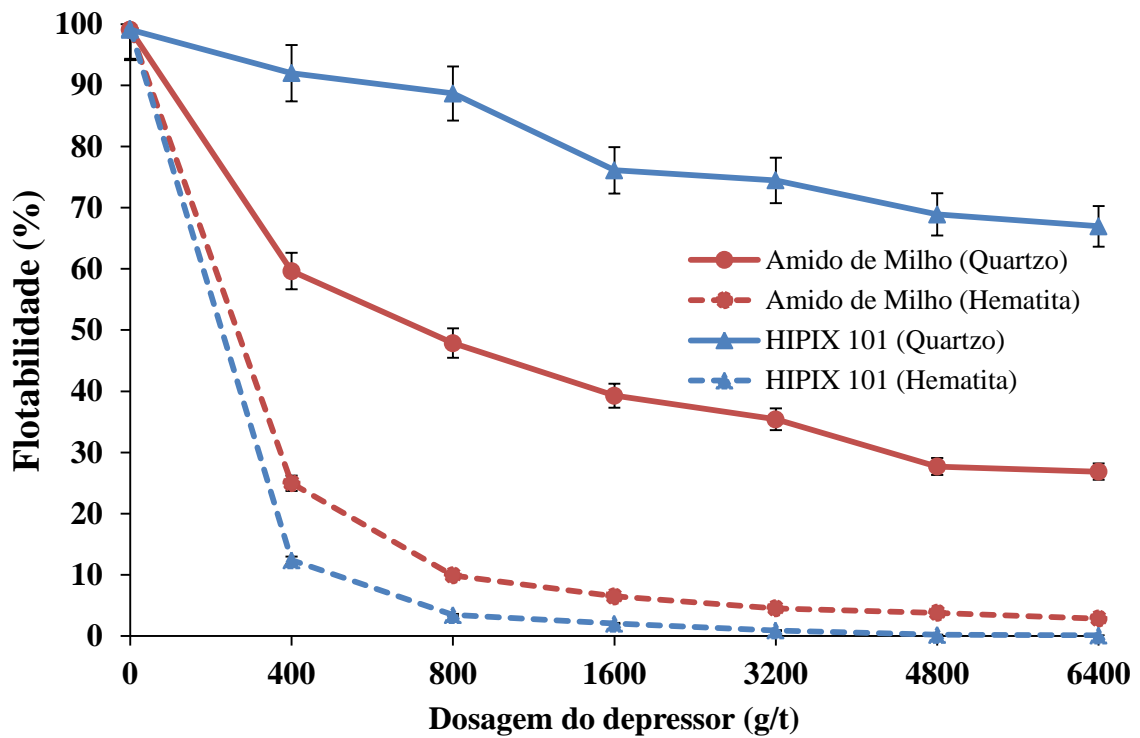


Figura 35. Microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho natural a amido de milho modificado com nome comercial HIPIX 101.

A Figura 36 apresenta o resultado dos ensaios de microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho e o amido de milho modificado de nome comercial HIPIX 102, em diversas dosagens, observa-se que tanto o amido de milho quanto o HIPIX 102 adsorvem na superfície do quartzo levando uma depressão do quartzo, contaminando assim o produto desejado. O amido de milho convencional e o amido de milho de nome comercial HIPIX 102, não apresentam uma boa recuperação, pois ambos adsorvem na superfície da hematita somente em dosagem acima de 3200 g/t e nesta superdosagem também deprime o quartzo. Esperava-se um bom resultado do amido de milho de nome comercial HIPIX 102, pois têm praticamente o dobro de amilopectina apresentado no amido de milho convencional, no entanto não teve uma boa recuperação. A dosagem que inicia maior recuperação da hematita é uma dosagem muito elevada, por isso não é economicamente viável, e como consequência deprime o quartzo.

