



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Departamento de Engenharia de Minas  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral - PPGEM

---

**ENGENHARIA  
MINERAL**



ALMA MATER IN  
MINERALIA BRASILIENSIS

## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

# **AMIDO NATURAL E MODIFICADO COMO FLOCULANTE DE LAMA DE MINÉRIO DE FERRO**

**Autora: Aline Da Mata Chiacchio Leite**

**Orientador: Érica Linhares Reis**

**Ouro Preto - MG**

**2019**

Universidade Federal de Ouro Preto  
Departamento de Engenharia de Minas  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral - PPGEM

Aline da Mata Chiacchio Leite

**AMIDO NATURAL E MODIFICADO COMO FLOCULANTE DE LAMA DE  
MINÉRIO DE FERRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Tratamento de Minérios  
Orientadora: Érica Linhares Reis

**Ouro Preto - MG  
2019**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L532a Leite, Aline da Mata Chiacchio .  
Amido natural e modificado como floculante de lama de minério de ferro.  
[manuscrito] / Aline da Mata Chiacchio Leite. - 2019.  
67 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Érica Linhares Reis.  
Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Engenharia Mineral.  
Área de Concentração: Tratamento de Minérios.

1. Espessamento. 3. Minérios de ferro. 4. Floculação. 5. Beneficiamento de minério. I. Reis, Érica Linhares. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.79

**“AMIDOS MODIFICADOS COMO FLOCULANTES DE LAMA DE  
REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO”**

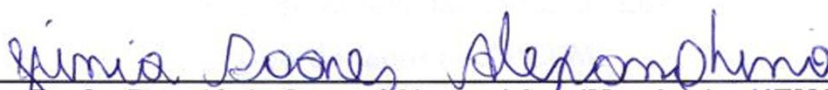
**AUTORA: ALINE DA MATA CHIACCHIO LEITE**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 23 de setembro de 2019, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



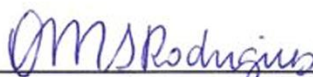
---

**Prof. Dra. Érica Linhares Reis (Orientadora) – UFOP**



---

**Prof. Dra. Júnia Soares Alexandrino (Membro) – UEMG**



---

**Prof. Dra. Otávia Martins Silva Rodrigues (Membro) – UFOP**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio e amor incondicional. Agradeço também, em especial:

À Prof. Érica Linhares Reis, por me guiar durante essa etapa acadêmica. Sua orientação, paciência, dedicação, generosidade e carinho foram fundamentais durante essa jornada de aprendizado;

Aos membros da banca de defesa, Prof. Otávia Martins Silva Rodrigues e Prof. Júnia Soares Alexandrino, por aceitarem o convite para a participação desta banca e pelo conhecimento, considerações e sugestões que contribuíram com a realização deste trabalho;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEM), pela contribuição com meu aprendizado;

Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN), Antônio Pedro de Freitas, Flávio Luiz Martins, Luiz Cláudio do Sacramento e Mariana Caroline Andrade Silva, pela paciência e disponibilidade em me auxiliar nos ensaios realizados;

Aos funcionários do DEMIN, Renata e Ludmilla, pelo auxílio e prestatividade durante esses últimos anos; Joaquim, Anderson, Rafael, Wagner, Joanna e Isabel, pela diligência e zelo. À Isabel, agradeço também pelo carinho e alegria;

Aos colegas do PPGEM e DEMIN, Adriana, Carlos, Elianderson, Felipe, Francielle, Geriane, Isabela, Maísa, Marcus, Mariana, Paolla, Paula, Pedro Guilherme, Pedro Henrique, Rafael e Tatiana, pelo companheirismo, apoio, amizade e risadas durante essa jornada;

Ao bolsista de iniciação científica, Warleson Cândido, não só pelo auxílio na realização dos vários ensaios, mas principalmente pela amizade, carinho e paciência.

Ao William Kaiser pelo apoio na obtenção de amostras utilizadas no trabalho.

Ao Jordani Luiz Rodrigues da Silva da empresa Agrícola Horizonte Ltda – Amidos pelo fornecimento dos amidos utilizados neste trabalho e por todo auxílio prestado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço também ao CNPQ e FAPEMIG.

## RESUMO

O uso de coagulantes e floculantes na etapa de espessamento de minério de ferro é essencial devido à dificuldade de sedimentação das partículas finas e ultrafinas em suspensão presentes nos rejeitos do processamento mineral. Porém, os reagentes sintéticos atualmente utilizados neste processo possuem alto custo e potencial tóxico para o meio ambiente e consumo humano, tendo o uso proibido em alguns países. Logo, este trabalho teve como objetivo avaliar a utilização de amidos modificados (catiônico reticulado, catiônico pré-gelatinizado e ceroso) como floculantes na sedimentação de lamas de minério de ferro buscando uma alternativa menos tóxica e de menor custo quando comparada com o uso de polímeros sintéticos. Foi realizada a caracterização de uma amostra da alimentação do espessador de lamas que indicou a presença de hematita, quartzo e caulinita, com cerca de 50% das partículas abaixo de 10 µm. Presença de 55 g/L de sólidos suspensos e 78 mL/L de sólidos sedimentáveis. Quando comparados com a Resolução CONAMA 357/2005 Classe II, os parâmetros de turbidez e sólidos sedimentáveis da amostra estavam acima do valor permitido. Amostras dos minerais majoritários puros (hematita e quartzo) foram utilizadas para a realização dos testes de agregação para cada amido modificado em dosagens 1 mg/L, 10 mg/L e 100 mg/L na faixa de pH de 6 a 9. O amido catiônico pré-gelatinizado foi o amido modificado de melhor resultado quanto a porcentagem de material sedimentado tanto para a hematita quanto para o quartzo nas dosagens 10 mg/L no pH 7 (99% de material sedimentado). A poliacrilamida apresentou valores baixos de quartzo sedimentado (menor que 50%). Foi observada a adsorção química do amido catiônico na superfície do quartzo e da hematita. Foram realizados então ensaios de *Jar Test* utilizando a amostra da alimentação do espessador de lama e o amido catiônico pré-gelatinizado, visando otimizar as variáveis de dosagem, tempo de agitação e tempo de sedimentação. Os melhores resultados nos ensaios de *Jar Test* foram o teste com dosagem de 10 mg/L, 20 minutos de tempo de agitação e 60 minutos de tempo de sedimentação e teste com dosagem de 50 mg/L, 10 minutos de tempo de agitação e 10 minutos de tempo de sedimentação.

**Palavras-chave:** espessamento, lama, minério de ferro, floculação, amido modificado.

## ABSTRACT

The use of coagulants and flocculants in the iron ore thickening process is essential due to the difficulty in sedimenting the fine and ultrafine suspended particles present in the mineral processing's tailings. However, the synthetic reagents currently used in this process have high cost and toxic potential for the environment and human consumption, having their use prohibited in some countries. Therefore, this study aimed to evaluate the use of modified starches (crosslinked cationic, pregelatinized cationic and waxy) as flocculants in the sedimentation of iron ore slimes seeking a less toxic and less expensive alternative when compared with the use of synthetic polymers. The characterization of a sample from the slimes thickener's feed indicated the presence of hematite, quartz and kaolinite, with about 50% of the particles below 10  $\mu\text{m}$ . Presence of 55 g/L of suspended solids and 78 mL/L of sedimentable solids. When compared to the Resolution CONAMA 357/2005 Class II, the sample turbidity and sedimentable solids parameters were above the allowable value. Samples of minerals of majority presence (hematite and quartz) were used to perform aggregation tests for each modified starch at dosages 1 mg/L, 10 mg/L and 100 mg/L in the pH range 6 to 9. The pregelatinized cationic starch was the modified starch of better result as the percentage of sedimented material for both hematite and quartz in the dosages 10 mg/L at pH 7 (99% of sedimented material). Polyacrylamide showed low values of sedimented quartz (less than 50%). It was observed the chemical adsorption of the cationic starch on the surface of quartz and hematite. Jar Test assays were then performed using the slimes thickener's feed sample and the pregelatinized cationic starch, aiming to optimize the dosage, agitation time and sedimentation time variables. The best results in the Jar Test assays were the test using 10 mg/L dosage, 20 minutes of agitation and 60 minutes of sedimentation, and the test using 50 mg/L dosage, 10 minutes agitation and 10 minutes of sedimentation.

**Keywords:** thickening, slimes, iron ore, flocculation, modified starch.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	6
2	OBJETIVOS.....	8
2.1	Objetivo geral .....	8
2.2	Objetivos específicos .....	8
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1	Rejeito de minério de ferro .....	9
3.2	Coagulação e Floculação .....	12
3.3	Poliacrilamida .....	16
3.4	Amidos.....	19
3.5	Estudos Sobre a Utilização de Amido na Floculação de Efluentes .....	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.1	Caracterização da Amostra da Alimentação do Espessador de Lamas .....	33
4.2	Minerais Majoritários Puros .....	37
4.3	Reagentes .....	37
4.4	Ensaio de Agregação.....	38
4.5	Ensaio de Eletroforese.....	39
4.6	Ensaio de <i>Jar Test</i> .....	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	41
5.1	Caracterização da Amostra da Alimentação do Espessador de Lamas de Minério de Ferro	41
5.2	Caracterização dos Minerais Puros Utilizados nos Ensaio .....	46
5.3	Ensaio de Agregação.....	48
5.3.1	Ensaio de Agregação para Amostra de Hematita Pura .....	48
5.3.2	Ensaio de Agregação para Amostra de Quartzo Puro .....	50
5.3.3	Análise Geral dos Testes de Agregação dos Minerais Majoritários Puros.....	52
5.3.4	Ensaio de Agregação para Mistura Hematita e Quartzo .....	53
5.4	Medidas de Potencial Zeta.....	53
5.5	Ensaio de <i>Jar Test</i> .....	55
6	CONCLUSÕES .....	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61
	ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DOS CORPOS DE ÁGUA CONAMA 357/2005.....	67



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Mecanismo de floculação por formação de pontes.....	15
Figura 3.2: Reversão localizada de carga .....	16
Figura 3.3: Estrutura de monômeros de poliacrilamidas.....	17
Figura 3.4: Sedimentação de sólidos em função da concentração de polímero (A) e do pH da polpa (B).....	19
Figura 3.5: Estrutura da amilose (linear).....	20
Figura 3.6: Estrutura da amilopectina (ramificada).....	20
Figura 3.7: Estrutura da interação hematita-amido .....	23
Figura 3.8: Isotherma de adsorção do amido de milho sobre o quartzo (Q) e hematita (H) .....	24
Figura 3.9: Isotherma de adsorção do amido catiônico sobre o quartzo e hematita.....	25
Figura 3.10: Adsorção do amido de mandioca na goethita, quartzo e caulinita em pH 9. ....	26
Figura 3.11: Potencial zeta da goethita, quartzo, alumina e caulinita .....	26
Figura 3.12: Sedimentação da goethita (A) e caulinita (B) na presença de poliacrilamida, amido de mandioca e na ausência de ambos. ....	27
Figura 4.1: Fluxograma simplificado da etapa de deslamagem e espessamento de lammas da amostra de minério de ferro.....	33
Figura 4.2: Fluxograma da caracterização da amostra da alimentação do espessador de lammas de minério de ferro .....	34
Figura 4.3: Curva de sedimentação em proveta da amostra realizada em 60 minutos na presença do amido modificado de melhor desempenho e com a melhor dosagem.....	40
Figura 5.1: Distribuição granulométria da amostra da alimentação do espessador de lammas. .	41
Figura 5.2: Difratoograma da amostra da alimentação do espessador de lammas .....	43
Figura 5.3 Distribuição granulometria da amostra de hematita.....	46

Figura 5.4: Difratoograma da amostra de hematita .....	47
Figura 5.5: Distribuição granulometria da amostra de quartzo .....	47
Figura 5.6: Difratoograma do quartzo .....	48
Figura 5.7: Porcentagem de hematita sedimentada em função do pH da polpa sem reagente e com dosagem de 1mg/L dos reagentes testados .....	49
Figura 5.8: Porcentagem de hematita sedimentada em função do pH da polpa sem reagente e com dosagem de 10 mg/L dos amidos testados.....	49
Figura 5.9: Porcentagem de hematita sedimentada em função do pH da polpa sem reagente e com dosagem de 100 mg/L dos amidos testados.....	50
Figura 5.10: Porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa sem reagente e com dosagem de 1 mg/L dos amidos testados.....	51
Figura 5.11: Porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa sem reagente e com dosagem de 10 mg/L dos amidos testados.....	51
Figura 5.12: Porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa sem reagente e com dosagem de 100 mg/L dos amidos testados.....	52
Figura 5.13: Potencial zeta da hematita condicionada com eletrólito indiferente (NaNO <sub>3</sub> ) e hematita na presença de amido catiônico pré-gelatinizado. ....	54
Figura 5.14: Potencial zeta do quartzo condicionado com eletrólito indiferente (NaNO <sub>3</sub> ) e quartzo na presença de amido catiônico pré-gelatinizado. ....	55
Figura 5.15: Turbidez dos sobrenadantes dos ensaios de <i>Jar Test</i> utilizando o amido catiônico pré-gelatinizado com dosagem 10 e 50 mg/L e poliacrilamida com dosagem 1 mg/L. ....	56
Figura 5.16: Cor aparente dos sobrenadantes dos ensaios de <i>Jar Test</i> utilizando o amido catiônico pré-gelatinizado com dosagem 10 e 50 mg/L e poliacrilamida com dosagem 1 mg/L. ....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Relação de rejeitos de minérios de ferro de diferentes minas da VALE e algumas de suas características.....	10
Tabela 3.2: Classificação das partículas do esgoto por faixa de tamanho.....	12
Tabela 3.3: Composição de diferentes amidos .....	21
Tabela 3.4: Características das amostras empregadas nos ensaios de floculação. ....	28
Tabela 3.5: Desempenho de diferentes tipos de amido na floculação seletiva.....	30
Tabela 3.6: Resultado de flotação em bancada utilizando amidos como depressores .....	31
Tabela 5.1: Dados granulométricos da amostra de lama de minério de ferro .....	41
Tabela 5.2: Análise química da fração sólidos da amostra de lama de minério de ferro .....	42
Tabela 5.3: Análise química da fração líquida filtrada da amostra de lama de minério de ferro .....	42
Tabela 5.4: Parâmetros de qualidade da amostra .....	44
Tabela 5.5: Teste de agregação da mistura hematita-quartzo.....	53
Tabela 5.6: Comparação dos valores de turbidez (NTU) encontrados com a CONAMA 357/2015 Classe II.....	58

## 1 INTRODUÇÃO

O desaguamento de rejeitos de minérios de ferro é uma parte importante do processamento mineral devido a necessidade de recuperação e retenção adequada dos rejeitos, e a necessidade de recuperação da água para que este recurso hídrico não seja descartado como efluente líquido.

Entende-se como efluente líquido, um produto (frequentemente um rejeito) que se dispõe em um ambiente aquoso oriundo de um processo industrial ou resultante dos esgotos domésticos urbanos, que são lançados no meio ambiente (AGI, 1997; REIS, 2017). O descarte de efluentes é regulamentado pela resolução CONAMA 430 (BRASIL, 2011) que dispõe as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementando e alterando a Resolução CONAMA 357 (BRASIL, 2005) que classifica os corpos de água e fornece diretrizes ambientais para o seu enquadramento.

A alternativa para a diminuição de descarte de efluente empregada nas usinas de beneficiamento de minério de ferro é a reutilização do *overflow* dos espessadores de rejeito como água de processo nas usinas de tratamento, o que favorece a diminuição da captação de água nova e dos custos com suas outorgas. Porém, algumas etapas de tratamento mineral, como a flotação, são altamente sensíveis a mudanças físico-químicas do processo tendo como consequência a necessidade da adequação da água recuperada utilizada nos processos de beneficiamento de minérios. Simultaneamente, um *underflow* com alta porcentagem de sólidos e baixa retenção de água favorece a diminuição de material descartado em barragem de rejeitos, necessitando de uma menor área requerida para a mesma.

No cenário atual da mineração, o grau de liberação dos minerais de interesse se encontra em granulometrias finas fazendo com que a sedimentação das partículas suspensas, e por consequência a obtenção de uma qualidade de água e de um rejeito adensado ótimos, se torne um desafio. Por esse motivo, a floculação de rejeitos de minérios de ferro é uma etapa crítica para a eficiência da separação sólido/líquido nas plantas industriais. Porém, os reagentes atualmente utilizados neste processo possuem alto custo e potencial tóxico para o meio ambiente e consumo humano, tendo o uso proibido em alguns países. A acrilamida, monômero da fabricação da poliacrilamida (polímero sintético utilizado como floculante), tem toxidez e caráter carcinogênico comprovado (GALEŠA *et al.*, 2008). Por isso, existe

crescente interesse em substituir os polieletrólitos sintéticos por alternativas naturais e sustentáveis.

O uso do amido, um polímero natural, surge então como uma alternativa devido as suas características biodegradáveis, bom desempenho, versatilidade, abundância e baixo custo. Alguns estudos, em especial Di Bernardo (2000), já observam a possibilidade de utilizar amido como floculantes naturais para o tratamento de efluentes e recuperação de águas. O amido já é usado amplamente no processamento mineral principalmente como depressor na flotação e também como floculante, em especial na floculação seletiva (WEISSENBORN, WARREN & DUNN, 1995).

Logo este trabalho propõe estudar a utilização de amidos modificados como floculantes. O uso de reagentes naturais modificados visa diminuir ou até mesmo substituir o uso da poliacrilamida como floculante na etapa de espessamento de rejeitos de lama de minério de ferro.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a utilização dos reagentes naturais modificados (amido catiônico pré-gelatinizado, amido catiônico reticulado e amido ceroso) como agentes de floculação no tratamento de lama de rejeito de minério de ferro, oriunda da etapa de deslamagem, visando uma alternativa eficaz, sustentável, menos tóxica e de menor custo quando comparada com o uso de polímeros sintéticos.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar a amostra da alimentação do espessador de lamas oriunda da etapa de deslamagem de minério de ferro;
- Realizar estudos fundamentais de agregação utilizando os amidos modificados para as espécies minerais majoritárias identificadas na caracterização da amostra;
- Otimizar a dosagem, o tempo de agitação e o tempo de sedimentação com o reagente mais eficiente a partir de ensaios via *Jar Test* para a amostra.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Rejeito de minério de ferro**

O ferro é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre e é de suma importância para a produção e consumo de aço. O aumento da demanda de aço e, por consequência, de ferro no mundo acelera a geração de resíduos pelas indústrias siderúrgica e mineradora, constituindo um problema ambiental devido às grandes áreas requeridas para disposição dos mesmos (BEZERRA, 2017). O Brasil atualmente está entre os maiores países produtores e exportadores de minério de ferro, possuindo uma das maiores reservas de ferro do mundo. Em 2017, foram exportadas 383,5 milhões de toneladas de minério de ferro, sendo o principal produto mineral exportado pelo Brasil (IBRAM, 2018).

Os minerais mais relevantes para a mineração que contêm ferro são a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), porém sua ocorrência está normalmente ligada a outros minerais que são compostos por espécies consideradas impurezas como: sílica, alumina, compostos de enxofre, fósforo, entre outros. Por esse motivo, técnicas de beneficiamento mineral podem ser empregadas ao minério extraído para que haja a adequação de sua granulometria e teor, de acordo com a necessidade do mercado. O processamento mineral normalmente abrange as etapas de fragmentação, classificação, concentração e separação sólido/líquido.

O rejeito é então todo o material gerado pelo processamento mineral que não possui valor econômico devido as suas impurezas ou a sua granulometria, devido à falta de tecnologia ou inviabilidade econômica do emprego das existentes para a concentração desse tipo de material.

As características de um rejeito de minério de ferro podem variar de acordo com a mineralogia do local onde se encontra cada mina e do método de beneficiamento. Para plantas de beneficiamento a úmido que possuem processos como deslamagem, separação magnética e flotação é esperado, de forma geral, que os rejeitos possuam granulometria fina e ultrafina. De acordo com a classificação de Somasundaran (1980), partículas finas possuem granulometria menor que 100  $\mu\text{m}$  e maior que 10  $\mu\text{m}$ , enquanto ultrafinas são menores que 10  $\mu\text{m}$  e maiores que 1  $\mu\text{m}$ . Partículas menores que 1  $\mu\text{m}$  são denominadas partículas coloidais.

Wolf (2009) caracterizou rejeitos de minério de ferro oriundos de sete minas da VALE como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Relação de rejeitos de minérios de ferro de diferentes minas da VALE e algumas de suas características.