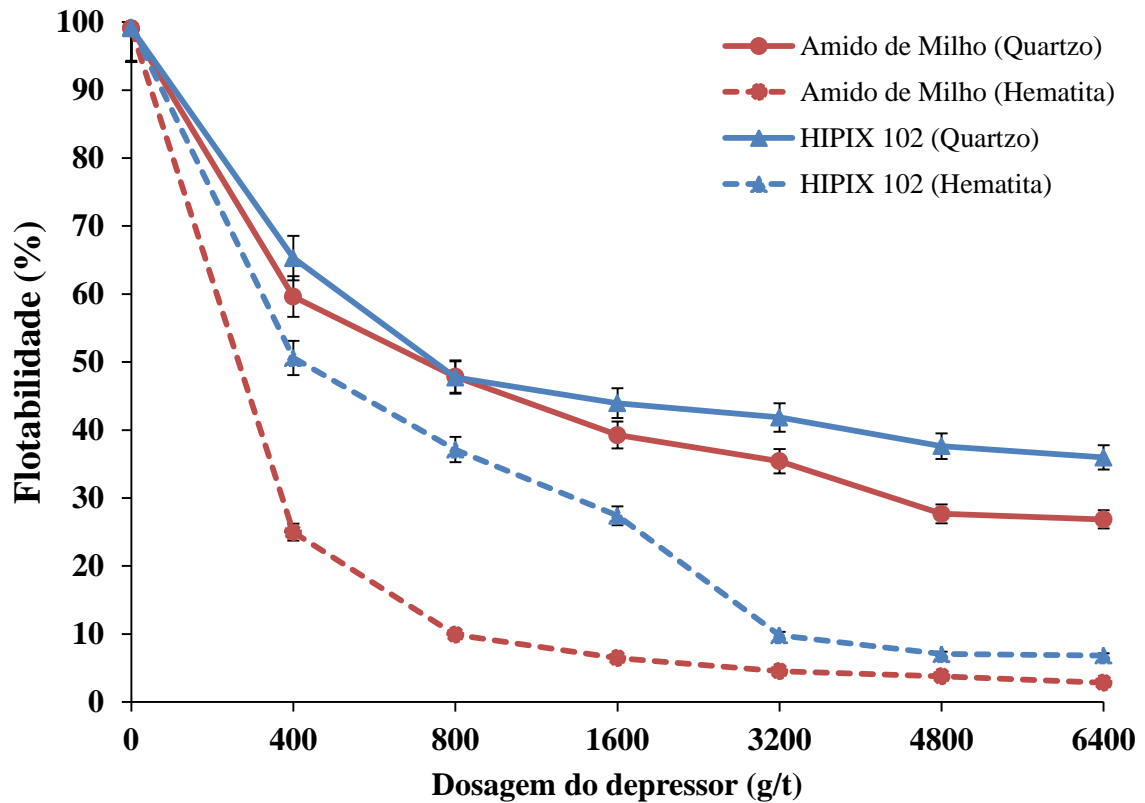


Figura 36. Microflotação para hematita e quartzo utilizando-se os depressores amido de milho natural e amido de milho modificado com nome comercial HIPIX 102.

Observa-se nos gráficos acima, os depressores HIPIX 100 e a fécula de mandioca apresentaram os melhores resultados em seguida o HIPIX 101 que também apresenta um bom resultado. Para melhor visualização na Figura 37 os depressores HIPIX 100 e a fécula de mandioca apresentaram os melhores resultados em seguida o HIPIX 101 é comparado com a recuperação do amido de milho convencional. Vale ressaltar que para alcançar adequada seletividade na flotação catiônica reversa de minérios de ferro, propõe-se um depressor que adsorva na superfície da hematita que será deprimida e não prejudique a flotabilidade do quartzo. De acordo com os testes estatísticos, podem ser observados no anexo III, confirmou-se a significância da fécula de mandioca e HIPIX 100 e HIPIX 101, comparando-os ao amido de milho convencional.