<b>Minas</b>	<b>Origem da Amostra</b>	<b>Diâmetro passante acumulado em 80% (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Fases Mineralógicas</b>
<b>Brucutu</b>	<i>Underflow</i> do espessador de rejeitos	17	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Muscovita, Gibbsita
<b>Córrego de Feijão</b>	<i>Overflow</i> da deslamagem	10	Hematita, Goethita, Magnetita, Caulinita, Quartzo, Talco
	<i>Overflow</i> de ciclone + rejeito de separação magnética	24	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Talco, Gibbsita, Muscovita
<b>Conceição</b>	<i>Underflow</i> do espessador de rejeitos	27	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Talco, Muscovita
<b>Cauê</b>	<i>Underflow</i> do espessador de rejeitos	25	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Talco, Gibbsita, Muscovita
<b>Fábrica Nova</b>	<i>Underflow</i> do espessador de rejeitos	14	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Gibbsita, Muscovita
<b>Alegria Instalação de Beneficiamento 2</b>	<i>Underflow</i> do espessador	14	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Gibbsita, Muscovita
<b>e Instalação de Beneficiamento 3</b>	<i>Underflow</i> do espessador	17	Hematita, Goethita, Caulinita, Quartzo, Gibbsita, Muscovita

Fonte: adaptado de WOLF (2009)

Conforme Wolf (2009) o diâmetro passante acumulado em 80% ( $D_{(80)}$ ) para todas as amostras encontravam-se em frações granulométricas ultrafinas variando de 10 a 27  $\mu\text{m}$ . Os resultados da mineralogia mostraram presença do ferro (44% a 64%) nas formas de hematita, goethita e magnetita. Outros minerais presentes foram o quartzo, caulinita, gibbsita, talco e moscovita.



Outro estudo que concorda com esses resultados é o de Bezerra (2017), que caracterizou a lama de rejeito de minério de ferro proveniente da etapa de deslamagem da mina de Conceição II/VALE localizada no complexo ferrífero de Itabira. Cerca de 90% dessa lama encontrava-se em granulometria menor que 35,6  $\mu\text{m}$  e sua análise química apresentava altos teores de ferro (50,96%) e sílica (35,96%), seguido por alumina (7,92%). Resultados de difração de raios X indicaram que a amostra era principalmente constituída de hematita (50,6%), quartzo (31,5%), caulinita (9,5%) e goethita (4,2%).

Gomes, Pereira e Peres (2011), ao caracterizarem amostras provenientes de furos de sondagem em uma barragem de rejeito de minério de ferro da mina de Córrego do Feijão, determinaram teores médios de 48,08% de ferro, 20,58% de sílica e 3,16% de alumina. Os principais minerais de ferro identificados foram hematita, martita, magnetita e goethita e os de ganga foram quartzo, gibbsita e caulinita.

Li *et al.* (2010) caracterizaram um rejeito proveniente de uma mina na província de Liaoning (China), observou-se uma composição química de  $\text{SiO}_2$  (57,39%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (24,82%),  $\text{CaO}$  (8,85%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (7,42%), majoritariamente. As fases minerais existentes eram quartzo, hematita, calcita, mica e caulinita.

Das, Kumar e Ramachandrarao (2000) caracterizaram amostras retiradas de cinco pontos de coletas diferentes de uma barragem de rejeitos da Índia, obtiveram uma mistura final com 51,12% de  $\text{SiO}_2$ , 44,36% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 1,22% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 0,22% de  $\text{CaO}$ . Sua composição mineralógica era majoritariamente composta de quartzo, hematita e caulinita.

De acordo com Dash *et al.* (2011), as partículas dos rejeitos de minério de ferro são consideradas ultrafinas com tamanhos variando entre 1 a 45  $\mu\text{m}$  com um  $D_{50}$  de 7  $\mu\text{m}$ . Em média os rejeitos possuem 50 a 50% (p/p) de ferro e um percentual de sólidos variando de 5 a 10% (p/p). O beneficiamento de minério de ferro necessita por volta de 300 a 500 litros por tonelada de minério processado. Ao caracterizarem um rejeito de minério de ferro das minas de Rungta na Índia, os autores obtiveram um material com  $D_{80}$  de 12  $\mu\text{m}$ . A análise química mostrou uma amostra composta majoritariamente por Fe (40%),  $\text{SiO}_2$  (18%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14%) com presença de hematita, goethita, quartzo e caulinita.

Os rejeitos das usinas de beneficiamento a úmido são considerados efluentes líquidos, mesmo podendo conter grande porcentagem de sólidos. No beneficiamento de minérios a úmido, o efluente líquido gerado é proveniente em sua maior parte da etapa de espessamento e

filtragem que tem como objetivo a adequação do mesmo para seu descarte. O espessamento, por ser economicamente mais viável, é a técnica mais empregada nas plantas de beneficiamento de minério de ferro para adensamento de rejeito. O objetivo é adensar o material alimentado (de 5 a 10% de sólidos) gerando um *underflow* entre 50% a 75% de sólidos para que esse possa ser descartado, e um *overflow* que possa ser utilizado como água de recirculação (CHAVES, 2010; DASH *et al.*, 2011). A sedimentação do material pode ser auxiliado com o uso de coagulantes e floculantes, que atualmente são muito utilizados no espessamento de rejeito de minério de ferro devido à dificuldade de sedimentar as partículas muito finas em suspensão presentes nos rejeitos do processamento desse mineral.

### 3.2 Coagulação e Floculação

Sabe-se que o tamanho das partículas interfere diretamente na maior parte dos processos de processamento mineral e tratamento de efluente, em especial nas frações mais finas. Na mineração, tende-se a empregar a denominação fina para partículas menores que 100 $\mu\text{m}$  e ultrafina para partículas menores que 10 $\mu\text{m}$ . No tratamento de esgoto, Rudolfs e Balmat (1952, *apud* Lopes, 2011) evidenciam as principais denominações utilizadas, como mostra a Tabela 3.2, de acordo com sua faixa granulométrica.

Tabela 3.2: Classificação das partículas do esgoto por faixa de tamanho

Faixa de tamanho das partículas	Rudolfs e Balmat (1952)	APHA/AWWA/WEF (1998)
< 0,001 $\mu\text{m}$	Solúveis	Dissolvidos
0,001 $\mu\text{m}$ a 1 $\mu\text{m}$	Coloidais	
1 $\mu\text{m}$ a 100 $\mu\text{m}$	Supra-Coloidais	Suspensos
> 100 $\mu\text{m}$	Sedimentáveis	

Fonte: LOPES (2011)

Devido a outras propriedades específicas dos sólidos particulados, além do tamanho das partículas, como área superficial e carga superficial, a sedimentação natural dos mesmos se torna um desafio para a etapa de espessamento nas plantas de beneficiamento de minério de ferro. Por esse motivo, métodos de aglomeração como coagulação e floculação são utilizados para possibilitar ou otimizar o abatimento do material.

A coagulação é a desestabilização de uma suspensão coloidal. Esta é obtida principalmente com a adição de sais inorgânicos que se dissociam em solução aquosa, alterando a carga

superficial das partículas, reduzindo a repulsão entre as mesmas e promovendo a adsorção específica de íons. As partículas suspensas e coloidais podem ser desestabilizadas de três formas distintas (BRATBY, 2006; DI BERNARDO, 2000; LUZ, SAMPAIO & FRANÇA, 2010; GOODWIN, 2004; PENNA 2009):

- I. Compressão da dupla camada elétrica: A camada de Stern, ou dupla camada elétrica, é a região de íons negativos e positivos resultante da aproximação dos íons de carga oposta à superfície das partículas coloidais dispersas na água, decorrente das forças de repulsão eletrostática e de atração de van der Waals. A compressão da dupla camada elétrica envolve a adição de eletrólitos ao sistema. Com o aumento da concentração iônica, a dupla camada é comprimida e a energia de repulsão diminui eliminando a barreira energética, o que possibilita a aglomeração de partículas.
- II. Adsorção e neutralização de cargas: espécies químicas de carga contrária à da superfície da partícula que se adsorvem na mesma, resultando em interações como: ligação de hidrogênio, reações de coordenação, ligações covalente e reações de troca iônica.
- III. Varredura: Devido a uma alta dosagem de coagulante, pode haver a precipitação de sais hidrolisados (sais de ferro e alumínio em geral) ocasionando a sedimentação das partículas coloidais, uma vez que a essas se tornam um núcleo de condensação para esses precipitados.

A coagulação é conseguida com a adição de eletrólitos inorgânicos multivalentes, ainda que alguns polímeros sintéticos com baixo peso molecular ( $2 \times 10^4$  a  $1 \times 10^5$  g/mol), geralmente catiônicos, são citados como coagulantes (ATTIA, 1992; GREGORY, 1978; HOGG, 2000; RAMACHANDRAN & SOMASUNDARAN, 1988; RICHSTFDON & CONNELLY, 1988). A rigor, a ação desses reagentes, apesar de estar relacionada a uma neutralização da carga elétrica da superfície mineral, representa um mecanismo de floculação por reversão localizada de carga

A dosagem de coagulante e o pH são fatores importantes para que haja a coagulação ótima das partículas. Idealmente, as melhores chances de uma coagulação ótima ocorrem no ponto isoelétrico, ou seja, quando o potencial zeta for zero. O potencial zeta é o potencial eletrocinético no plano de cisalhamento, podendo ser determinado pela medida da mobilidade das partículas coloidais através de uma célula, e pode fornecer informações sobre o grau de estabilidade de um sistema coloidal. O potencial zeta possibilita a compreensão do tipo de

adsorção que ocorre e a melhor faixa de pH a ser utilizada para cada sistema coloidal e reagente que, juntamente com a dosagem, são pontos importantes a serem observados quando se fala de agregação de partículas por meio de coagulação.

De acordo com Penna (2009), a característica fundamental para um coagulante é sua capacidade de produzir precipitados e espécies hidrolisadas capazes de desestabilizar ou envolver as partículas presentes no sistema. Os principais coagulantes derivam de sais de íon de sulfato, ferro ou alumínio. O sulfato de alumínio é um dos coagulantes mais utilizados, porém, dependendo de sua dosagem, pode ser tóxico para o consumo humano sendo associado a causas do mal de Parkinson e Alzheimer (BAUMGARTEN, 2001, *apud* FIORENTINI, 2005).

A floculação é a agregação de partículas desestabilizadas através do uso de polímeros solúveis em água, formando “flocos” com tamanho e massa específica que proporcione a sedimentação do material. A floculação depende de diversas variáveis como as características do floculante, pH, tamanho das partículas, dosagem e gradiente de velocidade, o que torna a escolha correta do floculante e sua forma de aplicação fatores decisivos na viabilidade da sedimentação.

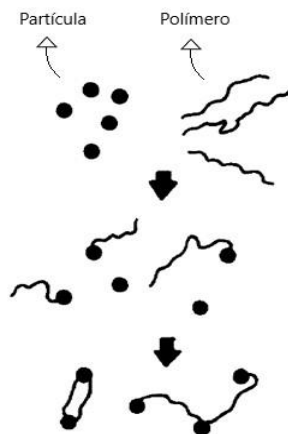
A adequação da alcalinidade e acidez do meio é necessária uma vez que o pH influencia diretamente na interação dos floculantes iônicos com a superfície carregada positivamente ou negativamente dos minerais. O potencial zeta, como dito anteriormente, proporciona as faixas de pH para quando a superfície das partículas possui cargas negativas ou positivas. O tamanho das partículas irá influenciar a área superficial total e na capacidade de formação de flocos. A dosagem correta também é crucial para uma floculação eficiente já que a utilização de pouco reagente pode significar que não haverá ligações suficientes entre reagente-partícula, não ocorrendo assim a sedimentação do material. Por outro lado, uma superdosagem pode proporcionar o recobrimento total da superfície do mineral pelo floculante resultando na repulsão das partículas ao invés de sua agregação.

Um gradiente de velocidade ótimo deve ser obtido pois uma rápida velocidade de sedimentação é necessária inicialmente para o maior contato das partículas desestabilizadas com o reagente, porém para que não ocorra a ruptura dos “flocos” é desejado então que essa velocidade seja mais lenta com o decorrer da sedimentação. Para a análise das dosagens e gradiente de velocidade ótimos, normalmente é empregado ensaios em *Jar Test*.

Os flocculantes podem ter diferentes características que aumentam sua versatilidade e eficiência, entre elas estão sua carga iônica, seu peso molecular, a extensão de sua cadeias poliméricas, sua natureza orgânica ou sintética, entre outras. Os principais flocculantes utilizados atualmente são os orgânicos sintéticos, baseados em vários monômeros como acrilamida, ácido acrílico, cloreto de dialildimetilamônio (DADMAC), ácido estireno sulfônico, etc, e os orgânicos naturais como amido, celulose, gomas naturais, mucilagens, entre outros (SHARMA, DHULDHOYA & MERCHANT, 2006).

Os mecanismos de adsorção do flocculante na superfície mineral variam entre ligações de hidrogênio, ligações químicas (covalentes ou iônicas), ligações coordenadas, interações hidrofóbicas e interações eletrostáticas. Os principais mecanismos de floculação são (BRATBY, 2006; LUZ, SAMPAIO & FRANÇA, 2010):

- I. Formação de Pontes (Figura 3.1): prevalecem para sistemas com o uso de polímeros não-iônicos ou de mesma carga que a superfície mineral. A formação de ponte ocorre quando as partículas coloidais são adsorvidas na superfície das diversas cadeias dos polímeros ocasionando um entrelaçamento das mesmas, aumentando a densidade do aglomerado e possibilitando sua sedimentação. O peso molecular e o comprimento da



cadeia do polímero influenciam diretamente na nesse mecanismo.

Figura 3.1: Mecanismo de floculação por formação de pontes  
Fonte: adaptado de ORUMWENSE (1994)

- II. Reversão Localizada de Carga: o polímero de alta densidade de carga interage com a uma superfície da partícula que possui baixa densidade de carga, revertendo a carga elétrica na área revestida pelo reagente. A formação de flocos ocorre a partir da atração da região com carga revertida com uma partícula de carga oposta.

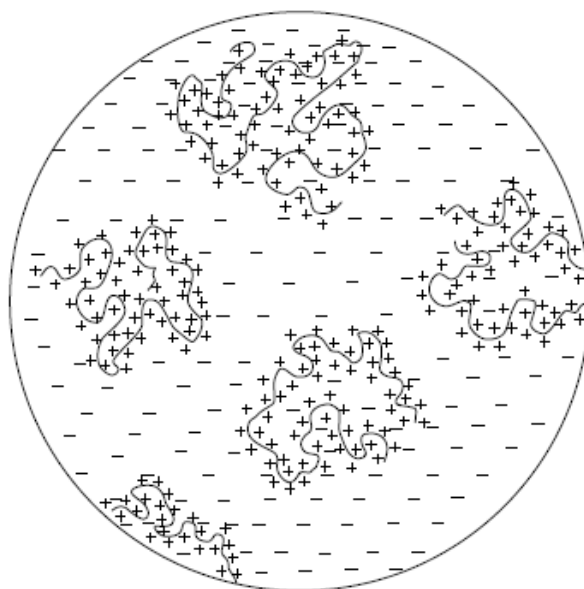


Figura 3.2: Reversão localizada de carga

Fonte: BRATBY (2006)

- III. Neutralização de Cargas: redução da repulsão eletrostática entre as partículas devido a neutralização de cargas realizada pelo polímero.

### 3.3 Poliacrilamida

Os polímeros são uma variedade de compostos naturais ou sintéticos cujas moléculas são unidas por repetições de ligações covalentes (CANEVAROLO JUNIOR, 2002; EBEWELE, 2000; NGAKFUMBE, 2013). A principal característica dos polímeros que determinam o uso como coagulante ou floculante é seu peso molecular e densidade de carga.

Os polímeros sintéticos podem ser aniônicos, catiônicos e não-iônicos (Figura 3.3). Por serem desenvolvidos em laboratório, possuem como vantagens a possibilidade da manipulação de sua estrutura, podendo ser manipulados a modo conseguir melhor eficiência e uma composição definida fornecendo maior estabilidade química.

A poliacrilamida é obtida a partir da polimerização da acrilamida e apesar de serem utilizadas nominalmente como não-iônicos, industrialmente são parcialmente hidrolisadas com ácido

acrílico ao longo da sua cadeia principal, concedendo as essas macromoléculas um caráter aniônico (ARINAITWE & PAWLIK, 2013) ou podem possuir caráter catiônico devido a copolimerização da acrilamida com um monômero catiônico (OLIVEIRA, 2016).

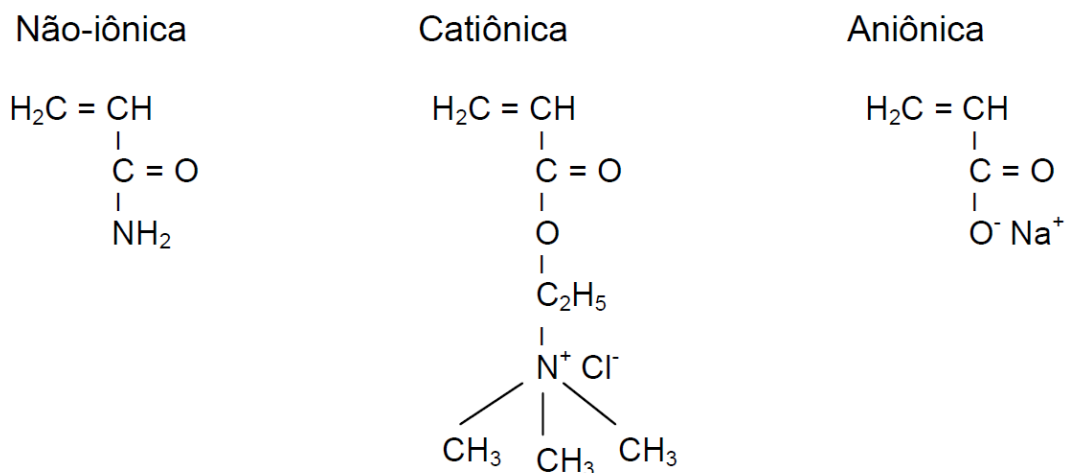


Figura 3.3: Estrutura de monômeros de poliacrilamidas

Fonte: TURRER (2007)

De acordo com Jin, Hu e Hou (1987), as poliacrilamidas adsorvem-se fortemente na hematita através da formação de ligações químicas, enquanto se adsorvem na superfície do quartzo por pontes de hidrogênio e forças de London-van der Waals. Para Somasundaran (1980) “o mecanismo eletrostático tende a predominar em poliacrilamidas com grande número de unidades iônicas. As ligações de hidrogênio se formam pela presença de grupos  $\text{NH}_2$  e  $\text{OH}$  nas moléculas de poliacrilamida”. A adsorção de poliacrilamida na superfície da hematita é maior com o aumento do pH da solução, do peso molecular e da concentração do polímero (CHIBOWSKI & WIŚNIEWSKA, 2002).

Visando entender melhor as interações superficiais minerais, a adsorção dos flocculantes e outros fatores básicos do processo de floculação por polímeros de cadeia longa, Khangaonkar e Bala Subramani (1993), examinaram o sistema hematita-poliacrilamidas aniônica. Observaram-se bons resultados na floculação de finos de hematita ( $-32 \mu\text{m}$ ) em condições ácidas, tendo sua eficiência reduzida a partir de pH 8, porém a adição de cloreto de cálcio melhorou a floculação significativamente na faixa alcalina. A determinação do potencial zeta indicou uma adsorção específica dos polímeros. Os autores discorrem sobre como a dissociação dos íons carboxila é favorecida com o aumento do pH, condição contrária aos resultados encontrados no trabalho. Esse fato sugere que as pontes de hidrogênio ocorreram possivelmente através de espécies de oxigênio de superfície sobre as quais os grupos doadores

de hidrogênio foram anexados, ao invés de grupos OH. Para o polímero em meio ácido, esses grupos seriam -COOH e -CO-NH<sub>2</sub>, sendo a ligação de hidrogênio do primeiro mais forte devido à maior eletronegatividade dos átomos de oxigênio.

Somasundaran e Lee (1981) estudaram a interação da poliacrilamida com o quartzo na flotação do quartzo com granulometria entre 0,6 mm e 0,2 mm. Concluíram que a poliacrilamida não-iônica e aniônica aumentam um pouco a flotabilidade do mineral em estudo devido à tomada de moléculas de água para hidratação do polímero e consequente aumento efetivo da concentração do surfactante. A não-iônica necessita de alta dosagem de reagentes enquanto a aniônica apresenta melhor resultado devido à sua tendência de hidratação. A poliacrilamida catiônica deprime o quartzo devido competitividade do polímero e da amina com os sítios negativos na superfície do mineral.

Weissenborn, Warren e Dunn (1994) estudaram o desempenho de diferentes poliacrilamidas na floculação seletiva de minério de ferro ultrafino (D<sub>90</sub> de 13,8 µm). Os testes foram realizados em pH 10,5 e as suspensões foram preparadas com 10 gramas de minério de ferro ultrafino (46,6% de ferro) e água deionizada, com uma densidade de polpa de 5% p/v. Foi utilizado dispersante (STPP) e diferentes poliacrilamidas em uma concentração de 20 mgL<sup>-1</sup> e 0,5 mgL<sup>-1</sup>, respectivamente. As poliacrilamidas que apresentaram bons resultados foram as com caráter aniônico intermediário (15 a 75% acrilato), em especial a Maxfloc 4975 (75% acrilato) com o melhor desempenho para teor de ferro (51,8%) e recuperação (32%).

Entretanto, além de seu alto custo, a acrilamida possui toxicidade por ser uma neurotoxina cumulativa que além de produzir severos efeitos neurotóxicos, possui também carcinogenicidade comprovada que afeta particularmente a tireoide, as glândulas suprarrenais, o escroto e cavidade oral (BRATBY, 2006; GALEŠA *et al.*, 2008). Por esse motivo, polímeros naturais, como o amido, se tornam uma alternativa não-tóxica e biodegradável para esse problema além de poderem ter melhor desempenho do que a poliacrilamida como mostra a Figura 3.4.



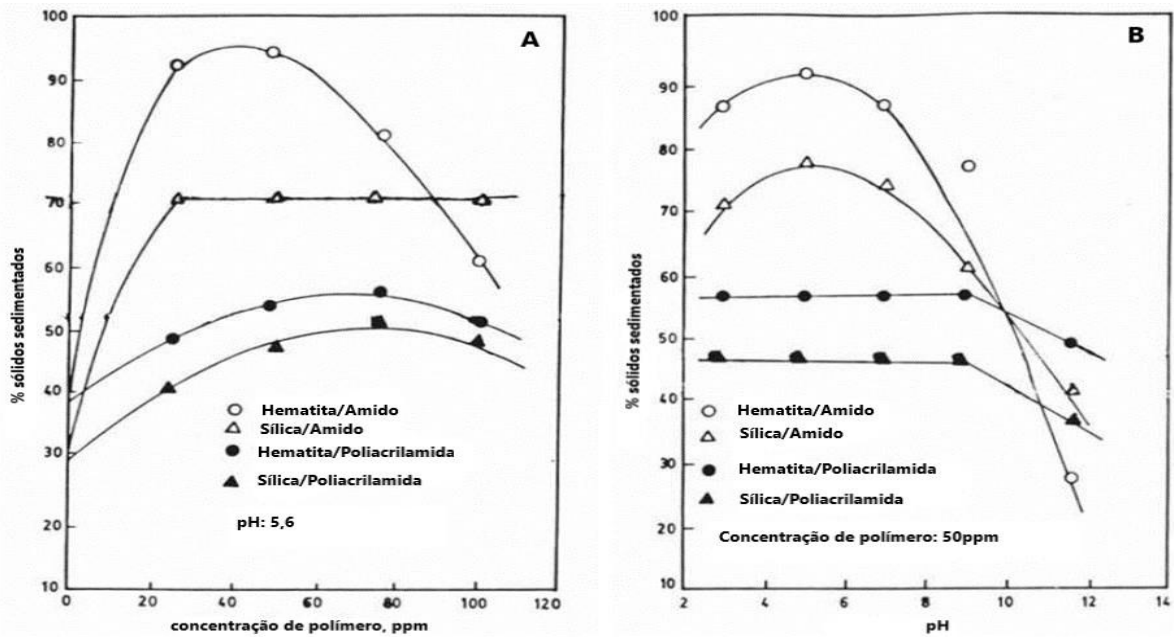


Figura 3.4: Sedimentação de sólidos em função da concentração de polímero (A) e do pH da polpa (B)

Fonte: adaptado de ORUMWENSE & NWACHUKWU (2000)

A Figura 3.4 mostra os resultados obtidos em um trabalho realizado por Orumwense e Nwachukwu (2000) tendo como objetivo a análise do comportamento dispersão-floculação da poliacrilamida e do amido de mandioca caustificado para suspensões de hematita e quartzo, separadamente, com granulometria para ambos menor que 38  $\mu\text{m}$ . É possível observar que em pH 5,6, o amido é mais eficiente que a poliacrilamida na sedimentação dos sólidos em qualquer concentração (A), e a concentração ótima de amido está na faixa de 20 a 40 ppm. Nota-se também que o amido continua mais eficiente apesar de sua porcentagem de sedimentação decrescer drasticamente a partir do pH 5 (B).

### 3.4 Amidos

O amido pode ser considerado como uma condensação polimérica da glucose. A abundância de grupos hidroxílicos nas moléculas de amido fornece ao mesmo características hidrofílicas, o que faz com que o polímero estabeleça ligações de hidrogênio com a água. Podem ser divididos em três grupos principais. O primeiro grupo engloba os tubérculos (batata, cará e inhame), as raízes (mandioca e batata doce) e o cerne (sagú). O segundo inclui os cereais comuns (milho, trigo, sorgo e arroz) e o terceiro, os amidos cerosos (milho, sorgo e arroz) (MARINELLI *et al.*, 2000).

As maiores fontes comerciais de amido são o milho, a batata, a mandioca e o trigo. Os principais mercados de consumo do amido são as indústrias de alimentos, de bebidas, químicas e farmacêuticas, de papel, têxtil e adesivos. Os derivados de amido também são largamente usados na produção de alimentos, papel, tecidos, adesivos e medicamentos.

Estruturalmente, o amido é um homopolissacarídeo composto por cadeias de amilose e amilopectina (Figura 3.5 e Figura 3.6). A amilose é formada por unidades de glicose unidas por ligações glicosídicas  $\alpha$ -1,4, originando uma cadeia linear. Já a amilopectina é formada por unidades de glicose unidas em  $\alpha$ -1,4 e  $\alpha$ -1,6, formando uma estrutura ramificada. (DENARDIN & SILVA, 2009). A amilose é solúvel em água e é totalmente hidrolisada pela ação da  $\beta$ -amilase. A amilopectina é insolúvel na água e é hidrolisada apenas 54% sob ação da  $\beta$ -amilase (DI BERNARDO, 2000).

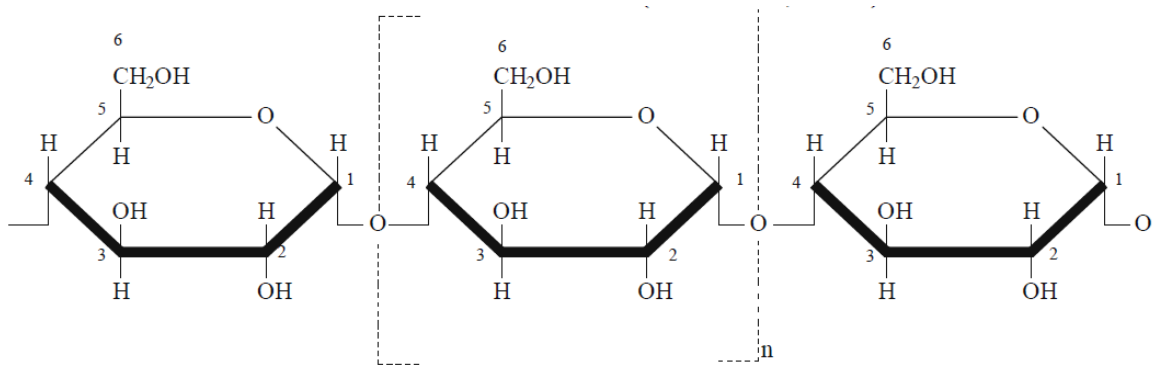


Figura 3.5: Estrutura da amilose (linear)

Fonte: MARINELLI (1999), *apud* MARINELLI *et al.* (2000)

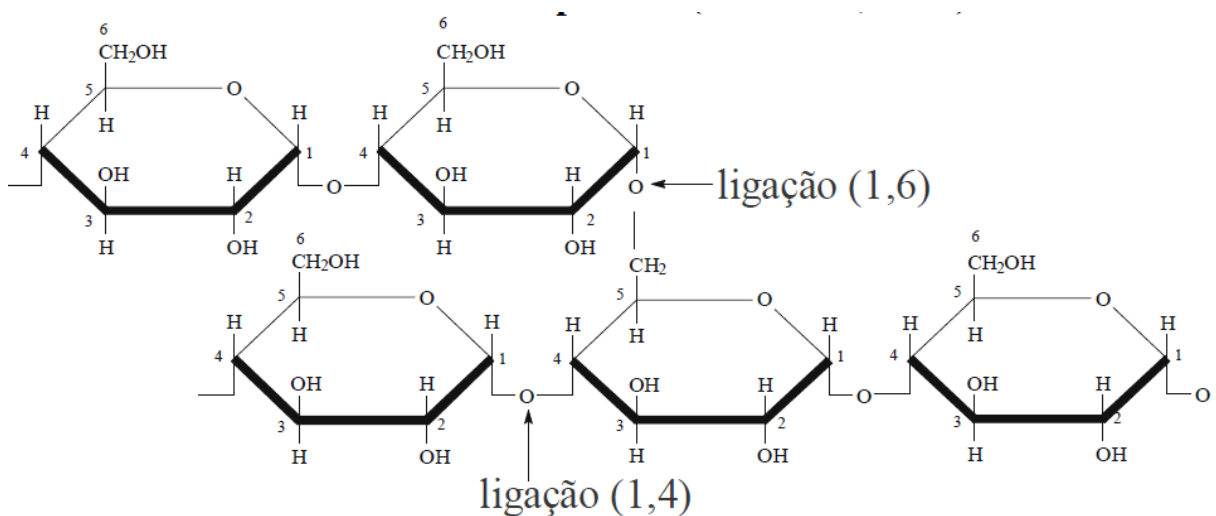


Figura 3.6: Estrutura da amilopectina (ramificada)

Fonte: MARINELLI (1999), *apud* MARINELLI *et al.* (2000)

Weissenborn (1996) realizou testes de floculação e adsorção para estudar o comportamento da amilopectina e amilose na floculação seletiva de minério de ferro. Para os testes de floculação, foi utilizado uma amostra majoritariamente composta de hematita (53,2%), goethita (14,8%), caulinita (21,3%) e sílica (5%), com um  $D_{90}$  menor que 13,8  $\mu\text{m}$ . Óxido de ferro(III) com pureza de 99% e  $D_{90}$  de 18,3  $\mu\text{m}$  foi utilizado para os testes de adsorção e alguns testes de floculação. Observou-se que a amilopectina pura foi capaz de flocular tanto a amostra de minério de ferro quanto o óxido de ferro puro. A capacidade de floculação foi atribuída a ela devido ao seu maior peso molecular e sua estrutura ramificada. A amilose pura não foi capaz de flocular nenhuma das duas amostras. Porém, ao ser adicionada junto a amilopectina foi possível notar o aumento da floculação da hematita em relação ao restante da amostra, motivo pelo qual atribui-se a amilose o seu caráter seletivo.

As proporções em que estas estruturas aparecem diferem entre as diversas fontes, entre variedades de uma mesma espécie e, ainda, em uma mesma variedade, de acordo com o grau de maturação da planta. A Tabela 3.3 mostra a porcentagem de amilose e amilopectina para algumas fontes do amido além de suas composições química.

Tabela 3.3: Composição de diferentes amidos

<b>Nome Popular</b>	<b>Amilopectina (%)</b>	<b>Amilose (%)</b>	<b>Amido Total (%)</b>	<b>Açúcar Total (%)</b>	<b>Fibras (%)</b>	<b>Proteína (%)</b>	<b>Matéria Graxa (%)</b>	<b>Cinzas (%)</b>
Araruta	80	20	82	2,4	3,7	5,8	0,2	1,5
Inhame	93	7	78	1,3	1,2	8,2	0,1	1,1
Batata doce	82	18	83	4,6	2,4	1,9	0,4	1,3
Mandioca	80	18	82,5	2,2	2,7	2,6	0,3	2,4
Taro	93	7	83	2,6	2,2	2,3	0,5	1,2
Batata baroa	82	18	83	4,5	2,8	3,9	0,3	0,2
Banana Caturra	80	20	83	1,7	2	2,8	0,3	1,1
Milho	75	25	80	0,7	4	8,9	0,8	0,4
Milho Ceroso	95	5	95	1	0,5	0	0	1

Fonte: adaptado de CEREDA (2001)

Em água fria, o amido é insolúvel, porém quando aquecidas a vibração das moléculas faz com que haja a quebra das pontes de hidrogênio intramoleculares. Este processo permite a entrada de água que promove a gelatinização do amido, onde o grânulo intumescce e a viscosidade aumenta (QUIROGA, 2015).

Há aplicações dos amidos em tratamento de água como floculantes no tratamento mineral como depressor na flotação e agente de floculação ou floculação seletiva. O amido também é

utilizado na indústria farmacêutica, têxtil e de produção de papel. Para atender às diferentes necessidades e aplicações do amido, este pode ser modificado fisicamente, quimicamente ou por hidrólise e biotecnologias.

O amido pode ser modificado quimicamente através de métodos como a esterificação, oxidação, reticulação e cationização. Obtêm-se a modificação química a partir da “introdução de grupos funcionais na molécula de amido sem afetar a morfologia ou a distribuição de tamanho dos grânulos” (ALCÁZAR-ALAY & MEIRELES, 2015) gerando uma possível melhora na gelatinização e retrogradação do amido. Os amidos catiônicos são obtidos quando o amido é introduzido à grupos terciário ou quaternário de amônio, imino, amino, sulfúrico ou fosfato (ALCÁZAR-ALAY & MEIRELES, 2015; DI BERNARDO, 2000; XIE, LIU & CUI, 2005).

Nos polímeros reticulados - quando suas hidroxilas reagem com compostos polifuncionais - as cadeias estão unidas covalentemente o que forma uma rede tridimensional. Essa união pode ocorrer entre hidroxilas da mesma molécula de amido, duas ou mais moléculas ou entre diferentes polissacarídeos (IURCKEVICZ, 2014). O amido reticulado possui maior peso molecular, motivo com qual Coelho *et al.* (2010) justificam o menor tempo para floculação utilizando o amido catiônico reticulado quando comparado a um amido catiônico, em um teste de separação papel-água.

A modificação física do amido, que pode melhorar a solubilidade em água e alterar o tamanho da partícula, é simples, barata e segura. Para obter essa modificação os grânulos de amido são submetidos à diferentes temperaturas, pressões, irradiação ou atrição mecânica. As principais modificações físicas são a pré-gelatinização, tratamento humidade-calor, anelamento e extrusão.

Pré-gelatinização consiste no cozimento do amido para sua gelatinização e consequente secagem do mesmo. A secagem pode ser realizada via secagem por tambor, secagem por pulverização, processo via solvente ou extrusão. Esse método aumenta a capacidade de intumescimento e solubilidade do amido em água fria apesar de uma certa dificuldade em dispersar homoganeamente o produto muito fino em água devido sua rápida hidratação (ALCÁZAR-ALAY & MEIRELES, 2015; XIE, LIU & CUI, 2005). Desta forma, não é necessário o aquecimento ou utilização de reagentes como hidróxido de sódio (NaOH) para a gelatinização do mesmo, apenas uma agitação mecânica eficiente.

A araruta (*Maranta arundinacea*) é uma planta encontrada na América Latina, do grupo dos tubérculos, com rizomas de tamanho entre 10 e 25cm. Seus três principais cultivares são a creoula, a banana e a comum, sendo que esta última produz fécula de melhor qualidade. Apesar de pouco cultivada no Brasil, vem despertando interesse das indústrias nacionais produtoras de amido devido as suas propriedades (LEONEL, CEREDA & SARMENTO, 2002). Como visto na Tabela 3.3, o amido de araruta é composto em média de 80% de amilopectina e 20% de amilose.

O cará (*Dioscorea alata*) é uma variedade do inhame (*Dioscorea spp.*) e ambos tubérculos, juntamente com o taro (*Colocasia esculenta (L.) Schott*), são muito confundidos entre si. O cará e o inhame pertencem a família *Dioscoreaceae* e ao gênero *Dioscorea* que possui mais de 600 espécies, enquanto o taro é da família *Araceae*. Uma diferença entre o cará e o inhame são os maiores valores para a quantidade de potássio e fósforo presentes no inhame e o maior teor de fibras no cará.

Os mecanismos de adsorção do amido no tratamento de diferentes minerais vêm sendo estudado cada vez mais para melhor otimizar o uso desse reagente de baixo custo nas operações. Para Kar *et al.* (2013), a ativação depressora do amido na hematita deve-se à interação de grupos de amido hidroxilas com o grupo OH na superfície da hematita. Existem quatro grupos OH disponíveis nas moléculas de amido. Porém, os grupos OH próximos do oxigênio heterocíclico presente no amido são mais polarizados quando comparados aos demais. O par de elétrons nos átomos de oxigênio presentes em átomos de oxigênio polarizáveis interagem com os orbitais-d vagos disponíveis em átomos de Fe do óxido de ferro (Figura 3.7).

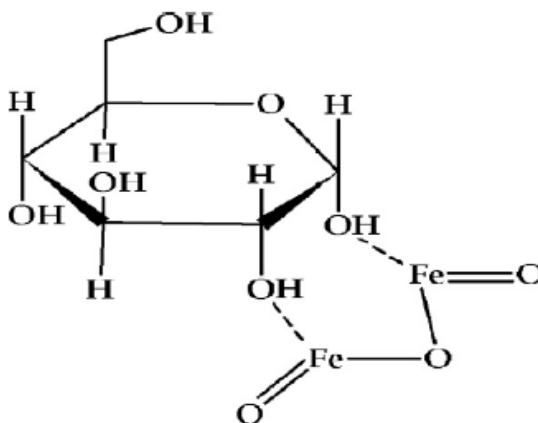


Figura 3.7: Estrutura da interação hematita-amido

Fonte: KAR *et al.* (2013)

Ao analisar as isotermas de adsorção de amido de milho e amido catiônico sobre o quartzo e a hematita, Balajee e Iwasaki (apud LIMA, 1997) constatam que o mecanismo de adsorção de amidos é por meio, principalmente, de ligações de hidrogênio. É possível observar na Figura 3.8 que o amido de milho adsorve preferencialmente na superfície da hematita e que essa curva de adsorção chega a um platô já em concentrações baixas do amido, diferentemente do quartzo. Nota-se também que a adsorção decresce para as duas espécies minerais com o aumento do pH.

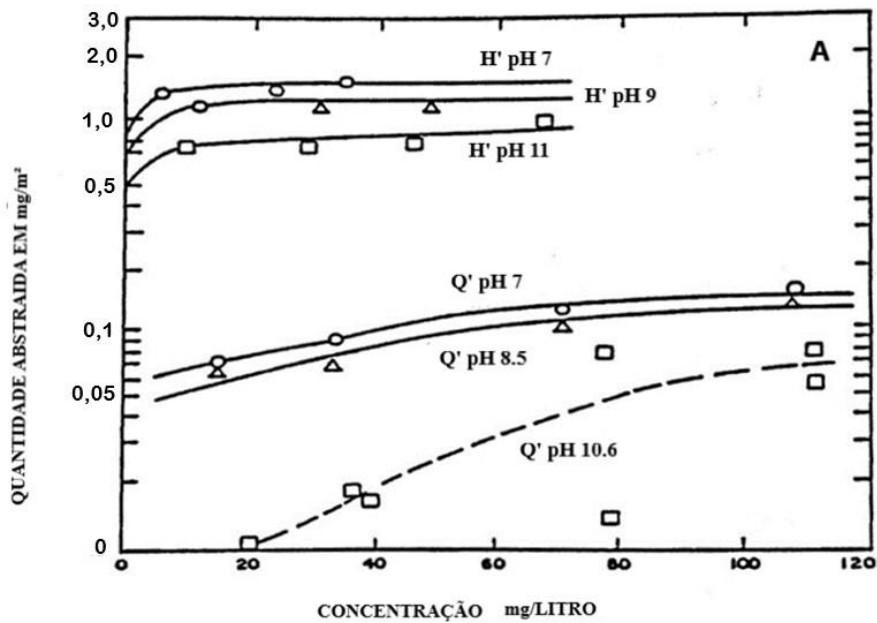


Figura 3.8: Isoterma de adsorção do amido de milho sobre o quartzo (Q) e hematita (H)  
 Fonte: adaptado de BALAJEE & IWASAKI (1969), *apud* LIMA (1997)

Utilizando o amido catiônico observa-se o contrário (Figura 3.9): há preferência de adsorção no quartzo, essa adsorção aumenta em pH mais elevado e que de forma geral há uma saturação de adsorção na superfície de ambos os minerais em concentrações baixas de amido catiônico, salvo em pH 11.