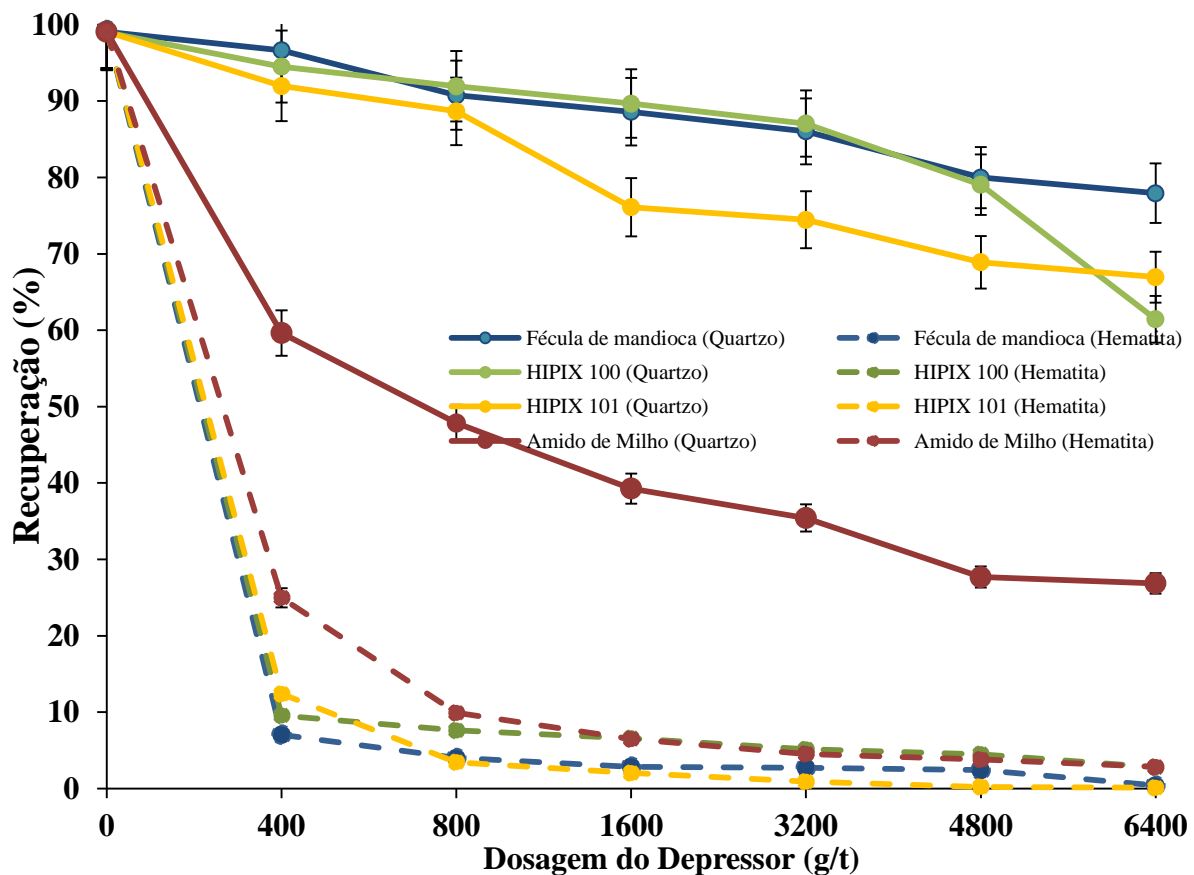


Figura 37. Melhores resultados de microflotação com os depressores HIPIX 100, HIPIX 101 e fécula de mandioca para minerais de hematita e quartzo, comparando com o depressor amido de milho convencional.

Segundo Pavlovic e Brandão (2003), os amidos adsorvem preferencialmente na superfície da hematita, se comparada a adsorção na superfície do quartzo, foi observado através de espectrometria no infravermelho (EIV). E que as isotermas de adsorção dos polímeros amilose e amilopectina do amido na hematita também são semelhantes. Segundo Aguiar (2014), a amina quando adicionada em solução aquosa contendo quartzo, adsorve-se na interface sólido-líquido sob certas condições de pH, tornando as partículas de quartzo hidrofóbicas.

Entretanto, tal hidrofobicidade pode ser afetada pela adição de amido, que é capaz de adsorver-se mutuamente com a amina, possivelmente devido à formação de um complexo helicoidal entre os reagentes, denominado de clatrato. Assim, o quartzo readquire caráter hidrofílico, uma vez que a amina é mascarada pelo invólucro de amido. Existem poucos estudos sobre interações entre amido e surfatante na flotação catiônica reversa de minérios de ferro.

5.7 Testes de Flotação em bancada

Foram realizados 45 testes de flotação em bancada, com os depressores HIPIX®100, HIPIX®101, fécula de mandioca e com amido de mandioca, uma vez que na análise estatística que se encontra no anexo III, mostrou a significância do amido de mandioca na recuperação do mineral quartzo na menor dosagem testada, foi feito também com amido de milho, pois é o amido mais utilizado nas indústrias, devido sua disponibilidade, contudo usado no presente trabalho como comparação, aos amidos propostos como alternativos para a indústria.

Os melhores depressores são aqueles que proporcionam menor adsorção na superfície do mineral quartzo e maior adsorção na superfície da hematita, um requisito importante para separação da ganga-minério. Na etapa de flotação reversa de minério de ferro em célula de bancada, flotou-se apenas uma vez e essa única etapa de flotação, funcionou como uma etapa rougher.

Na Figura 38 observa-se a recuperação metalúrgica e recuperação mássica dos depressores testados na célula de bancada, modelo ENGENDRAR, as recuperações foram calculadas através da eq. 4 e eq. 5 presente na metodologia. O amido de mandioca obteve um bom resultado, superando todos os demais depressores até a dosagem de 800 g/t, mas segundo a análise estatística o amido de mandioca e o amido HIPIX® 101 diferenciam por apenas um grupo estatístico, como pode ser observado no anexo III, o que não era esperado quando analisado somente na escala de microflotação, pois o amido de mandioca obteve uma boa recuperação para o mineral de quartzo, mas não mostrou-se eficiente para a hematita. Portanto, em maiores dosagens, o amido de milho modificado, de nome comercial HIPIX®101 superou a eficiência do amido de mandioca e mostrou uma boa adsorção na superfície da hematita, o que se explica por uma grande porção de amilopectina, segundo Araújo (1988).

Amidos compostos por maiores participações de amilopectina proporcionam maior seletividade na depressão da hematita, pois o amido se adsorve na hematita através de ligações de hidrogênio entre os grupos alcoólicos COH do anel glicose e do grupo metanol ligado ao anel com os grupos FeOH da superfície da hematita, enquanto a adsorção no quartzo ocorre através do metanol ligado ao anel de glicose.