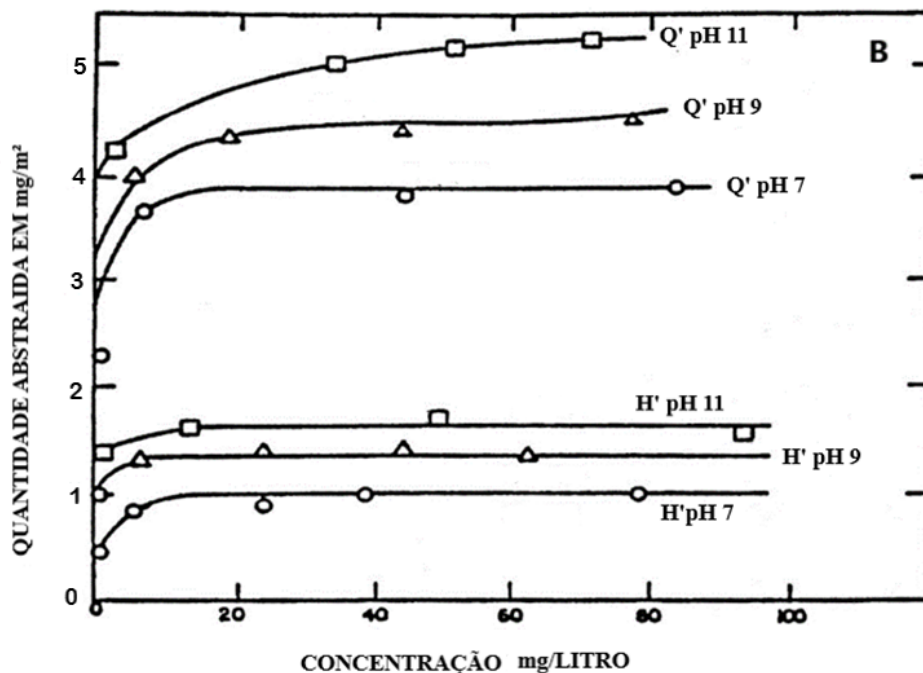


Figura 3.9: Isotherma de adsorção do amido catiônico sobre o quartzo e hematita  
 Fonte: adaptado de BALAJEE & IWASAKI (1969), *apud* LIMA (1997)

Ma e Bruckard (2010), por outro lado, investigaram o comportamento da adsorção do amido de milho na superfície da caulinita, onde a floculação/dispersão das partículas de caulinita revestidas com amido foi analisada através de medições de adsorção e turbidez. O pH teve papel crucial na adsorção de amido na caulinita. Do pH 7 ao 10,5 houve o decréscimo da adsorção de amido, enquanto em pH 10,5 percebeu-se maior densidade de adsorção. Isso foi possível devido à redução da repulsão eletrostática entre as moléculas de amido aniônico e as partículas de caulitina carregadas negativamente quando há mudança no pH e na força iônica. Foi observado também que em menor pH ou na presença de eletrólitos, o amido desempenha um papel significativo na agregação de partículas de caulinita quando utilizado em baixas dosagens.

Nebo *et al.* (1996) encontraram resultados similares aos apresentados Ma e Bruckard (2010) para a caulinita e também investigaram a adsorção de amido em outros minerais. Foram realizados testes de adsorção por espectrofotometria de absorção no UV-Visível utilizando goethita, caulinita e quartzo (granulometria menor que 38  $\mu\text{m}$ ) com amido de mandioca como floculante em diferentes valores de pH. Foram realizados testes de potencial zeta para esses minerais. Foi observado que o amido tende a se adsorver preferencialmente na superfície da caulinita no pH 9 (Figura 3.10). Em pH neutro a caulinita ainda possui preferência, porém a quantidade absorvida cai para 60 mg/g e no pH 3 há o pico de absorção de 90 mg/g. A

hipótese levantada pelos autores para explicar esse fato é a maior área de superfície presente na caulinita e a possível presença de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Al}^{+3}$  nessa argila.

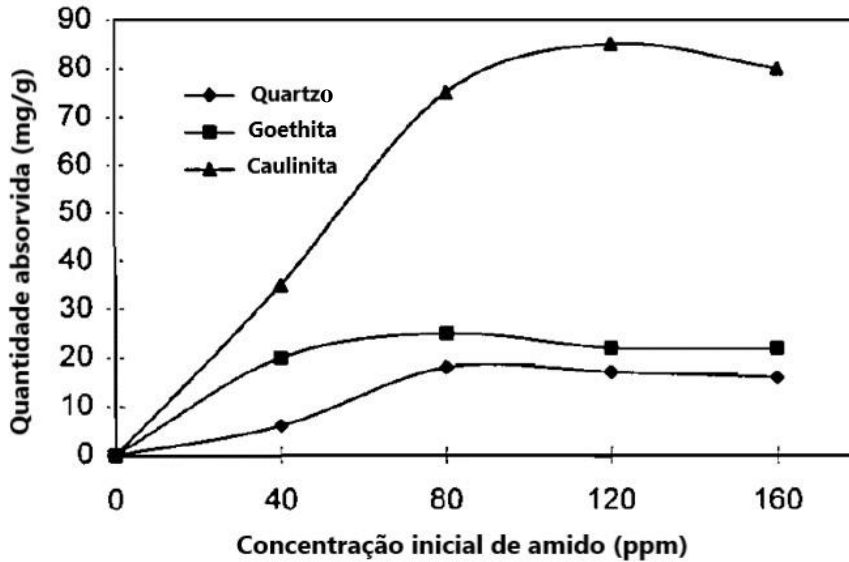


Figura 3.10: Adsorção do amido de mandioca na goethita, quartzo e caulinita em pH 9. Fonte: adaptado de NEBO *et al.* (1996)

Para o potencial zeta foi observado que a adição do amido não alterou os valores encontrados nos testes sem a presença do mesmo. Os resultados obtidos no trabalho indicam que o mecanismo de adsorção do amido de mandioca nos minerais ocorre por ponte de hidrogênio. As curvas de potencial zeta dos minerais em questão são evidenciadas na Figura 3.11.

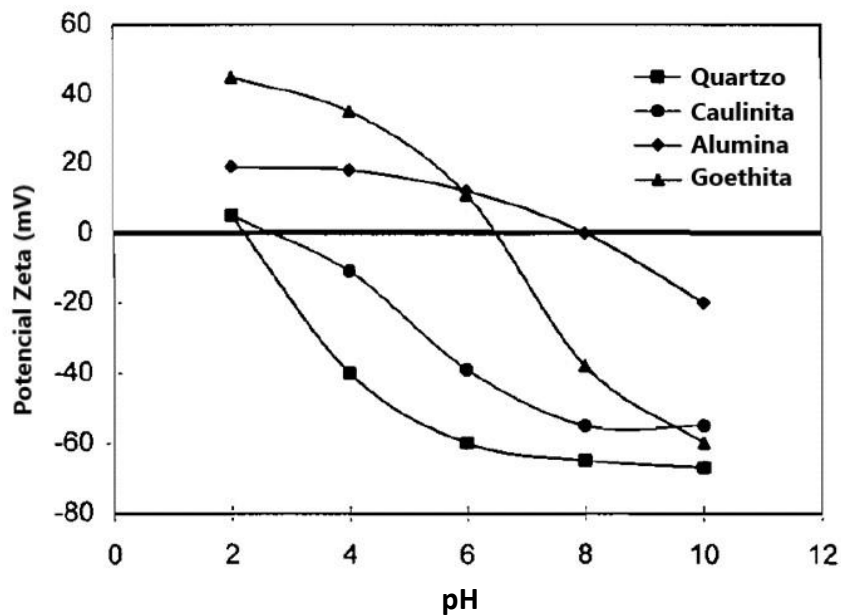


Figura 3.11: Potencial zeta da goethita, quartzo, alumina e caulinita. Fonte: adaptado de NEBO *et al.* (1996)



Os resultados encontrados por Orumwense (1994) concordam com os descritos acima para a adsorção preferencial do amido de mandioca sobre a caulinita em relação a goethita. Ademais, o autor analisa o desempenho da sedimentação da goethita e caulinita separadamente quando utilizado o amido de mandioca e a poliacrilamida com concentrações iguais (50 ppm). As granulometrias de ambas as amostras estavam em uma fração menor do que 38  $\mu\text{m}$ . Os testes foram realizados em diferentes valores pH e foram incluídos testes sem a adição de ambos os floculantes, como mostra a Figura 3.12.

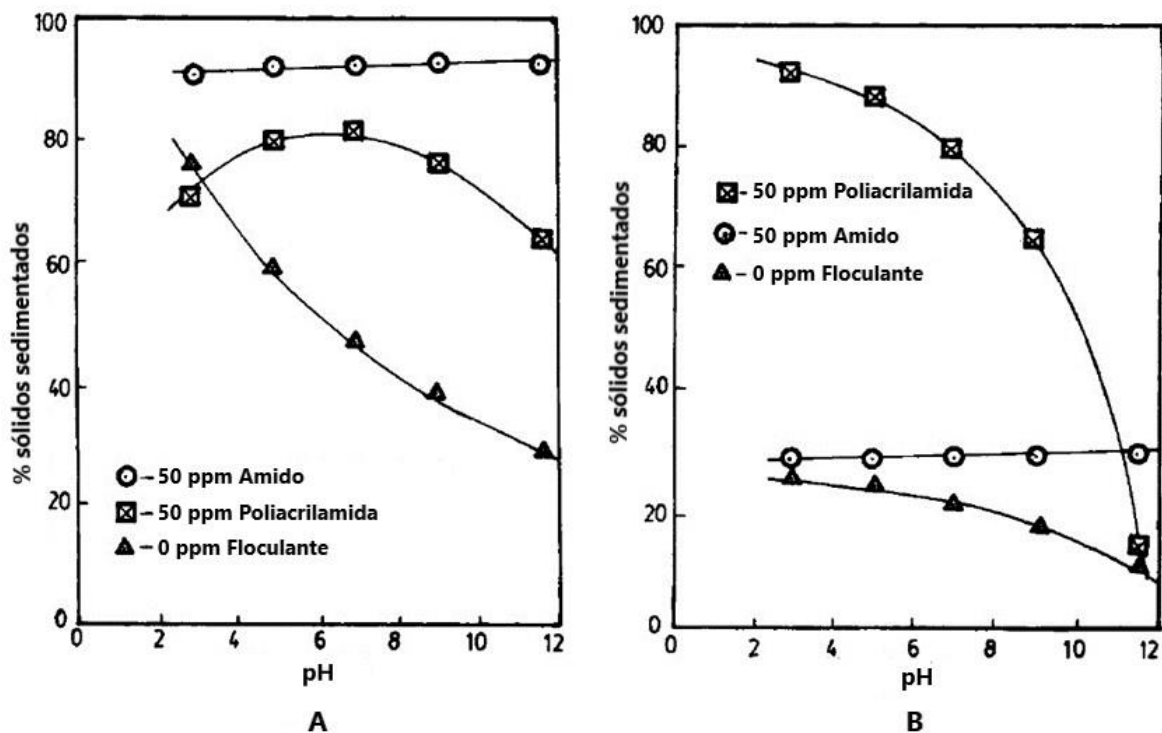


Figura 3.12: Sedimentação da goethita (A) e caulinita (B) na presença de poliacrilamida, amido de mandioca e na ausência de ambos.

Fonte: adaptada de ORUMWENSE 1994

Foi constatado então que o amido de mandioca possui melhor eficiência para a floculação da goethita quando comparado com a poliacrilamida, apesar desta ainda apresentar bom desempenho. Para a caulinita a poliacrilamida apresentou uma eficiência muito maior que o amido em pH ácido, porém esses valores decrescem drasticamente em pH alcalino.

### 3.5 Estudos Sobre a Utilização de Amido na Floculação de Efluentes

Vêm sendo realizados estudos sobre a utilização de polímeros naturais, como o amido, no tratamento de águas por suas vantagens econômicas e ambientais. A composição do material

sólido inorgânico das águas tratadas envolve argilominerais e outros minerais presentes no rejeito de minério de ferro.

Oliveira, Machado e Holanda (2004) caracterizaram o lodo (resíduo) de uma estação de tratamento de água da região de Campos dos Goytacazes-RJ, e observaram que esse material era constituído de caulinita, mica, sílica e gibbsita, com predominância de caulinita.

Campos, Vieira e Villela (1984), verificaram, utilizando *Jar Test*, a viabilidade do emprego de amido como auxiliar de floculação de águas para abastecimento. Os amidos utilizados foram provenientes da batata, do milho, da mandioca, da araruta, do cará e do arroz, entretanto este último teve resultados insatisfatórios. Os testes foram conduzidos com quatro amostras distintas de água com valores de cor, turbidez, pH e alcalinidade diferentes (Tabela 3.4), variando as dosagens de cal e sulfato de alumínio (quando necessário), e as dosagens de amidos.

Tabela 3.4: Características das amostras empregadas nos ensaios de floculação.

	<b>pH</b>	<b>Turbidez (UT)</b>	<b>Alcalinidade (mg/ em CaCO<sub>3</sub>)</b>	<b>Cor (mg/ em Pt-Co)</b>
<b>Água I</b>	6,2 a 6,5	6,5 a 8,9	8,8 a 9,0	20 a 40
<b>Água II</b>	5,7 a 6,4	110,0 a 150,0	3,3 a 14,6	>70
<b>Água III</b>	6,9 a 7,0	15,0 a 39,0	65,1 a 82,5	>70
<b>Água IV</b>	6,5 a 7,4	124,0 a 140,0	74,8 a 87,5	>70

Fonte: Adaptada de CAMPOS, VIEIRA & VILLELA (1984)

Para a Água I, o amido de batata, de araruta e de cará reduziram em 20% a dosagem de coagulante obtendo um sobrenadante de melhor qualidade quando comparado com os testes onde se utilizou apenas sulfato de alumínio e cal. Para a Água II, os amidos com melhor desempenho foram o da araruta, cará e mandioca. Nos testes com a ÁGUA III, os amidos não demonstraram uma melhora nos resultados do sobrenadante, porém foi observado a possibilidade da redução da dosagem ótima do sulfato de alumínio. A araruta e o cará apresentaram melhores resultados para a Água IV, em dosagens de 1 mg/L para ambos.

Di Bernardo (2000) investigou o uso de diferentes fontes de amido catiônico (milho, batata, mandioca e mandioca waxy) e polímero sintético catiônico como auxiliar de coagulação e floculação para a remoção de cor aparente e turbidez. Também foram verificados a influência do gradiente de velocidade e do tempo de agitação na floculação, utilizando os mesmos

reagentes, na eficiência da sedimentação, via *Jar Test*. A água de estudo foi composta de água de poço não clorada, caulinita e ácido húmico. Não houve resultados satisfatórios para o amido de batata. O mecanismo de adsorção, quando usado polímero sintético catiônico, foi a formação de pontes para dosagens menores que 1,0 mg/L e neutralização de cargas para a dosagem 1,5 mg/L. Para o amido de milho catiônico em dosagem 2,0 mg/L a adsorção foi por pontes de hidrogênio e na dosagem 3,0 mg/L, neutralização de cargas por causa do potencial zeta positivo. O uso de amido de mandioca proporcionou bons resultados possivelmente devido à sua alta massa molecular, com formação de pontes de hidrogênio em todas em todas as dosagens. O escalonamento do gradiente de velocidade nos ensaios com polímero sintético e de amido de milho catiônico resultou na melhora da qualidade do sobrenadante. Para os ensaios com amido de mandioca catiônico waxy com dosagem 1,0 mg/L, que mostrou ser mais eficiente que os demais polímeros na remoção de turbidez e cor aparente, o escalonamento do gradiente de velocidade não influenciou na qualidade dos resultados. A condição ótima de aplicação dos amidos foi a aplicação logo após a mistura rápida, com tempo de agitação de 180 segundos e gradiente de velocidade de  $100 \text{ s}^{-1}$  para todas as velocidades de sedimentação estudadas, com exceção do amido de mandioca waxy. Para esse último amido, os melhores resultados para essas condições ótimas de aplicação foram com velocidade de sedimentação menores que 4,6 cm/min.

Murakami e Moruzzi (2012) estudaram a utilização de amido de milho como floculante no tratamento de águas pluviais para fins de aproveitamento em usos não potáveis em residências unifamiliares. Os ensaios de coagulação/floculação foram realizados em laboratório por meio de *Jar Test*. Foram variadas as dosagens de solução de amido de milho, porém foi possível notar que, de modo geral, os melhores resultados para cor aparente e turbidez ocorreram em dosagens acima de 6 mg/L, com reduções médias de 70% e 80%, respectivamente, de seus valores absolutos médios.

O amido é usado amplamente no processamento mineral como depressor na flotação e floculante (WEISSENBORN, WARREN & DUNN, 1995). Rocha (2008) cita seus principais usos como: depressor de óxidos de ferro na flotação catiônica reversa de itabiritos, depressor de carbonatos, na flotação direta aniônica de rochas fosfáticas e depressor de argilo-minerais na flotação direta de silvinita.

É esperado que os principais constituintes de rejeito de minério de ferro sejam, majoritariamente, sílica e minerais de ferro. Logo, o estudo da ação e eficiência do amido

sobre esses minerais se tornou necessário para esse trabalho. Em geral, as pesquisas são dirigidas para o desempenho de tipos de amidos e das variações das suas composições na eficiência da depressão de minerais de ferro. Porém, a interação entre o amido e as partículas de quartzo é um tema pouco investigado (PEÇANHA *et al.*, 2017).

Weissenborn, Warren e Dunn (1994) estudaram o desempenho de diferentes amidos na floculação seletiva de minério de ferro por meio de coluna de sedimentação. O teor e resultados de recuperação para a floculação seletiva de minério de ferro ultrafino usando vários amidos e condições padrão de teste são apresentados na Tabela 3.5. O amido natural com melhor resultado para teor de ferro foi o de araruta (56,5%) e dos amidos modificados foi o trigo fosfatado (60%). Os de melhor desempenho na recuperação de ferro foi o amido natural de trigo (78%).

Tabela 3.5: Desempenho de diferentes tipos de amido na floculação seletiva

<b>Tipos de Amido</b>	<b>Teor (% ferro)</b>	<b>Recuperação de ferro (%)</b>
Araruta	56,5	35
Milho	54,8	57
Batata	53,9	42
Tapioca	52,6	76
Trigo	53	78
<b>Amidos modificados</b>		
Ácido (indústria têxtil)	57,7	29
Catiônico	54,7	25
Trigo fosfatado	60	15

Fonte: adaptado de WEISSENBORN, WARREN & DUNN (1994)

Kar *et al.* (2013) estudaram o uso de amido pré-gelatinizado, amido de milho, amido de batata e amido de arroz como depressores para com amostras puras de hematita e quartzo. Os resultados sugerem que todos os amidos são bons depressores para a hematita, tendo sua adsorção máxima no valor de pH de 5 a 9, com exceção do amido solúvel que possui melhor desempenho em pH ligeiramente alcalino. Utilizando medição de carga de superfície e espectroscopia de infravermelho (FTIR) percebeu-se que a redução da carga de superfície e a alteração dos picos na região de número de onda de 750 a 1500  $\text{cm}^{-1}$  indicam a presença de ligação de hidrogênio e interação química entre hematita e amidos.

Martins, Lima e Leal Filho (2012) observaram, que o amido de milho convencional se mostrou capaz de realizar ação depressora sobre todas amostras de minerais de ferro de diferentes minas em pH 10,5, exceto sobre as amostras que se mostraram mais ricas em hematita compacta (HC). Para estas últimas, foi necessário um pH em torno de 8 para a melhora dos resultados.

Santos (2001) buscou identificar dentre quatro variedades de inhame (branco, chinês, japonês e macaquinho), quais possuem maior rendimento de amido e suas características, verificando a possibilidade de atender ao processo de flotação. Quanto ao teor de amido, constatou-se que o chinês (10,0% e 13,7%) possui os maiores valores. Os parâmetros utilizados para os testes de flotação foram teor de sílica no concentrado, porcentagem de ferro no concentrado e no rejeito e a recuperação mássica e metalúrgica, comparando os amidos das variedades de inhame com o padrão utilizado pela indústria (amido de milho). A variedade chinês se destacou pois foi mais eficiente em aumentar o teor de Fe no concentrado. Todos os amidos obtiveram resultados acima do padrão para a recuperação mássica e metalúrgica.

Moreira (2013) realizou testes de flotação em bancada com dez tipos de amidos diferentes como depressores na flotação catiônica reversa de minério de ferro (Tabela 3.6).

Tabela 3.6: Resultado de flotação em bancada utilizando amidos como depressores

<b>Amido</b>	<b>Recuperação Metalúrgica (%)</b>	<b>Sílica no Concentrado (%)</b>	<b>Ferro no Rejeito (%)</b>
<b>500 g/t</b>	Milho	85,9	1,0
	Araruta	88,0	0,8
	Inhame	86,7	0,8
	Taro	83,8	0,8
<b>1000 g/t</b>	Milho	88,7	0,8
	Araruta	89,6	0,7
	Inhame	88,0	1,0
	Taro	88,3	0,9
<b>1500 g/t</b>	Milho	92,4	2,6
	Araruta	91,1	1,0
	Inhame	89,8	1,5
	Taro	89,9	1,1

Fonte: adaptado de MOREIRA (2013)

A amostra de minério foi proveniente do projeto Itabiritos Mariana com uma granulometria com  $D_{90}$  abaixo de 150  $\mu\text{m}$  e 30% do material abaixo de 38  $\mu\text{m}$ . A análise química da amostra consistia majoritariamente de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (45,33%) e  $\text{SiO}_2$  (33,15%). Ao realizar os testes em bancada, com dosagens de amido de 500, 1000 e 1500 g/t, notou-se que os amidos de taro e inhame apresentaram resultados quase semelhantes ao amido de milho (depressor convencional). O amido de araruta obteve uma recuperação metalúrgica superior ao de amido de milho para as dosagens 500 e 1000 g/t. Para a dosagem 1500g/t, os valores já foram similares. Isso mostra a possível saturação do amido em altas quantidades, fazendo de 1000 g/t a dosagem ótima para os testes. A Tabela 3.7 mostra os resultados para os amidos de milho, inhame, taro e araruta em relação a dosagem, recuperação metalúrgica, ferro no rejeito e sílica no concentrado. Moreira faz um destaque em especial para a araruta porque além de obter bons resultados, é “uma espécie genuinamente brasileira, resistente, de boa produtividade e resistente a intempéries climáticas e às pragas”.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da Amostra da Alimentação do Espessador de Lamas

A amostra foi proveniente da alimentação do espessador de lamas de uma usina de tratamento de minério de ferro da região do quadrilátero ferrífero. Este material é gerado apenas na etapa de deslamagem da usina, correspondente ao *overflow* dos hidrociclones. A etapa de deslamagem recebe o produto da moagem e possui três estágios de quatro baterias de ciclones cada. O *overflow* final (10  $\mu\text{m}$ ) é direcionado ao espessador de lamas e o *underflow* desta operação é direcionado à flotação. A deslamagem foi projetada para produzir em média 8400  $\text{m}^3/\text{h}$  de lama com 6% de sólidos (em peso). Não há presença de nenhum reagente químico neste fluxo, uma vez que a usina em questão não utiliza dispersante. O espessador de lamas recupera por volta de 7350  $\text{m}^3/\text{h}$  de água e produz 1050  $\text{m}^3/\text{h}$  de *underflow* com média de 37% de sólidos (em peso), de acordo com o projeto da usina. A lama espessada é bombeada para a barragem de rejeitos. Os rejeitos das demais etapas de beneficiamento da usina são direcionados ao espessador de rejeito.

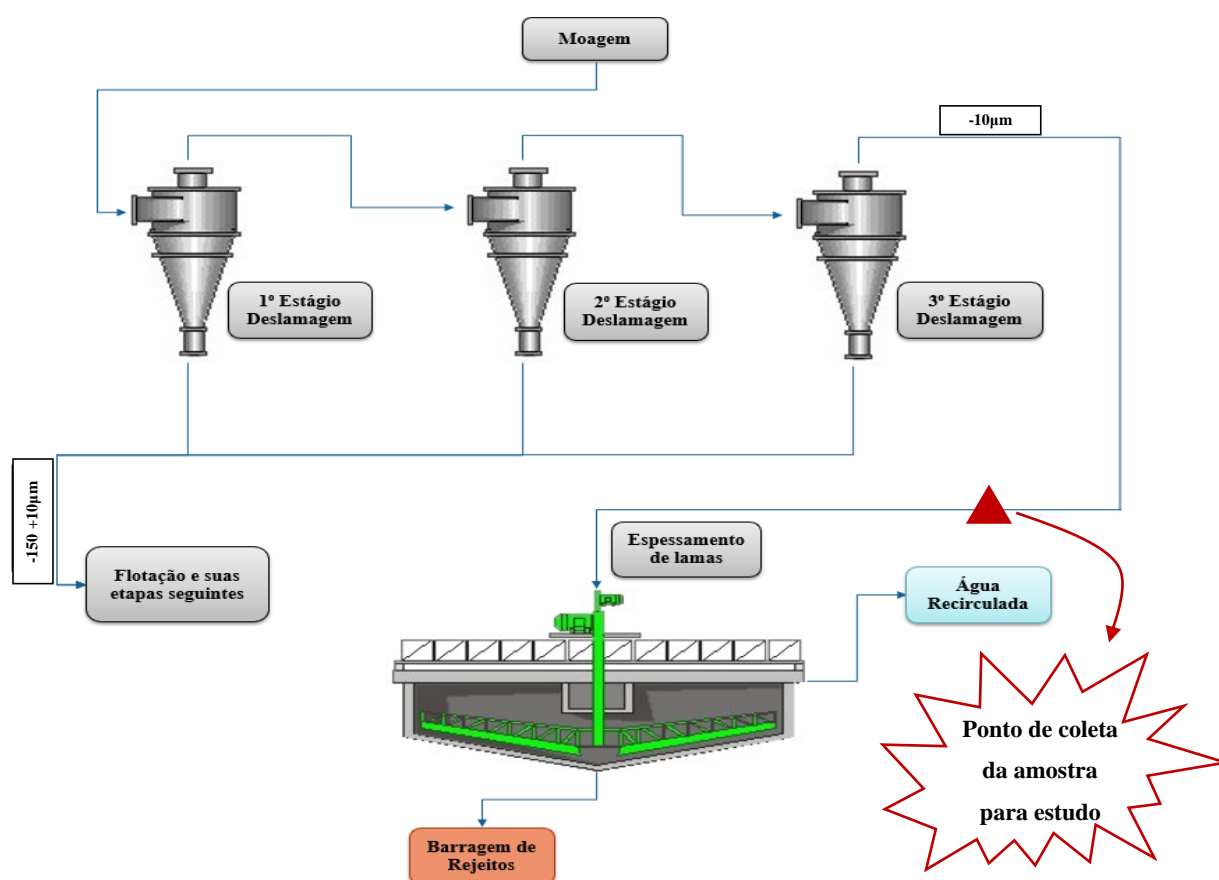


Figura 4.1: Fluxograma simplificado da etapa de deslamagem e espessamento de lamas da amostra de minério de ferro

O fluxograma para as atividades de caracterização da amostra da alimentação do espessador de lamas é exibido na Figura 4.2.

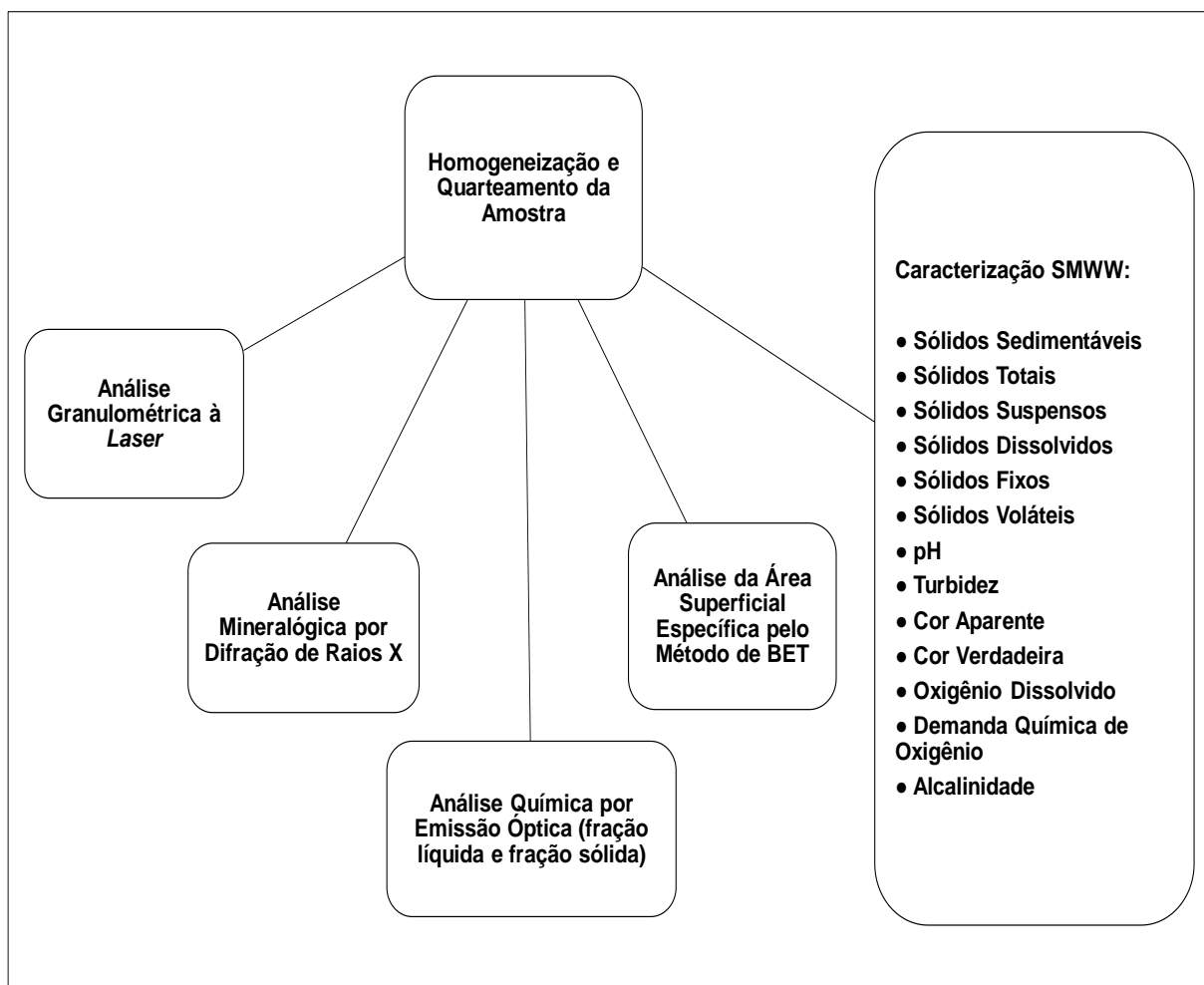


Figura 4.2: Fluxograma da caracterização da amostra da alimentação do espessador de lamas de minério de ferro

Os testes para a análise dos parâmetros de qualidade da amostra da alimentação do espessador foram feitos baseados no *Standard Methods for Determination of Water and Wastewater* (SMWW). Esses métodos consistem em procedimentos para a análise de águas de diferentes parâmetros de qualidade incluindo águas adequadas para consumo doméstico ou industrial, água superficial, água salgada, efluentes municipais ou industriais tratados ou não tratados, entre outros (APHA/AWWA/WEF, 2005).

A determinação dos sólidos sedimentáveis foi feita através de cone de Imhoff de vidro no laboratório de Análises Químicas (DEMIN/UFOP).



Uma alíquota da amostra inicial foi utilizada para determinação da turbidez da amostra global, cor aparente, o pH e oxigênio dissolvido utilizando, respectivamente, Turbidímetro Plus Microprocessado (ALFAKIT), Colorímetro Q406 (QUIMIS), pHmetro de bancada Q400AS (QUIMIS), e Medidor Portátil de Oxigênio Dissolvido Q758P (QUIMIS). Os testes foram realizados no laboratório de Análises Químicas (DEMIN/UFOP).

Para a determinação de sólidos suspensos (SST) totais foi feito, primeiramente, a filtragem de uma alíquota em funil de Buchner com membrana filtrante de 1µm de porosidade, que foi pesada previamente, sob pressão reduzida. A membrana com a parte sólida foi seca em estufa à 100°C (± 5°C) e pesada novamente. O filtrado líquido foi utilizado nos testes de alcalinidade, demanda química de oxigênio (DQO) e cor verdadeira. A determinação de sólidos totais (ST) foi feita através da pesagem antes e após secura de uma alíquota em estufa à 100°C (± 5°C). Os testes foram realizados no laboratório de Análise Química (DEMIN/UFOP). Os resultados para ST e SST, assim como o de sólidos dissolvidos totais (SDT) foram obtidos a partir dos cálculos:

$$ST = \frac{m_{st}}{V} \times 1000000 \quad (1)$$

$$SST = \frac{m_{ss}}{V} \times 1000000 \quad (2)$$

$$SDT = ST - SST \quad (3)$$

Onde:

- $m_{st}$  = massa dos sólidos totais;
- $m_{ss}$  = massa dos sólidos suspensos totais;
- $V = 100\text{mL}$ .

O material após secura na determinação de ST foi encaminhado à uma mufla à 550°C (± 50°C) por 1 hora e foi pesado em seguida. Essa etapa foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos (DEMIN/UFOP) e a determinação dos sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV) foi obtida a partir dos cálculos:

$$SF = \frac{MC \times 1000}{V} \quad (4)$$

$$SV = \frac{(ST - SF) \times 1000}{V} \quad (5)$$

Onde:

- MC = massa cinza.

A parte líquida proveniente do teste de sólidos suspensos totais foi utilizada para determinar a cor verdadeira (Colorímetro Q406 - QUIMIS), turbidez da fração líquida (Turbidímetro Plus Microprocessado - ALFAKIT) e alcalinidade por método de titulação de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> no laboratório de Análises Químicas (DEMIN/UFOP).

Para a realização do teste de demanda química de oxigênio (DQO) foi utilizado dicromato de potássio e ácido sulfúrico como solução de digestão, sulfato de prata como solução e ácido sulfúrico como solução catalizadora e solução padrão de sulfato ferroso amoniacal padronizada. A DQO foi determinada a partir do cálculo:

$$DQO \left( \frac{mgO_2}{L} \right) = \frac{(VPB_n - VPA_n) \times 1000}{VP_n} \quad (6)$$

Onde:

- VPA<sub>n</sub> = volume da solução ferrosa gasto na titulação da prova que contém a amostra, em mL;
- VPB<sub>n</sub> = volume da solução ferrosa gasto na titulação da prova em branco, em mL;
- VP<sub>n</sub> = volume da solução ferrosa gasto na titulação da prova padrão, em mL.

A análise granulométrica foi feita utilizando um granulômetro a *laser* (Cilas 1060) do Laboratório de Propriedades Interfaciais (DEMIN/UFOP).

A densidade dos sólidos foi medida através de picnômetro a gás (Ultrapycnometer 1000) do Laboratório de Propriedades Interfaciais (DEMIN/UFOP).

Foi utilizado um espectrofotômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP/OES – Agilent 725) do Laboratório de Geoquímica do (DEMIN/UFOP) para as análises químicas da uma alíquota global da polpa (após filtragem e secura) e da fração líquida após filtragem com membrana filtrante 1µm.

A composição mineralógica foi feita através de um difratômetro de raios X (XPRT3 - PanAlytical) do Laboratório de Microscopia Ótica e Difratometria de Raios X (DEMIN/UFOP).

O método de adsorção de BET (Braunauer, Emmet e Teller) foi utilizado para determinar a área superficial específica total da amostra.

## **4.2 Minerais Majoritários Puros**

Sabe-se que o maior desafio quando se trata da sedimentação de partículas é a fração fina do material. Logo pretende-se realizar um estudo fundamental do desempenho dos reagentes estudados nesse trabalho com os dois minerais majoritário na fração menor que 38 µm.

Foi utilizado a técnica de catação manual e escrubagem, quando necessário, para uma seleção preliminar do material de melhor qualidade e sem contaminantes em sua superfície. A adequação granulométrica dos minerais puros foi feita por cominuição até que uma quantidade aproximadamente de 2 kg para cada mineral estivesse toda abaixo de 38 µm. As amostras foram então homogeneizadas e quarteadas.

A granulometria dos minerais foi analisada utilizando um granulômetro a *laser* (Cilas 1060) do Laboratório de Propriedades Interfaciais (DEMIN/UFOP).

A composição mineralógica foi feita através de um difratômetro de raios X (XPERT3 - PanAlytical) do Laboratório de Microscopia Ótica e Difractometria de Raios X (DEMIN/UFOP).

A densidade foi medida através de picnômetro a gás (Ultrapycnometer 1000) do Laboratório de Propriedades Interfaciais (DEMIN/UFOP).

## **4.3 Reagentes**

O floculante sintético que serviu de base para comparação com os floculantes naturais e naturais modificados foi o Praestol 2641 da marca Solenis. Esse floculante é sintetizado a partir de polieletrólitos orgânicos, macromoleculares e solúveis em água, baseados na poliacrilamida. Uma solução desse reagente com concentração 0,02% (p/v) foi aquecida por 20 minutos para que haja sua gelatinização.

Os amidos naturais modificados que foram utilizados são CatoGel 21 B, DuoCat 355 e o AM21, da marca Agrícola Horizonte Ltda – Amidos. O CatoGel 21 B é um amido catiônico

de mandioca/milho pré-gelatinizado. O DuoCat 355 é um amido catiônico reticulado de mandioca, ou seja, possui um alto peso molecular. Por não serem pré-gelatinizados o DuoCat 355 e o AM21 necessitam cozimento para disponibilizarem as suas moléculas. Esse cozimento deverá ser em suspensão a 0,2% (p/V) em água, à uma temperatura de 95° C, por 20 minutos.

#### 4.4 Ensaios de Agregação

Os ensaios de agregação foram realizados em tubo de Galery no Laboratório de Análises Químicas (DEMIN/UFOP) com o reagente sintético e os amidos naturais modificados. A metodologia dos testes foi baseada, com adaptações, em Orumwense e Nwachukwu (2000), utilizando misturas de mineral puro e água deionizada com 5% de sólidos, em um tubo de Galery com volume total de polpa de 200mL. Os testes foram realizados nas seguintes etapas:

- Adição dos sólidos e água deionizada no tubo de Galery;
- Homogeneização da polpa enquanto é ajustado o pH;
- Medição e ajuste do pH;
- Adição do reagente e agitação por 1 minuto;
- Sedimentação do material;
- Recolhimento da fração afundada e secagem da mesma.

NaOH e HCl foram utilizados como reguladores de pH e a porcentagem de material sedimentado foi calculada a partir da fórmula:

$$MS(\%) = \left( \frac{m_{afundada}}{m_{inicial}} \right) \times 100 \quad (7)$$

Onde:

- $m_{inicial}$  = massa inicial
- $m_{afundada}$  = massa afundada

O pH e dosagem de reagente que foram utilizados nos ensaios de agregação foi decidido a partir dos resultados obtidos no item 4.2 em conjunto com os valores revisados na literatura. O tempo de sedimentação poderá ser ajustado de acordo com a Lei de Stokes para os diferentes minerais majoritários puros.

#### **4.5 Ensaio de Eletroforese**

A determinação de potencial zeta foi obtida através do método de eletroforese, utilizando o medidor Zetâmetro (Zetasizer Nano Z - ZEN2600) da marca Malvern no Laboratório de Propriedades Interfaciais (DEMIN/UFOP). Foi utilizado o eletrólito indiferente nitrato de sódio ( $\text{NaNO}_3$ ), na concentração equivalente a  $10^{-3}$  mol/L. O potencial zeta dos minerais majoritários puros foram medidos na ausência e presença do reagente de melhor desempenho no teste de agregação para as faixas de pH entre 5 e 11.

#### **4.6 Ensaio de Jar Test**

Foram utilizados ensaios em *Jar Test* para a determinação da dosagem ótima, tempo de agitação e tempo de sedimentação para o amido modificado que apresentou o melhor resultado nos testes fundamentais realizados para os dois minerais majoritários constituintes do rejeito em estudo (Laboratório de Análise Química DEMIN/UFOP). Foram adicionados 2 litros da amostra da alimentação do espessador de lamelas, devidamente homogêneas, para cada jarro e o material foi agitado. Foi utilizado o pH com melhor resultado no item 4.4 e foi então pipetado em cada jarro uma quantidade pré-determinada de floculante baseadas nos resultados também obtidos no item 4.4 e as amostras foram agitadas em rotação denominada etapa lenta. O tempo de agitação inicialmente utilizado foi o padrão de 20 minutos e esse tempo foi então diminuído para 10 minutos, para observar se o tempo dessa variável poderia ser otimizado. O tempo de sedimentação inicialmente utilizado foi o padrão de 30 minutos. Foi utilizado também o tempo de sedimentação de 10 minutos, uma vez realizada a curva de sedimentação da amostra na presença do amido modificado de melhor desempenho, com a melhor dosagem obtida no item 4.4 para a obtenção do tempo crítico de sedimentação (Figura 4.3).