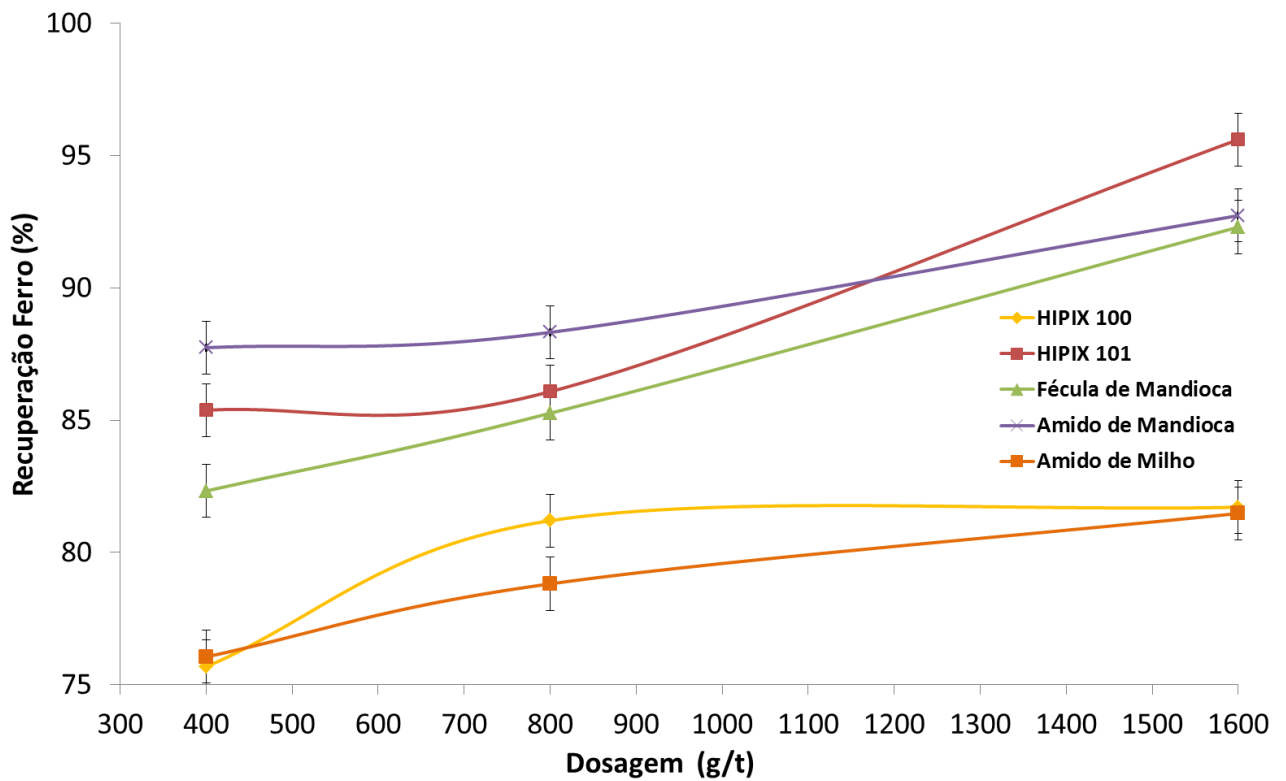


Figura 38. Recuperação do mineral de hematita através de flotação reversa de minério de ferro.

Na Figura 38 observou-se que todos os depressores obtiveram recuperação acima de 75%, no entanto, quando comparou os diferentes depressores ao amido de milho convencional, que é o mais utilizado nas indústrias mineradoras, observou que o amido de milho precisa ser usado em sua maior dosagem para aproximar-se da eficiência do amido HIPIX®100 que ainda assim foi o depressor de menor eficiência comparado ao amido de mandioca, HIPIX® 101 e fécula de mandioca. No entanto estatisticamente, o amido de mandioca e a fécula de mandioca não apresentam diferenças significativas para a dosagem de 1600 g/t, assim como para o HIPIX® 101 nas dosagens de 400 e 800 g/t também não mostraram diferenças significativas,

6 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no presente trabalho contribuíram para um maior entendimento do mecanismo de adsorção dos reagentes da flotação catiônica reversa de minérios de ferro. Os amidos e féculas estudadas demonstram relativo ganho em recuperação metalúrgica, se comparadas ao amido de milho convencional utilizado atualmente nas plantas de flotação, devido seu preço e disponibilidade, ou ate mesmo por falta de estudos sobre a eficiência de outros depressores. Mostrou-se importante a investigação de novos reagentes e condições de interações destes na superfície dos minerais, bem como entender a influência de diferentes dosagens no processo de flotação catiônica reversa de minério de ferro.

A microflotação em tubo de *Hallimond* modificado se mostrou muito importante, onde pôde-se entender melhor a real influência da dosagem e a proporção de amilopectina dos depressores testados. Contudo, o aumento da dosagem do depressor implica no aumento de ferro recuperado, mas não é um crescimento contínuo, pois em dosagens mais elevadas começa a prejudicar o sistema deprimindo também a ganga.