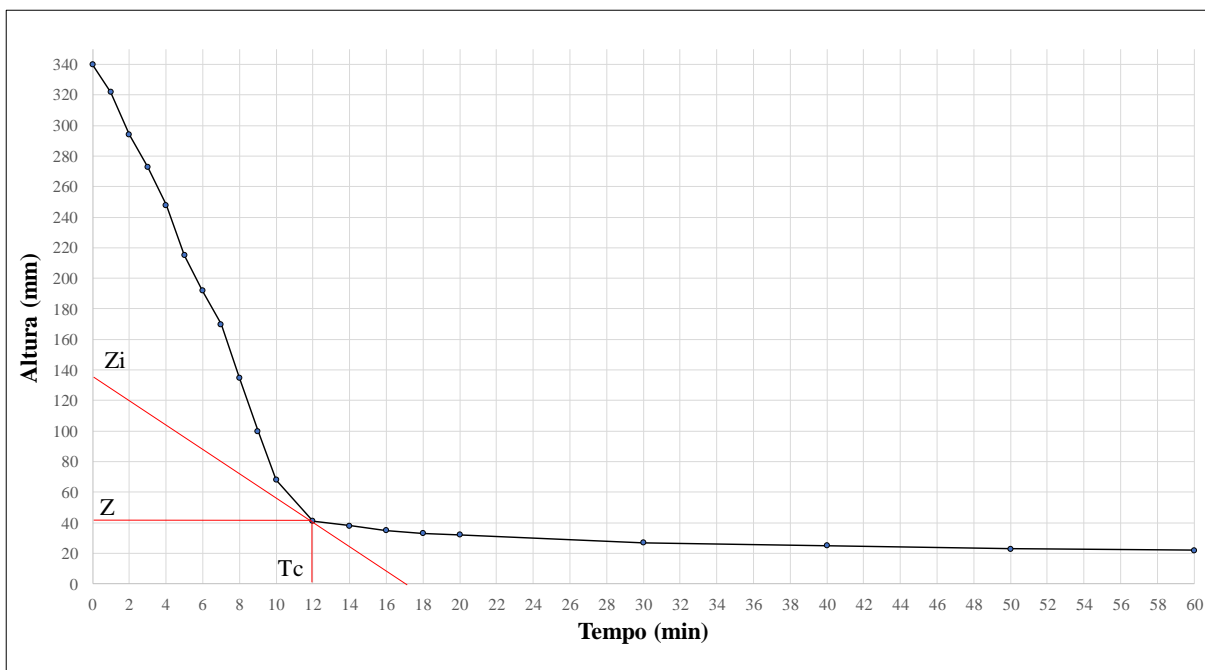


Figura 4.3: Curva de sedimentação em proveta da amostra realizada em 60 minutos na presença do amido modificado de melhor desempenho e com a melhor dosagem

Por fim, foi escolhido o último tempo de sedimentação de 60 minutos para observar se um longo período em repouso teria alguma influência sobre o abatimento dos flocos de menor tamanho melhorando a qualidade do sobrenadante. Os testes foram realizados em duplicata para todas as combinações de dosagem, tempo de agitação e tempo de sedimentação.

Para comparação de resultados, foi realizado um teste denominado “Padrão” com poliacrilamida com dosagem 1 mg/L seguindo a metodologia padrão para a realização de ensaios *Jar Test* de tempo de agitação de 20 minutos e tempo de sedimentação de 30 minutos.

Por fim, uma amostra do sobrenadante de cada jarro foram então analisadas para cor e turbidez. A análise da qualidade do sobrenadante foi feita baseando-se no seu enquadramento nos padrões propostos pelas resoluções CONAMA 430 (BRASIL, 2011) e CONAMA 357 (BRASIL, 2005).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização da Amostra da Alimentação do Espessador de Lamas de Minério de Ferro

A curva de análise granulométrica obtida utilizando o granulômetro a laser (Cilas 1060) pode ser observada na Figura 5.1. Foi possível observar que há 49,97% de lamas (menor que 10  $\mu\text{m}$ ) e 7,67% de colóides (menor que 1  $\mu\text{m}$ ) presentes na amostra.

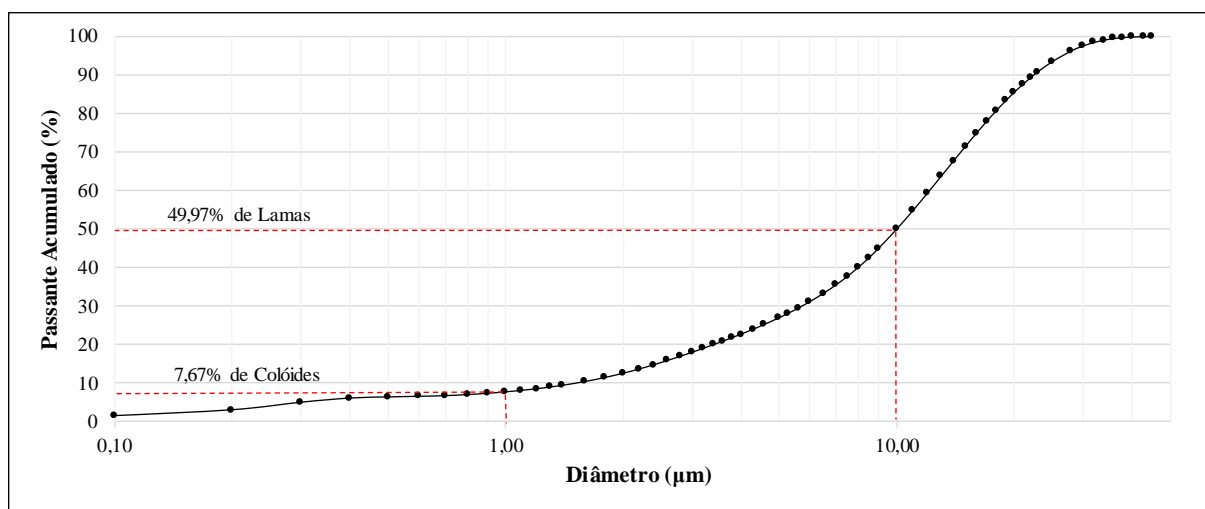


Figura 5.1: Distribuição granulométrica da amostra da alimentação do espessador de lamas.

A amostra apresentou um diâmetro passante acumulado em 90% ( $D_{90}$ ) de 22,44  $\mu\text{m}$  e um diâmetro médio de 11,14  $\mu\text{m}$  como mostra Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Dados granulométricos da amostra de lama de minério de ferro

Análise	Valores	Unidade de medida
$D_{10}$	1,52	$\mu\text{m}$
$D_{50}$	10,01	$\mu\text{m}$
$D_{90}$	22,44	$\mu\text{m}$
Diâmetro médio	11,14	$\mu\text{m}$

Os testes realizados utilizando o método B.E.T identificaram que a amostra possui uma área superficial de 4.404  $\text{m}^2/\text{g}$ .

Para a análise química, a amostra foi solubilizada com fusão alcalina para posterior análise no espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP OES). A elevada concentração de silício (Si) impossibilitou a determinação deste elemento pela técnica utilizada, ocorrendo precipitação do mesmo. Assim, foi realizada uma estimativa do teor de Si

através da diferença entre 100% e os outros elementos analisados. Para isto, também foi usado o valor de PPC (%) encontrado. Os resultados evidenciaram que a amostra é composta majoritariamente de hematita e sílica, como mostra a Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Análise química da fração sólidos da amostra de lama de minério de ferro

<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>SiO<sub>2</sub></b> (%)	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>MnO</b> (%)	<b>P<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> (%)	<b>CaO</b> (%)	<b>TiO<sub>2</sub></b> (%)	<b>MgO</b> (%)	<b>PPC</b> (%)
70,029	23,614	3,156	0,171	0,164	0,132	0,085	0,021	2,630

A análise química da fração líquida, após filtração com membrana filtrante 1 µm, evidenciou que os principais elementos dissolvidos (colóides) na amostra são o sódio com 93,884 mg/L e o enxofre com 49,938 mg/L, como mostra a Tabela 5.3. O silício dissolvido encontrado foi dezessete vezes maior que o ferro. Constatou-se que nenhum dos elementos encontravam-se fora dos padrões exigidos pela CONAMA 357 e 430.

Tabela 5.3: Análise química da fração líquida filtrada da amostra de lama de minério de ferro

<b>Elemento</b>	<b>Amostra</b>	<b>Unidade de Medida</b>
Na	93,884	mg/L
S	49,938	mg/L
Si	2,532	mg/L
K	2,173	mg/L
Ca	0,315	mg/L
Fe	0,145	mg/L
P	0,081	mg/L
Al	0,044	mg/L
Zn	0,032	mg/L
Cu	0,008	mg/L
Mn	0,006	mg/L
Sr	0,003	mg/L
Ba	0,003	mg/L

A composição mineralógica da amostra feita através de difratômetro de raios X (DRX) é observada na Figura 5.2. Os minerais identificados foram quartzo (SiO<sub>2</sub>), hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e caulinita (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O).



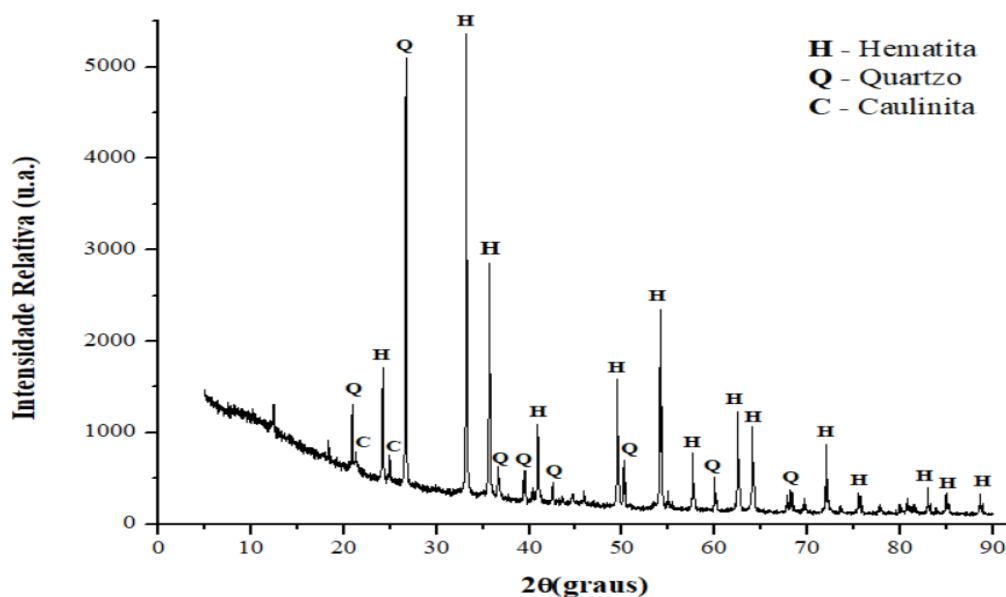


Figura 5.2: Difratoograma da amostra da alimentação do espessador de lamias

A Tabela 5.4 apresenta os resultados para os parâmetros de qualidade estudados para a amostra. A resolução CONAMA 357/2005 classifica os corpos de água doce em quatro classes especiais de acordo com seu destino. A qualidade da água é maior para os corpos de água Classe I e diminui para as demais classes, sendo a Classe IV a que apresenta menor qualidade. Como dito anteriormente, a Resolução CONAMA 430/2011 complementa a Resolução CONAMA 357/2005 quanto aos padrões para descarte de efluente de acordo com os corpos de água de destino. Porém, o estado de Minas Gerais exige padrão de qualidade Classe II para descarte de efluente uma vez regulado que “enquanto não aprovados os respectivos enquadramentos, as águas doces serão consideradas Classe II, exceto se as condições de qualidade atuais forem melhores, o que determinará a aplicação da classe mais rigorosa correspondente”, de acordo com a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/ 2008 art. 37 (BRASIL, 2008).

Tabela 5.4: Parâmetros de qualidade da amostra

Análise	Valores	CONAMA 430/2011 e 357/2005 Classe II	Unidade de medida
Sólidos Totais	56633,0		mg/L
Sólidos Suspensos Totais	55223,5		mg/L
Sólidos Dissolvidos Totais	1409,5		mg/L
Sólidos Fixos	55692,5		mg/L
Sólidos Voláteis	940,5		mg/L
Sólidos Sedimentáveis	78	$\leq 1^{[1]}$	mL/L
Densidade dos sólidos	4,06		g/cm <sup>3</sup>
pH	7,98	6 a 9	-
Eh	-72,8		mV
Temperatura	20,5	$\leq 40^{[1]}$	C
Cor Aparente	>500		uC
Cor Verdadeira	2	$\leq 75$	uC
Turbidez	>1000	$\leq 100$	NTU
Alcalinidade	82,5		mg/L CaCO <sub>3</sub>
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	99		mg/L O <sub>2</sub>
Oxigênio Dissolvido (OD)	8,65	$\geq 5$	mg/L O <sub>2</sub>

A densidade dos sólidos encontrada utilizando picnômetro a gás foi de 4,06 g/cm<sup>3</sup>. Pode-se observar a partir da quantificação dos sólidos presentes na amostra, a presença de 56633 mg/L de sólidos totais, ou seja, aproximadamente 5% de sólidos em peso estão presentes neste rejeito que alimenta o espessador de lamas. Os sólidos dissolvidos (porção de sólidos menor que 1µm) foram de 1409,5 mg/L. A inconsistência dessa informação com a pequena porção de partículas coloidais identificadas na análise granulométrica pode ser devido a adsorção destas partículas no próprio papel de filtro (PIVELI & KATO, 2006). O valor de sólidos voláteis foi igual a 940,5 mg/L. Entende-se como sólidos voláteis a porção de sólidos perdida após ignição (550°C ±5°), tipicamente hidratos, carbonatos e matéria orgânica. Os sólidos sedimentáveis presentes na amostra foi de 78 mL/L.

Os níveis de concentração de sólidos sedimentáveis e de sólidos em suspensão são relacionadas entre si, constituindo-se em outro parâmetro prático importante no controle

<sup>1</sup> Valores de parâmetros complementados na CONAMA 357/2005 pela CONAMA 430/2011

operacional dos sistemas de tratamento de efluentes. Este parâmetro, chamado de Índice Volumétrico de Lodo (IVL), pode representar o volume ocupado por unidade de massa de sedimentado.

$$IVL(mL/g) = \frac{\text{sólidos sedimentáveis}(mL/L)}{\text{sólidos em suspensão}(mg/L)} \times 1000 \quad (8)$$

Sólidos que se apresentam em boas condições de sedimentabilidade apresentam valores de IVL baixos. O nível de sólidos sedimentáveis nos efluentes finais descarregados pelas indústrias é também extremamente importante por se tratar de parâmetro da legislação. O limite máximo de apenas 1 mL/L para a descarga direta no corpo receptor aparece como padrão de emissão da resolução CONAMA 430/2011.

A diferença entre a cor aparente (maior que 500 uC) e a cor verdadeira (2 uC) deve-se ao fato de que a cor aparente é medida sem a remoção dos sólidos suspensos. A cor verdadeira está ligada apenas à fração coloidal (após filtração com membrana filtrante 1µm) resultando em valores menores. Assim como dito anteriormente, pode haver uma margem de erro no valor da cor verdadeira devido a adsorção de colóides no próprio papel de filtro. A turbidez da amostra é superior a 1000 NTU, ou seja, se apresentou em um nível superior no qual foi demonstrado não ser possível a determinação com a precisão, exatidão e linearidade exigidas. A alcalinidade encontrada foi de 82,5 mg/L CaCO<sub>3</sub>. Esta alcalinidade pode estar relacionada ao valor relativamente alto de PPC de 2,6% encontrado na análise química da amostra. A demanda química de oxigênio (DQO) e o oxigênio dissolvido (OD) da amostra foram, respectivamente, 99 mg/L e 8,65 mg/L O<sub>2</sub>. O pH levemente alcalino pode estar relacionado à presença de NaOH na água de recirculação, já que essa base é um regulador de pH comumente utilizado para flotação reversa de minério de ferro onde o pH desse processo se encontra na faixa de 10,5. O valor de eH negativo significa que a amostra é um ambiente redutor. Essa observação é corroborada pela análise química onde há presença de metais com maior poder de agente redutor (cede elétrons) como o potássio (K), cálcio (Ca), sódio (Na), alumínio (Al), zinco (Zn) e ferro (Fe). A amostra não possui nenhum odor não-característico de uma lama de minério de ferro e não foi observado a presença de óleos, graxas, espumas ou matérias flutuantes.

Quando comparados os resultados obtidos da caracterização da amostra com os parâmetros exigidos para a classificação dos corpos de água Classe II e CONAMA 430, pode-se observar que o valor dos sólidos sedimentáveis e da turbidez são os que apresentam maior discrepância. Esse alto valor deve-se ao fato que a amostra é proveniente da alimentação do espessador de lamas, logo não houve a remoção dos sólidos que acarretam a turbidez da amostra.

## 5.2 Caracterização dos Minerais Puros Utilizados nos Ensaio

Após a análise dos resultados da amostra da alimentação do espessador de lamas foi possível observar que os dois minerais majoritários presentes foram a hematita e o quartzo.

O resultado da distribuição granulométrica da amostra de hematita utilizada nos ensaios de agregação está apresentado na Figura 5.3.

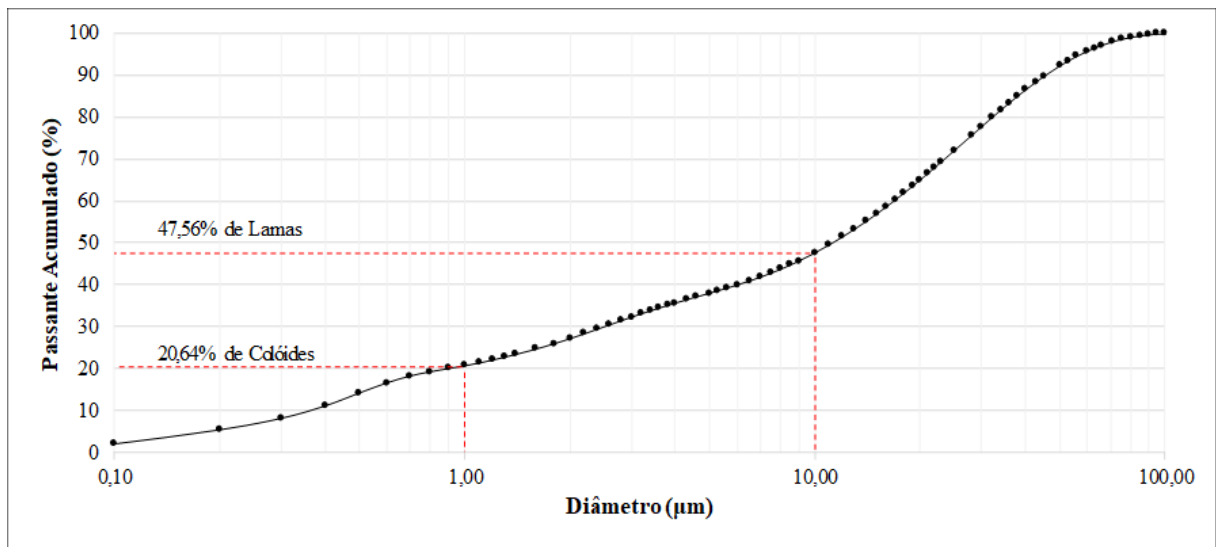


Figura 5.3 Distribuição granulometria da amostra de hematita

A hematita apresentou  $D_{90}$  de 45,76 µm e um diâmetro médio de 11,27 µm. A densidade dos sólidos encontrada utilizando picnômetro a gás foi de 5,3 g/cm<sup>3</sup>.

A composição mineralógica da hematita, feita através de difratômetro de raios X (DRX) e observada na Figura 5.4, indica que a amostra de hematita apresenta a pureza necessária para os ensaios.

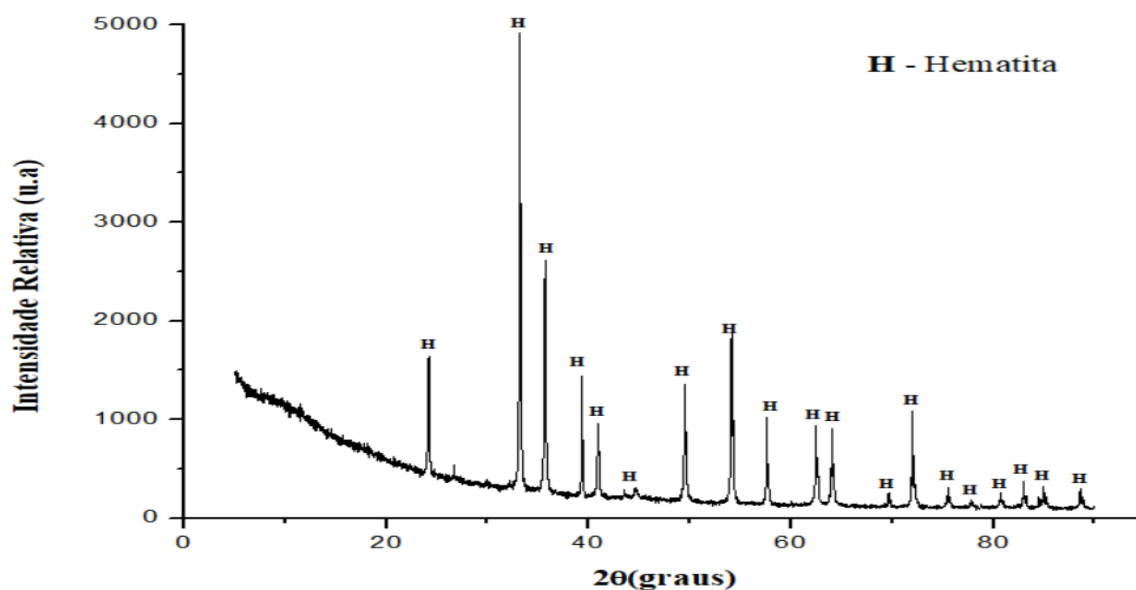


Figura 5.4: Difratograma da amostra de hematita

A curva da análise granulométrica do quartzo está apresentada na Figura 5.5.