Conseguiu-se bons resultados nos amidos de nome comercial HIPIX®100, HIPIX®101 e na fécula de mandioca nos testes de microflotação, foram os amidos observados menor influência na ganga, quando se aumenta a dosagem, portanto os testes de microflotação do mineral de quartzo, o amido de mandioca se mostrou um potencial, segundo o teste estatístico. Na etapa de teste em flotação em célula de bancada usou-se apenas os melhores depressores analisados nos testes da microflotação, nas dosagens de 400, 800 e 1600 (g/t), os melhores resultados foi para os depressores amido de mandioca, amido de milho modificado de nome comercial HIPIX®101 e fécula de mandioca. Estes depressores propostos se mostaram excelente quanto à recuperação de ferro no afundado, a pequena porção de silício também deprimido, é um problema que pode ser resolvido com uma etapa cleaner.

O de uso racional de NaOH na gelatinização foi melhor entendido, visto que a titulação com NaOH na complexa solução amido/NaOH mostrou-se uma ferramenta interessante para análise do ponto de gelatinização, pode-se ter uma gelatinização bem sucedida com menores participações de NaOH, como mostrado nos testes realizados no presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. A. M. **Clatratos na flotação catiônica reversa de minérios de ferro**. 108 f. [Dissertação de Mestrado] - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.

ALBUQUERQUE, R. O. **Alternativas de processo para concentração do minério fósforo-uranífero de Itataia**. 131 f. [Tese de Doutorado]. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

ARAÚJO, A. C.; PERES, A. E. C.; VIANA, P. R. M.; OLIVEIRA, J. F. Flotação de minérios de ferro. In CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios: flotação o estado da arte no Brasil**. v. 4. São Paulo: Signus, 2006.

ARAÚJO, A. C.; VIANA, P. R. M.; PERES, A. E. C. **Reagents in iron ores flotation**. Minerals Engineering. v. 18. p 219-224, 2005.

CEREDA, M. P. **Culturas de tuberosas amiláceas latino-americanas: Propriedades Gerais do Amido**. Campinas: Fundação Cargill, 2001.

CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S. **Flotação**. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de Minérios. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - Flotação no Brasil**. 3ª Edição. São Paulo: Oficinas de Textos Editora, 2013. Volume 4. p. 1-24.

CRISTIE, T.; BRATHWAITE, B. **Mineral commodity report 15 – iron**. New Zealand: Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd, 1997.

DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P. **Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas**. Revista Ciência Rural. v. 39. n.3, Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An Introduction to the Rock-forming Minerals**. London: Ed. Longmans Scientific & Technical., 2ª Ed., 696p., 1992;

FRANCO, C. M. L.; CEREDA, M. P.; DAIUTO, E. R.; DEMIATE, I. M.; CARVALHO, L. J. C. B.; LEONEL, M.; VILPOUX, O. F.; SARMENTO, S. B. S. **Propriedades gerais do amido**. Fundação Cargill, v.1. Campinas, 2001.

FUERSTENAU, M. C. **Oxide and silicate flotation**. In: MATIS, K. A. Flotation science and engineering. New York: Marcel Dekker, 1995.

GOMES, A. M. M.; SILVA, C. E. M.; RICARDO, N. M. P. S. **Effects of annealing on the physicochemical properties of fermented cassava starch (polvilho azedo)**. Carbohydrate Polymers, Kidlington Oxford, v. 60, n.1, p. 1-6, 2005.

HANNA, H. S.; SOMASUNDARAN, P. **Flotation of salt-type minerals**. In: FUERSTENAU M. C. (ed.). Flotation A. M. Gaudin Memorial Volume. Baltimore: AIME, vol. 1, p. 197-272, 1976.

HADZERIGA, P.; GIANNINI, R. A. **Amidos como reagente na indústria mineral - pequena revisão**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 13, 1988, São Paulo, APEMI, p. 1031-1045.

HORTA, D. G. **Flotação**. Poços de Caldas, 2014 (Notas de aula - UNIFAL/MG).

HORTA, D. G. **Efeito da cristalinidade e da cinética de dissolução no desempenho da flotação de apatitas e calcitas**. [Tese de Doutorado] - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

JACOMO, D. H. **Informações Importantes** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <debora.nascimento@ifgoiano.edu.br> em 29 jan. 2016.

KAR, B.; SAHOO, H., RATH, S. S.; DAS, B. **Investigations on different starches as depressants for iron ore flotation**. Revista Minerals Engineering, v.49, p.1-6, 2013.

LEONEL, M; OLIVEIRA, M. A.; DUARTE FILHO, J. **Espécies tuberosas tropicais como matérias-primas amiláceas**. Ver. Raízes e amidos tropicais, v.1, p.49-68, 2005.

LEAL FILHO, L. S. **Flotação**. (Apostila didática/TTE - Treinamento Técnico Especializado Ltda). Belo Horizonte, 2007.

LIMA, R. M. F. **Efeito da adsorção de amina no potencial zeta da hematita e do quartzo.** REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 56(1): 45-49, jan.-mar. 2003.

MARQUES, M. L. S. **Comportamento de minérios de ferro na concentração por flotação na presença de lamas.** [Dissertação de Mestrado] - Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013.

MOREIRA, W. R. **Fontes de amido aplicáveis à flotação de minério de ferro.** [Dissertação de Mestrado] - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 129 f., 2013.

NAGARAJ, D. R. **Reagent selection and optimization - The case for a holistic approach.** Revista. Minerals Engineering, v.18, p.151-158, 2005.

NEDER, E. E.; LEAL FILHO, L. S. **O uso de aminas graxas e seus derivados na flotação de minérios Brasileiros.** Revista Holos. v. 1. p 53-75, 2006.

OLIVEIRA, M. S. **Minério Fosfático Sílico - Carbonatado: Estudo Fundamental.** [Tese de Doutorado] - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 223 f, 2007.

PAVLOVIC, S. **Adsorção de carboidratos nos minerais hematita e quartzo.** [Tese de Doutorado] - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 220 f., 2002.

PERES, A. E. C.; SALUM, M. J. G.; VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. **Métodos de concentração.** In: VALADÃO, G. E. S.; ARAUJO, A. C. Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

PERES, A. E. C.; CORREA, M. I. **Depression of iron oxides with corn starches.** Minerals Engineering. v. 9. p. 1227-1234, 1996.

PINTO, C. L. L.; ARAUJO, A. C.; PERES, A. E. C. **The effect of starch, amylose and amylopectin on the depression of oxi-minerals.** Minerals Engineering. v. 5. p. 469-478, 1992.

RODRIGUES, W. J. **Mecanismo de flotação de partículas grossas em células mecânicas: influencias das variáveis hidrodinâmicas e suas implicações cinéticas.** [Tese de Doutorado] - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 131 f., 2010.

SANTOS, E. P. **Alternativas para o tratamento de ultrafinos de minério de ferro na mina do Pico/MG por flotação em coluna.** [Dissertação de Mestrado] - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 136 f., 2010.

SINGH, N.; SINGH, J.; KAUR, L.; SODHI, N. S.; GILL, B. S. **Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources.** Food Chemistry, v.81, n.219 - 231, 2003.

SOARES, A. P. M. **Estudo da Flotabilidade e Carga Superficial da Wollastonita na Presença de Amina e Ácido Oleico.** [Dissertação de Mestrado] - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 73 f., 2015.

TURRIER, H. D. G. **Polímeros depressores na flotação de minério de ferro.** [Tese de Doutorado] - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Belo Horizonte, 203 f., 2007.

TURRER, H. D. G.; PERES, A. E. C. **Investigation on alternative depressants for iron ore flotation.** Revista Minerals Engineering, v.23, p. 1066–1069, 2010.

VIANA, P. R. M.; ARAÚJO, A. C.; PERES, A. E. C. **Princípios da flotação de silicatos.** In: CHAVES, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios: flotação o estado da arte no Brasil. v. 4. São Paulo: Signus, 2006.

VILPOUX, O. F. **Produção de fécula a partir de birí (*Canna edulis*) na China.** In: CEREDA, M. P.; VILPOUX, O. F. Tecnologia, usos e potencialidades de tuberosas amiláceas latino americanas. São Paulo: Fundação Cargill, 2004. (Série: culturas de tuberosas amiláceas latinoamericanas, v.3).

WALTON, D.; MANSER, R. M. **Some factors affecting the limitations conditions in cationic flotation of silicates.** In: Transactions of the American institute of mining and metallurgical engineers (AIME 77), 1968.

WALDE, D. H. G. **Geologia do ferro**. In: SCHOBENHAUS, C.; COELHO, C. E. S. Principais depósitos minerais do Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral, v.II, c.1, p.3-6., Brasília, 1986.

ZETA METER INC. **Zeta Potential – A complete course in five minutes**.(Sem data). Disponível em: <http://www.zeta-meter.com/5min.pdf>. Acessado em: 23/09/2014

ANEXO I



Polímero Natural HI PIX® 100

Polímero natural de grau industrial.

Especificações:

Físico-Químicas:

	<i>Min.</i>	<i>Máx.</i>
Umidade, %	-	14,00
pH	4,5	5,5

Principais aplicações:

Mineração

Funcionalidade:

- Atua como agente depressor na flotação de minérios.

Embalagem - Vida útil:

A granel: 180 dias

Big bag 1000 kg: 730 dias

Armazenagem:

Armazenar sobre pallets, em local coberto, seco e ventilado.

Granel: Armazenar exclusivamente em equipamentos especificados pela Ingredion Brasil.

Informações Regulatórias:

GRAS: 21CFR182.90

USFDA: 21CFR174.5

USFDA: 21CFR175.105

USFDA: 21CFR176.170

Portaria nº 177 04/03/99-ANVISA

FICHA TÉCNICA

Novembro, 2012

As informações aqui contidas são de título meramente indicativo das possibilidades técnicas de utilização do produto, não aplicando garantia de resultado e não dispensando o usuário da verificação de eventuais limitações técnicas de uso em condições ou finalidades específicas. A Ingredion Incorporated e as empresas do seu grupo reservam-se o direito de modificar as especificações do produto.