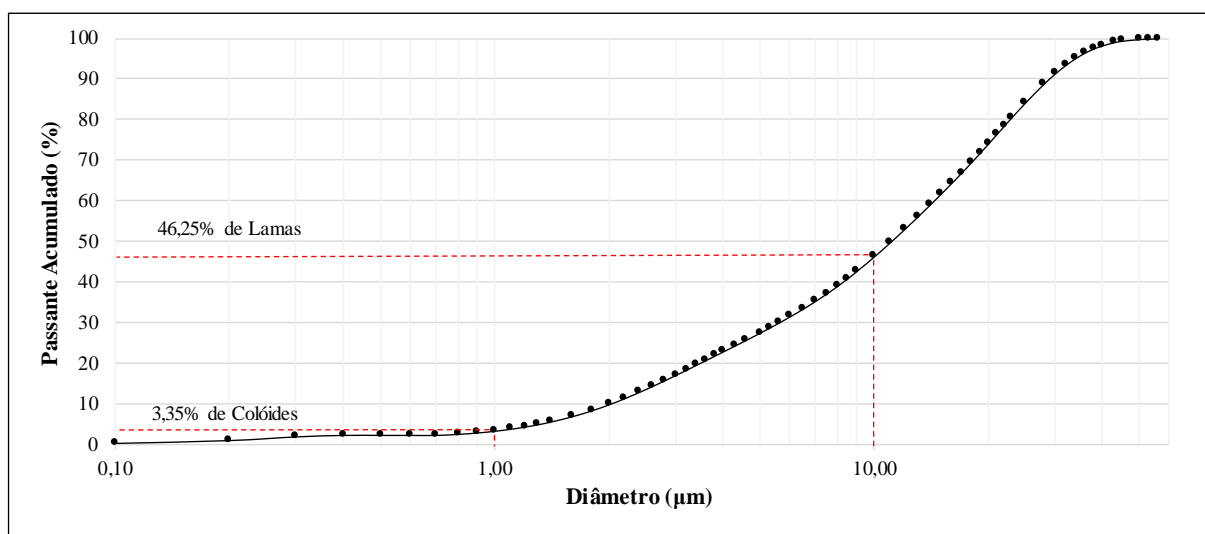


Figura 5.5: Distribuição granulométrica da amostra de quartzo

O quartzo apresentou um  $D_{90}$  de 28,94  $\mu\text{m}$  e um diâmetro médio de 13,52  $\mu\text{m}$ . A densidade dos sólidos encontrada utilizando picnômetro a gás foi de 2,66  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

A composição mineralógica do quartzo, feita através de difratômetro de raios X (DRX) e observada na Figura 5.6, indica que a amostra de quartzo apresenta a pureza necessária para os ensaios.

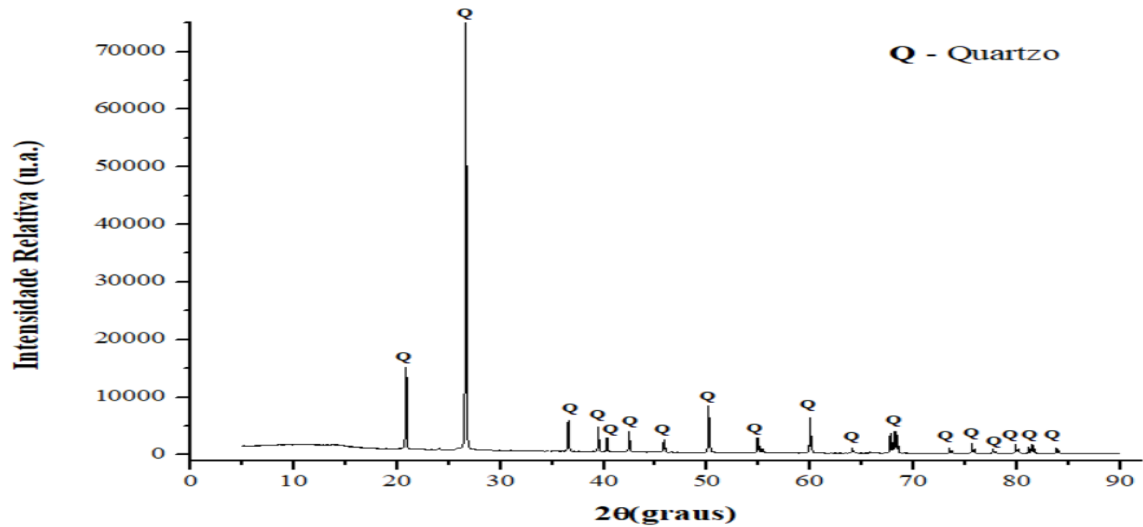


Figura 5.6: Difratograma do quartzo

### 5.3 Ensaios de Agregação

Os ensaios de agregação tanto para o quartzo quanto para a hematita foram realizados em duplicata para os valores de pH 6, 7, 8 e 9 com dosagem 1 mg/L, 10 mg/L e 100 mg/L para todos os amidos modificados. Baseado na Lei de Stokes, foi determinado um tempo de sedimentação de 4 minutos para o quartzo e 2 minutos para a hematita. Nos testes com poliácridamida foi utilizada a dosagem aplicada industrialmente de 1 mg/L, e os resultados foram considerados como o padrão de comparação para todos os testes de agregação utilizando amido. Foram realizados também testes em branco (sem adição de nenhum reagente) para observar a sedimentação natural desses minerais.

#### 5.3.1 Ensaios de Agregação para Amostra de Hematita Pura

Para os testes de agregação da hematita na dosagem 1 mg/L dos amidos modificados (Figura 5.7) o maior valor de material sedimentado (97,81%) para os amidos foi obtido utilizando o amido catiônico reticulado em pH 8. No pH 9 o amido catiônico reticulado obteve o melhor resultado (95,04%) seguido do resultado do amido catiônico pré-gelatinizado com (92,25%) de sólidos sedimentados. O amido ceroso foi o mais eficiente apenas no pH 7. Os resultados obtidos com a poliácridamida apresentaram os maiores valores de material sedimentado de todos os reagentes na dosagem 1mg/L para todos os pH (99,29% no pH 6, 99,52% no pH 7, 99,03% no pH 8 e 98,42% no pH 9).

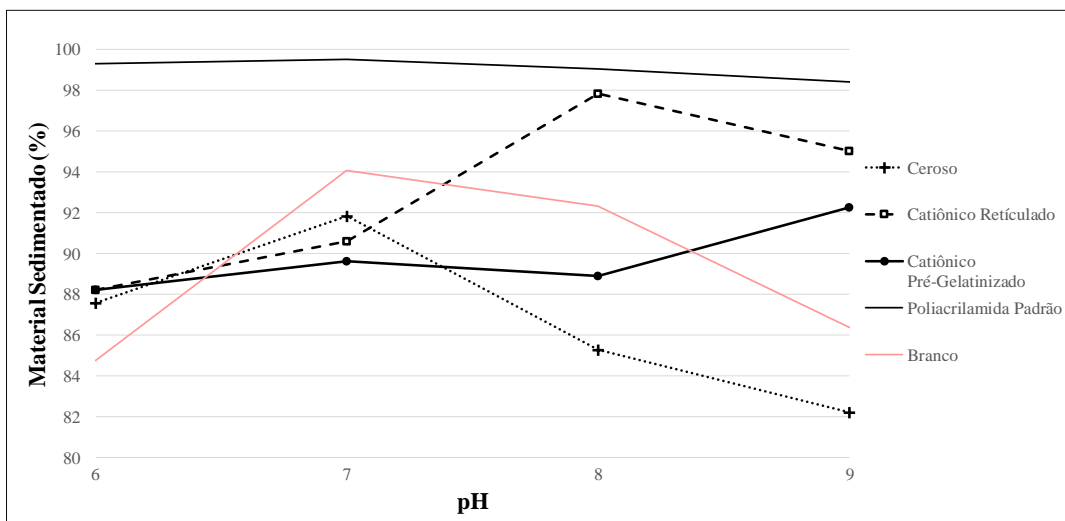


Figura 5.7: Porcentagem de hematita sedimentada em função do pH da polpa sem reagente e com dosagem de 1mg/L dos reagentes testados

Os testes de agregação da hematita realizados com dosagem dos amidos de 10 mg/L em diferentes valores de pH (Figura 5.8) apresentaram, maiores porcentagens de sólidos sedimentados quando comparados a dosagem de 1 mg/L. A porcentagem de sólidos sedimentados obtidos para os testes utilizando o amido reticulados e o amido catiônico pré-gelatinizado nos valores de pH  $\geq 7$ , de modo geral, foram superiores a 98%. O teste com o amido pré-gelatinizado no pH 7 possui o valor de material sedimentado (98,97%) um pouco maior que os pH 8 e 9, 97,61% e 98,80% respectivamente. Foi observado que visualmente os testes em pH 9 possuíam um sobrenadante com maior turbidez que para os demais valores de pH. O mesmo foi observado para o amido catiônico reticulado também no pH 9.

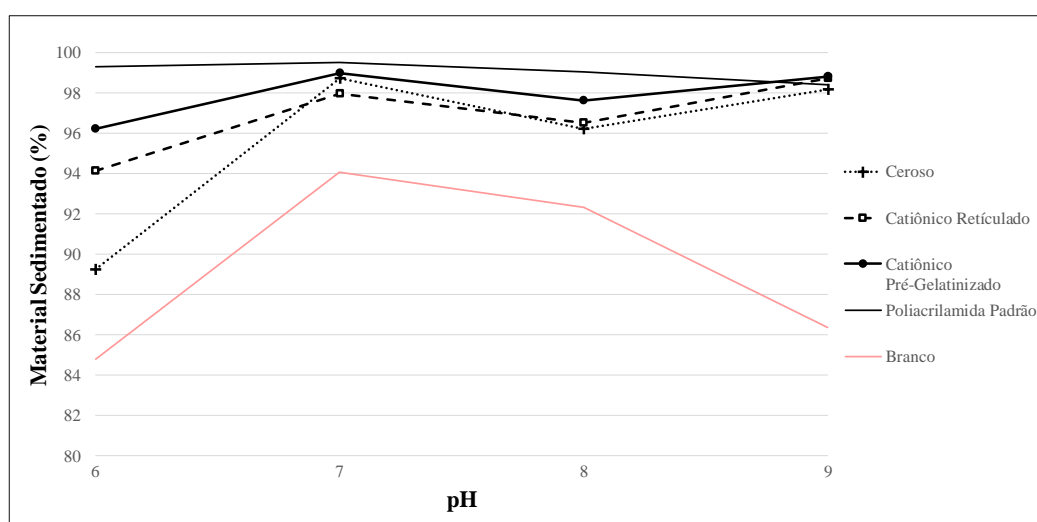


Figura 5.8: Porcentagem de hematita sedimentada em função do pH da polpa sem reagente e com dosagem de 10 mg/L dos amidos testados

Quando utilizada a dosagem de 100mg/L dos amidos para os testes de agregação da hematita (Figura 5.9) apenas 1 resultado foi maior que o resultado da dosagem de 10 mg/L do amido catiônico pré-gelatinizado em pH 7. Ainda assim, em geral, os demais resultados obtidos apresentaram uma melhora na eficiência quando comparados com a dosagem 10 mg/L. O amido catiônico pré-gelatinizado obteve os melhores valores de material sedimentado para quase todos os valores de pH testados (sempre acima de 98) mas, nos valores de pH 6, 7 e 8 os outros amidos testados também chegaram a valores em torno de 98% das partículas de hematita sedimentadas. Visualmente, o sobrenadante do amido catiônico pré-gelatinizado possuiu melhor qualidade que o sobrenadante dos demais amidos.

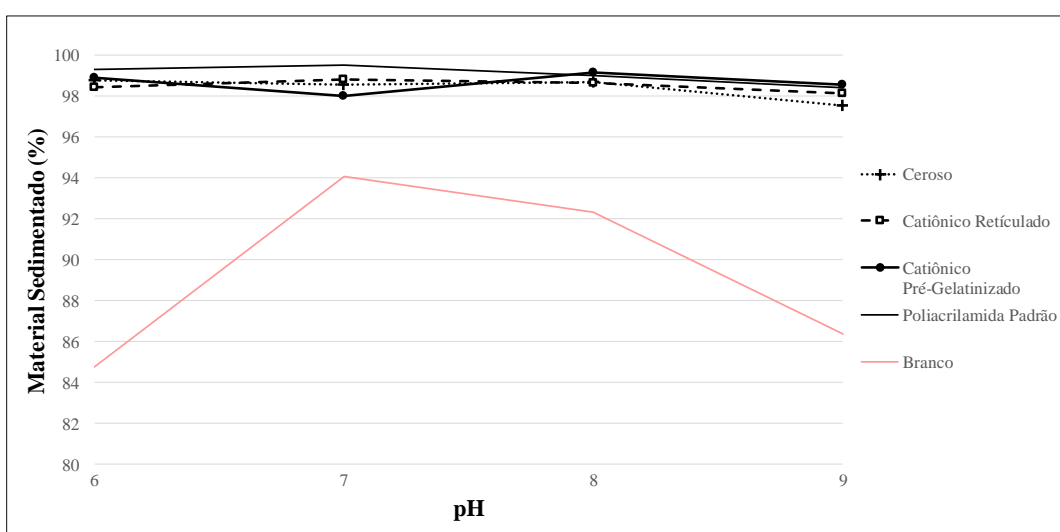


Figura 5.9: Porcentagem de hematita sedimentada em função do pH da polpa sem reagente e com dosagem de 100 mg/L dos amidos testados

### 5.3.2 Ensaios de Agregação para Amostra de Quartzo Puro

Nos testes de agregação do quartzo com a dosagem 1 mg/L dos amidos modificados estudados (Figura 5.10) foi possível observar que não houve floculação do mineral independente do pH e com nenhum dos reagentes. Analisando os resultados obtidos nos testes em branco e com reagentes, é possível observar persistência natural do quartzo em se manter suspenso na solução. A poliacrilamida apresentou os piores resultados em quase todos os pH, não passando de 50% de sólidos sedimentados.



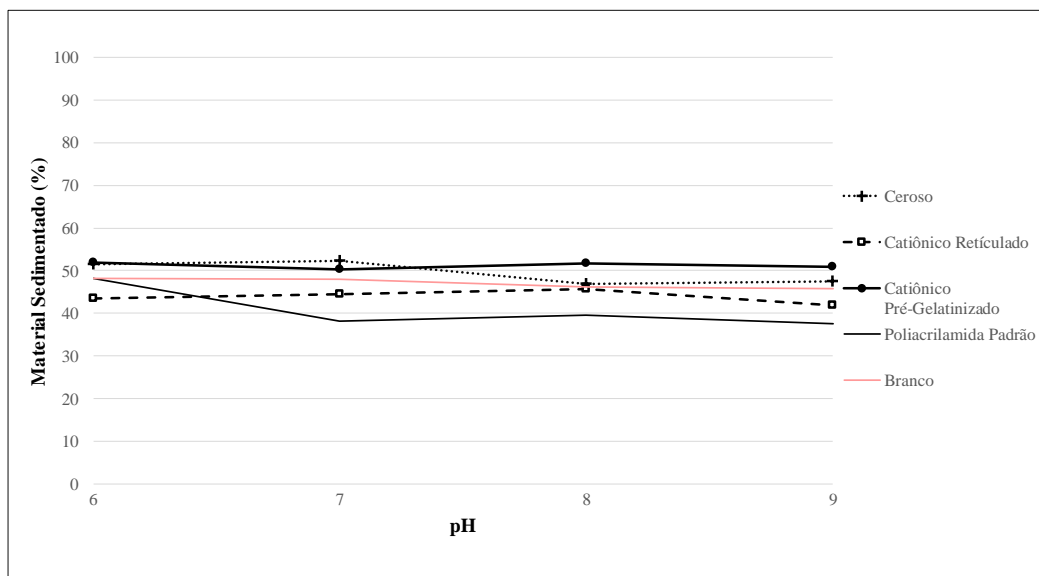


Figura 5.10: Porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa sem reagente e com dosagem de 1 mg/L dos amidos testados

Na dosagem de 10 mg/L dos amidos modificados testados, somente o amido catiônico pré-gelatinizado obteve resultados satisfatórios (superiores a 97%) para todos os valores de pH testados Figura 5.11.

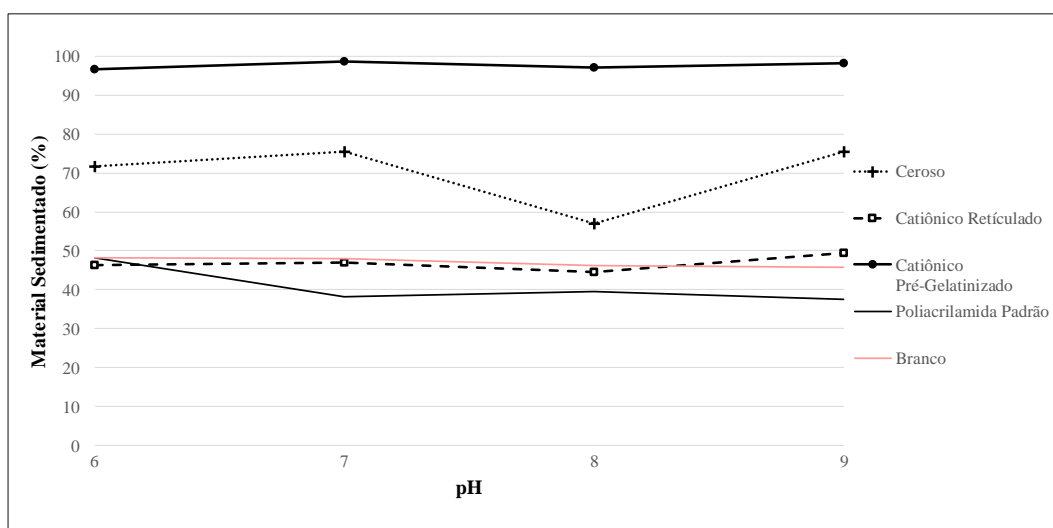


Figura 5.11: Porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa sem reagente e com dosagem de 10 mg/L dos amidos testados

Nos testes de agregação do quartzo com dosagem 100 mg/L (Figura 5.12) houve uma melhora significativa da eficiência do amido catiônico reticulado para sedimentação das partículas de quartzo com valores de material sedimentado chegando a 98% no pH 6 e 7. Entretanto os melhores resultados foram novamente do amido catiônico pré-gelatinizado para todos os valores de pH testado, com material sedimentado de 99%.

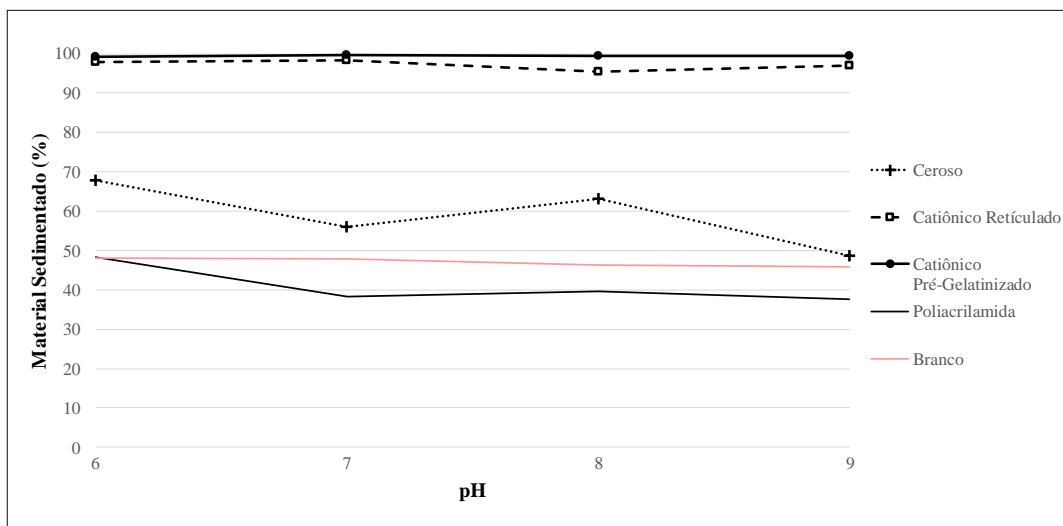


Figura 5.12: Porcentagem de quartzo sedimentado em função do pH da polpa sem reagente e com dosagem de 100 mg/L dos amidos testados

### 5.3.3 Análise Geral dos Testes de Agregação dos Minerais Majoritários Puros

Durante a realização dos testes de agregação realizados para as amostras de hematita e quartzo puros foi observado a formação de flocos maiores com o aumento das dosagens dos amidos modificados. Ainda assim, a poliacrilamida foi responsável pela formação de flocos maiores e mais viscoso. Os flocos da poliacrilamida aparentavam possuir maior retenção de água quando comparado ao amido catiônico pré-gelatinizado.