As marca e o logotipo aqui referidos são marcas registradas do grupo INGREDION e utilizadas pela Ingredion Brasil Ing. Ind. Ltda.
Todos os direitos reservados. Copyright 2012

31/01/2014

Ingredion Brasil Ing. Ind. Ltda.
Av. do Café, 277 - 2º andar
04311-000 - São Paulo - SP

t: 0300 7895800 / 55 11 5070-7835
e: sac.br@ingredion.com

www.ingredion.com



Amido de Milho HI PIX® 101

Polímero natural de grau industrial.

Especificações:

Físico-Químicas:

	<i>Min.</i>	<i>Máx.</i>
Umidade, %	-	14,00
pH	4,5	5,5

Principais aplicações:

Mineração

Funcionalidade:

- Atua como agente depressor na flotação de minérios.

Embalagem - Vida útil:

Big bag 1000 kg: 180 dias

Armazenagem:

Armazenar sobre pallets, em local coberto, seco e ventilado.

Granel: Armazenar exclusivamente em equipamentos especificados pela Ingredion Brasil.

Informações Regulatórias:

GRAS: 21CFR182.90

USFDA: 21CFR174.5

USFDA: 21CFR175.105

USFDA: 21CFR176.170

Portaria nº 177 04/03/99-ANVISA

FICHA TÉCNICA

23/04/2014

Novembro, 2012

As informações aqui contidas são de título meramente indicativo das possibilidades técnicas de utilização do produto, não aplicando garantia de resultado e não dispensando o usuário da verificação de eventuais limitações técnicas de uso em condições ou finalidades específicas. A Ingredion Incorporated e as empresas do seu grupo reservam-se o direito de modificar as especificações do produto.

As marca e o logotipo aqui referidos são marcas registradas do grupo INGREDION e utilizadas pela Ingredion Brasil Ing. Ind. Ltda.
Todos os direitos reservados. Copyright 2012

Ingredion Brasil Ing. Ind. Ltda.
Av. do Café, 277 - 2º andar
04311-000 - São Paulo - SP

t: 0300 7895800 / 55 11 5070-7835
e: sac.br@ingredion.com

www.ingredion.com



Amido de Milho HI PIX® 102

Polímero vegetal grau industrial.

Especificações:

Físico-Químicas:

Umidade, %
pH

Min. Máx.

Min.	Máx.
-	14,00
5,0	6,0

Principais aplicações:

Mineração

Funcionalidade:

- Atua como agente depressor na flotação de minérios.

Embalagem - Vida útil:

Big bag 1000 kg: 180 dias

Armazenagem:

Armazenar sobre pallets, em local coberto, seco e ventilado.

Granel: Armazenar exclusivamente em equipamentos especificados pela Ingredion Brasil.

Informações Regulatórias:

GRAS: 21CFR182.90

USFDA: 21CFR176.170

FICHA TÉCNICA

16/05/2014

Novembro, 2012

As informações aqui contidas são de título meramente indicativo das possibilidades técnicas de utilização do produto, não aplicando garantia de resultado e não dispensando o usuário da verificação de eventuais limitações técnicas de uso em condições ou finalidades específicas. A Ingredion Incorporated e as empresas do seu grupo reservam-se o direito de modificar as especificações do produto.

As marca e o logotipo aqui referidos são marcas registradas do grupo INGREDION e utilizadas pela Ingredion Brasil Ing. Ind. Ltda.
Todos os direitos reservados. Copyright 2012

Ingredion Brasil Ing. Ind. Ltda.
Av. do Café, 277 - 2º andar
04311-000 - São Paulo - SP

t: 0300 7895800 / 55 11 5070-7835
e: sac.br@ingredion.com

www.ingredion.com

ANEXO II

Método de Análise	Numero do Procedimento: MA03	Desde: 05/09/2008
Flotação Catiônica Reversa de Minério de Ferro-teste Padrão	Página(s): 04	Revisão: Nº 03 Data: 06/22/2009

Status: Em vigor

Emitente: Monica Cassola	Verificador: Wagner Silva	Aprovador: Monica Cassola
-----------------------------	------------------------------	------------------------------

1- INTRODUÇÃO

A flotação é um processo para separação de partículas sólidas explorando suas diferentes características de superfície entre as várias espécies presentes. O ensaio descrito neste procedimento é através da reprodução dos procedimentos operacionais adotados na mineração de minério de ferro, avaliando a performance do coletor Clariant em uma célula de flotação tipo Denver. Este é o padrão pela Clariant, mas o teste pode realizado nas condições solicitada por cada cliente.

1- REAGENTES

2.1 NaOH (hidróxido de sódio)

2.2 Amido

2.3 Coletor: Flotigan EDA

3- APARELHAGEM

3.1 Célula de flotação tipo Denver;

3.2 Pêra;

3.3 Proveta;

3.4 Pipeta;

3.5 Cronometro;

3.6 Agitador;

3.7 pHmetro;

3.8 Balão volumétrico 100 ml

3.9 Pissete;

3.10 Balança com precisão de 0,01 g

4- PREPARAÇÃO DE SOLUÇÕES

4.1- Solução de amido (gelatinização):

4.1.1 Pesa-se aproximadamente 2g de amido em um béquer de 150 ml previamente tarado contendo um bastão de agitação magnética.

4.1.2 Adicionar aproximadamente 20 ml de água destilada e dispor o conjunto em um agitador magnético.

4.1.3 Ligar a agitação (agitador magnético) e adicionar aproximadamente 5 ml de NaOH a 10 %.

4.1.4 Manter a agitação até gelatinização, adicionando água destilada até aproximadamente 80 ml.

4.1.5 Retornar com béquer à balança e adicionar água até aproximadamente 100 g.

ATENÇÃO: A relação “amido:NaH é expressa em “x:y”, que representa partes de amido (x) por partes de soda cáustica (y). O procedimento descrito relata 2 g de amido e 0,5 ml de NaOH, ou seja, quatro partes de amido para uma parte de hidróxido de sódio (4:1).

4.2- Preparo Solução de amina:

4.2.1 Pesa-se aproximadamente 1 g de coletor em um béquer de 150 ml previamente tarado contendo um bastão de agitação magnética.

4.2.2 Adicionar aproximadamente 100 g de água e dispor o conjunto em um agitador magnético.

4.2.3 Ligar a agitação atentando-se para a velocidade não projetar a solução para fora do béquer.

5- PROCEDIMENTO

5.1 Adiciona-se 933ml de água na cuba de flotação de 3 L

5.2 Posiciona-se o eletrodo do pHmetro, com auxílio do suporte de fixação, na altura correta de medição da massa de água.

5.3 Liga-se o rotor da célula de flotação a uma velocidade de 1400RPM.

5.4 Adiciona-se aproximadamente 1,400Kg de amostra de minério de ferro, previamente seca, na cuba de flotação. Para um teor de sólidos de 60% no ensaio.

5.5 Condiciona-se a polpa durante 1 minuto e mede-se o pH inicial da polpa, anotando o valor em formulário apropriado.

5.6 Condiciona-se o amido, solução 2%, gelatinizado com soda na proporção 4:1. A dosagem empregada pode variar de 400 a 700g/t.

5.7 Condiciona-se a polpa durante 5 minutos.

5.8 Ajusta-se o pH para 10,5 com NaOH

5.9 Adiciona-se o **coletor Clariant** na dosagem de 20 a 70g/t, na proporção de eteramonoamina e/ou eterdiamina desejada.

5.10 Com rotor ainda ligado aguarde 1 minuto para condicionamento da polpa

5.11 Verifica-se o valor de pH e caso mantenha-se em 10,5 retirando-o. Caso contrário ajusta-se o pH para o valor desejado.

5.12 Abre-se a entrada de ar para que se forme a camada de espuma.

5.13 Realiza-se a flotação imediatamente após o início da formação de espuma, recolhendo-a de maneira sempre constante por aproximadamente 3 minutos.

5.14 Após o término da camada de espuma passível de ser retirada, adiciona-se água para elevar o nível de polpa. Neste instante recolher o remanescente do flotado.

5.15 Transfere-se as frações do afundado e flotado para bandejas previamente identificadas.

5.16 Seca-se as frações em estufa com ventilação a aproximadamente 105°C durante 12 horas.

5.17 Após a completa secagem, pesa-se a massa do flotado e do afundado (em formulário apropriado) para a determinação da recuperação em massa.

5.18 Alíquotas de aproximadamente 50g dos produtos de flotação são retiradas para análise química, onde 25g são arquivados e outros 25g são pulverizados e seguem para análise.

ATENÇÃO: Variáveis como % de sólidos do ensaio, pH do meio, velocidade do rotor, composição química e concentrações dos depressores e coletores, tempo de condicionamento e tempo de flotação (residência) podem ser alteradas de acordo com a requisição do cliente (natureza/especificidade do minério). A tabela 01 mostra as condições das principais variáveis do ensaio de flotação padrão.

6- CÁLCULOS

6.1 Recuperação Mássica

$\% \text{Rec. Massa concentrado} = \frac{\text{massa concentrado(g)}}{\text{Massa alimentação(g)}} \times 100$

Massa alimentação(g)

6.2 Recuperação Metalúrgica

$\% \text{Rec. Met concentrado} = \frac{\% \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ concentrado}}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ Alimentação}} \times \text{Rec massa concentrado}$

$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ Alimentação}$

7- PERICULOSIDADE

7.1 Hidróxido de sódio: Produto corrosivo, irritante para o nariz, garganta e olhos. Em contato com a pele causa queimadura, se ingerido pode levar a morte.

8- REFERÊNCIAS

CHAVES, A.P. – Flotação: O estado da arte no Brasil Ed: Signus – Apoio: Clariant. São Paulo SP 2006 (Coleção: Teoria e prática do tratamento de minérios; V4).

ANEXO III