Uma vez analisados todos os resultados dos testes de agregação, é possível inferir que:

- Nas faixas de pH estudadas, a poliacrilamida com dosagem 1 mg/L é capaz de flocular a hematita, mas o mesmo não foi observado para o quartzo;
- O amido catiônico reticulado obteve bons resultados para a hematita nas dosagens 10 e 100 mg/L porém houve apenas resultados satisfatórios pro quartzo na dosagem 100 mg/L;
- O amido catiônico pré-gelatinizado foi o amido modificado de melhor resultado quanto a porcentagem de material sedimentado tanto para a hematita quanto para o quartzo nas dosagens 10 e 100 mg/L.
- Foi considerado o custo-benefício quando optou-se por escolher o amido pré-gelatinizado na dosagem 10 mg/L em pH 7 como o de melhor resultado, uma vez que

os valores eram muito próximo aos resultados com 100 mg/L porém com dosagem 10 vezes menor.

#### 5.3.4 Ensaios de Agregação para Mistura Hematita e Quartzo

Foi realizado então o teste agregação utilizando a mistura de 70% de hematita pura e 30% quartzo puro em pH 7 (valores obtidos a partir do resultado da análise química da amostra de alimentação do espessador de lammas) com o intuito de analisar se a competitividade entre os minerais majoritários da amostra afetaria a eficiência do floculante. Foram utilizadas as dosagens de 10 mg/L para o amido catiônico pré-gelatinizado, de 1 mg/L para a poliacrilamida e teste na ausência de reagente (branco). Os resultados de porcentagem de material sedimentado encontrados com a utilização do amido e da poliacrilamida foram muito similares, como mostra a Tabela 5.5. De acordo com os resultados, é possível inferir que para esses testes não houve influência da competitividade entre a hematita e quartzo puro.

Tabela 5.5: Teste de agregação da mistura hematita-quartzo

<b>Amido Catiônico Pré-Gelatinizado (10 mg/L)</b>	<b>Poliacrilamida Padrão (1 mg/L)</b>	<b>Branco</b>
99,00%	98,96%	88,46%

#### 5.4 Medidas de Potencial Zeta

Como observado anteriormente, o amido catiônico pré-gelatinizado na dosagem 10 mg/L obteve os melhores resultados de porcentagem de material sedimentado. Logo, foi feita a determinação do potencial zeta, através do método de eletroforese, da hematita e quartzo na presença e ausência do amido catiônico pré-gelatinizado.

Os valores de potencial zeta da hematita na presença apenas de eletrólito indiferente ( $\text{NaNO}_3$ ) estão apresentados na Figura 5.13. O valor do ponto isoelétrico (PIE) para a hematita foi por volta de pH 4,5. A diferença observada entre o valor de PIE encontrado experimentalmente e o da literatura se deve a vários fatores, como: diferença mineralógica entre as amostras e impurezas presentes. Para os ensaios de medida de potencial zeta na presença do amido catiônico pré-gelatinizado (Figura 5.13), o amido modificou os valores do potencial zeta da

hematita comprovando a interação do mineral com o amido. O PIE da hematita antes encontrado aproximadamente no pH 4,5 se deslocou para a direita, aproximadamente no pH 11. Na presença do amido testado, o potencial zeta da hematita manteve-se sempre positivo. Infere-se que haja adsorção química do amido catiônico com a superfície da hematita, já que nota-se que há reversão e aumento no valor do potencial zeta. A menor densidade de carga da hematita quando comparada ao quartzo também pode reforçar esta conjectura. As camadas de saturação do amido catiônico sobre a hematita e a dependência do pH das películas de saturação também parecem ser menores quando comparados com a interação deste reagente com o quartzo (Lima, 1997).

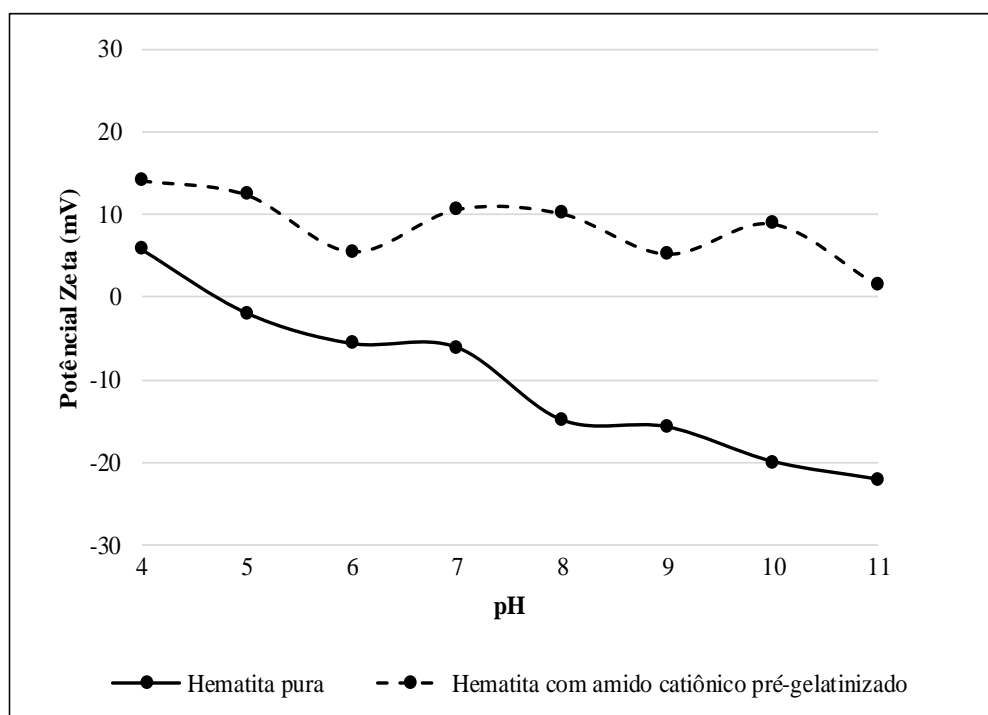


Figura 5.13: Potencial zeta da hematita condicionada com eletrólito indiferente ( $\text{NaNO}_3$ ) e hematita na presença de amido catiônico pré-gelatinizado.

Como pode ser observado na Figura 5.14, os potenciais zeta do quartzo condicionado com água destilada apresentaram valores negativos e crescentes em função do aumento do pH. Os valores de potencial zeta do quartzo condicionado com o amido catiônico foram próximos e positivos. O ponto isoelétrico do quartzo antes abaixo do pH 4 foi deslocado para próximo ao pH 11 com a presença do amido testado. Essa observação coincide com os resultados dos testes de agregação do quartzo com amido catiônico pré-gelatinizado uma vez que o pH não interferiu na eficiência da sedimentação. A dependência do pH para interação do quartzo com o amido catiônico parece ser menor que para a hematita. A superfície do quartzo quando comparada a da hematita, de modo geral, apresenta uma maior densidade de cargas.

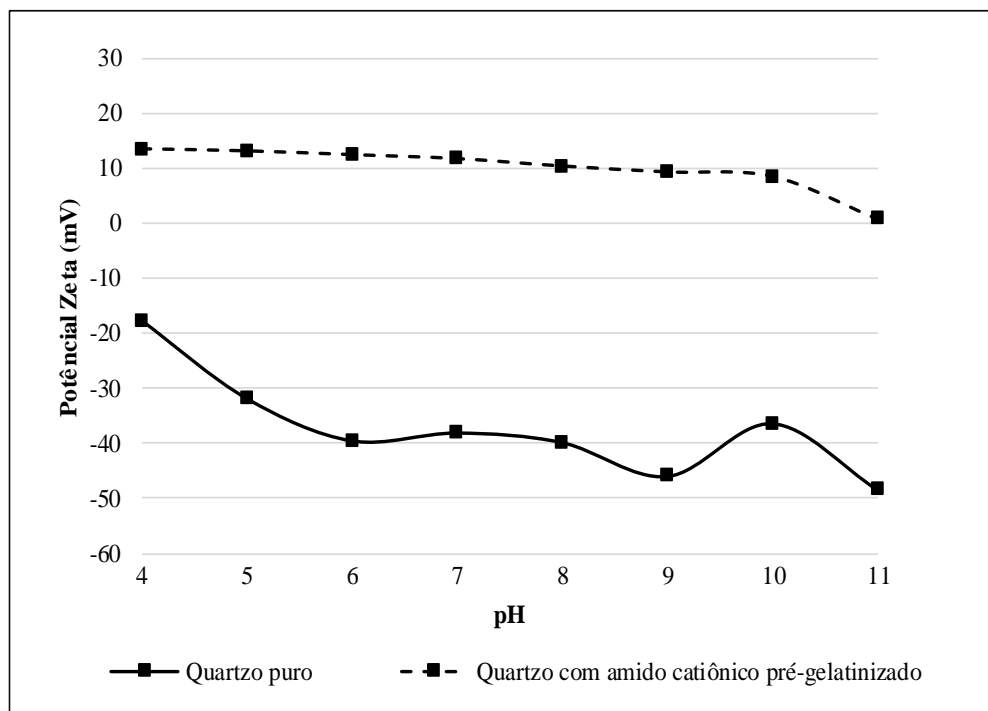


Figura 5.14: Potencial zeta do quartzo condicionado com eletrólito indiferente ( $\text{NaNO}_3$ ) e quartzo na presença de amido catiônico pré-gelatinizado.

## 5.5 Ensaios de *Jar Test*

A realização dos ensaios de *Jar Test* utilizando a amostra da alimentação do espessador de lama teve como objetivo observar a influência das variáveis dosagem, tempo de agitação e tempo de sedimentação na turbidez e cor aparente final do sobrenadante da amostra, encontrando por fim os valores otimizados para essas variáveis. De acordo com os resultados dos testes de agregação realizados previamente nesse trabalho, foi decidido analisar o desempenho das dosagens de 10 mg/L e a dosagem intermediárias de 50 mg/L, esse último valor tendo sido baseado nos resultados obtidos por Orumwense e Nwachukwu (2000). Foi realizado também um teste padrão utilizando poliacrilamida na dosagem utilizada industrialmente de 1 mg/L.

Os resultados da turbidez dos sobrenadantes podem ser observados na Figura 5.15. Com 20 minutos de agitação, pode-se observar que o aumento do tempo de sedimentação não influenciou nos resultados da dosagem 50 mg/L e melhorou os resultados de turbidez do sobrenadante da dosagem 10 mg/L. Essa mesma observação pode ser feita para os testes com

10 minutos de agitação. Porém, os resultados da dosagem 10 mg/L foram significativamente piores e os da dosagem 50 mg/L ligeiramente melhores, quando comparados ao primeiro tempo de agitação.

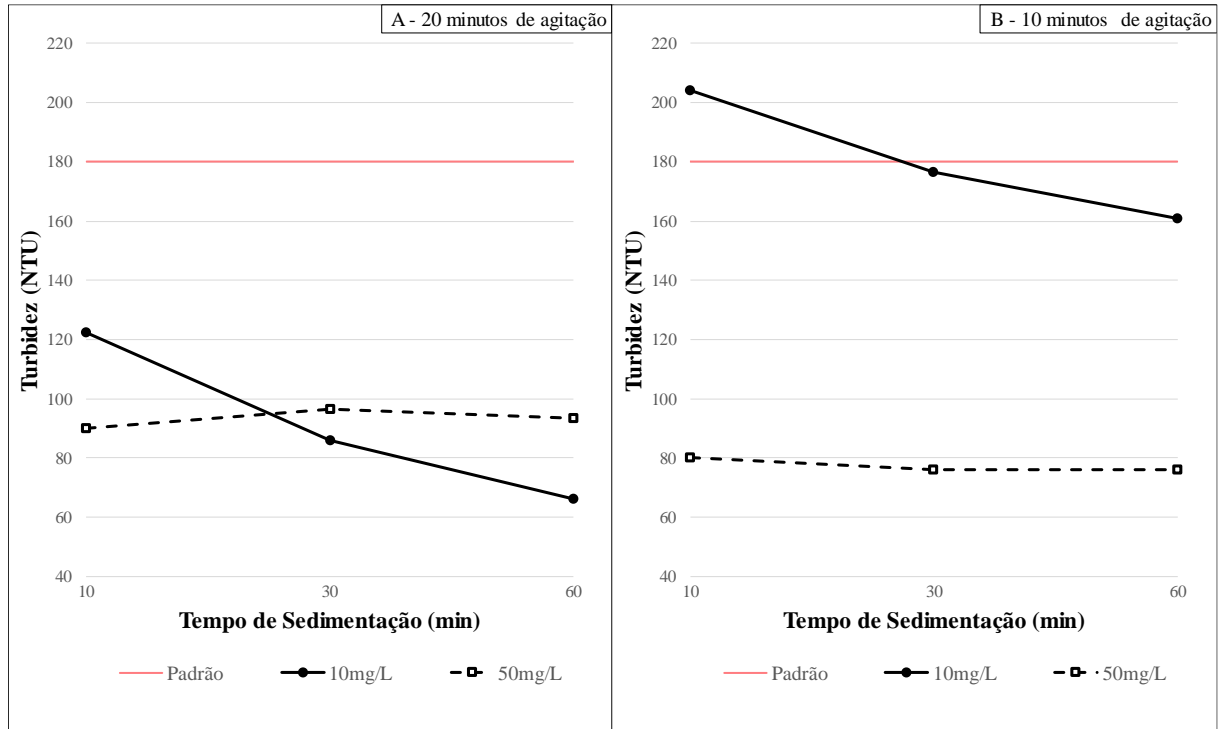


Figura 5.15: Turbidez dos sobrenadantes dos ensaios de *Jar Test* utilizando o amido catiônico pré-gelatinizado com dosagem 10 e 50 mg/L e poliacrilamida com dosagem 1 mg/L.

Ao analisar os resultados obtidos para a cor aparente dos sobrenadantes (Figura 5.16), observa-se a mesma tendência descrita anteriormente para a turbidez quando o tempo de agitação é de 20 minutos. A principal diferença nos resultados com tempo de agitação de 10 minutos está na tendência do aumento da cor aparente de acordo com aumento do tempo de sedimentação, sendo o tempo de 60 minutos onde foram encontrados os piores resultados para as três dosagens.

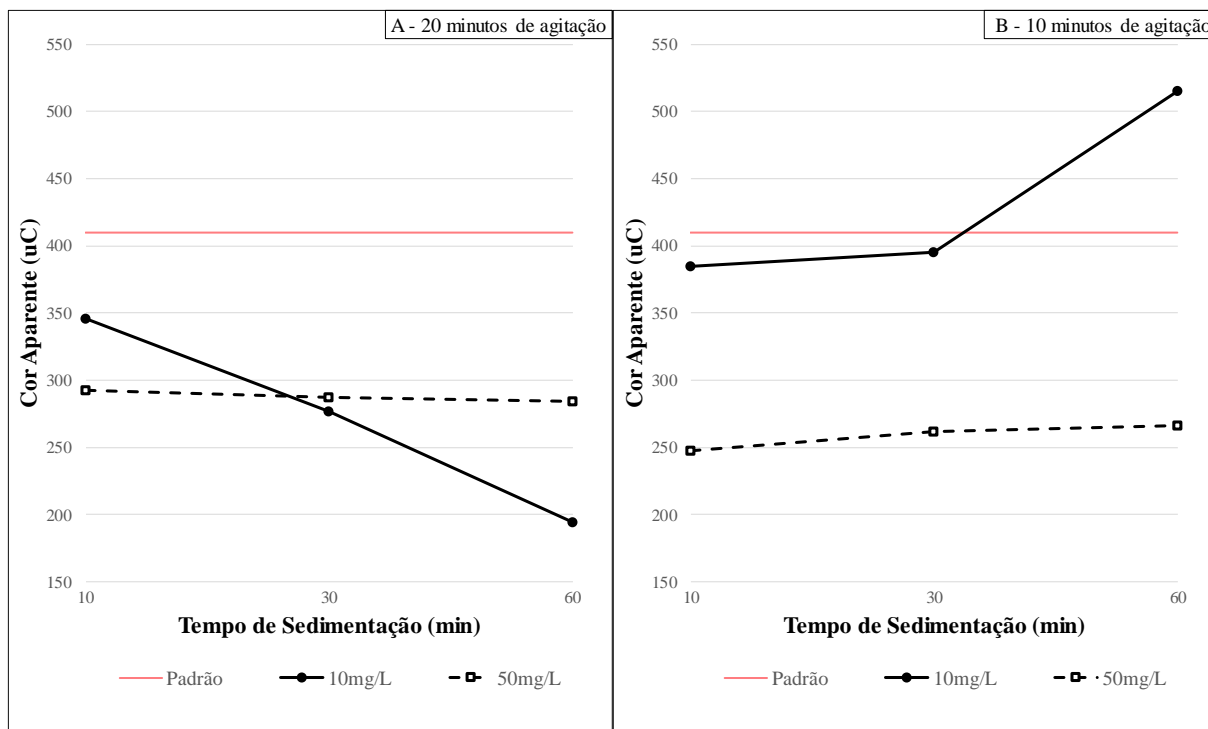


Figura 5.16: Cor aparente dos sobrenadantes dos ensaios de *Jar Test* utilizando o amido catiônico pré-gelatinizado com dosagem 10 e 50 mg/L e poliacrilamida com dosagem 1 mg/L.

Na dosagem 10 mg/L foi possível encontrar os menores valores de turbidez e cor aparente entre todos os testes: 66 NTU (Resultado A) e 194,5 uC. Porém, o tempo de agitação foi o padrão de 20 minutos e o tempo de sedimentação foi o mais alto de 60 minutos. Na dosagem 50 mg/L, o tempo de agitação e de sedimentação puderam ser reduzidos para 10 minutos tendo uma turbidez e cor aparente do sobrenadante de 80 NTU (Resultado B) e 247,5 uC, respectivamente. Por fim, foi realizado um último teste com dosagem 50 mg/L, tempo de agitação 10 minutos e diminuindo o tempo de sedimentação para 5 minutos. Os resultados encontrados – turbidez de 80 NTU (Resultado C) e cor aparente de 235 uC – foram extremamente similares aos resultados com 10 minutos de sedimentação, otimizando mais ainda essa variável. Esses valores de turbidez e cor aparente são menores do que os valores encontrados para o padrão da poliacrilamida: 180 NTU (Resultado Padrão) e 410 uC.

Quando comparamos os resultados acima com a turbidez indicada para cada classe proposta pela CONAMA 357/2015 (Tabela 5.6), percebe-se que os valores da amostra inicial e do resultado padrão (poliacrilamida 1 mg/L) não se adequam à classificação de água Classe II. Mas, quando é utilizado o amido catiônico pré-gelatinizado como floculante, obtêm-se um resultado abaixo do exigido.

Tabela 5.6: Comparação dos valores de turbidez (NTU) encontrados com a CONAMA 357/2015 Classe II

<b>Classe II</b>	<b>Amostra Inicial</b>	<b>Resultado Padrão</b>	<b>Resultado A</b>	<b>Resultado B</b>	<b>Resultado C</b>
≤100	>1000	180	66	80	80

A eficiência de floculação e qualidade do sobrenadante é fundamental na etapa de espessamento de lamas para que a água recuperada possa ser reutilizada nos processos de beneficiamento mineral a úmido, reduzindo a necessidade de captação de água nova e consequentemente diminuindo o impacto ambiental das usinas.



## 6 CONCLUSÕES

A caracterização da amostra da alimentação do espessador de lamelas foi realizada com o objetivo de analisar não apenas suas propriedades granulométricas, química e mineralógicas como também seus parâmetros de qualidade para comparação com a CONAMA 357/2005 Classe II. Observou-se uma amostra constituída principalmente de hematita (70%), quartzo (23,6%) e alumina (3,1%). A amostra possuía composição granulométrica de 49,97% de lamelas (menor que 10  $\mu\text{m}$ ) e 7,67% de colóides (menor que 1  $\mu\text{m}$ ) com um total aproximado de 5% de sólidos. Dos parâmetros de qualidade analisados, apenas sua turbidez ( $>1000$ ) e sólidos sedimentáveis (1 mL/L) estavam acima dos exigidos pela CONAMA 357/2005 Classe II.

A caracterização granulométrica dos minerais majoritários puros indicou que a amostra de hematita era composta por 47,56% de partículas abaixo de 10  $\mu\text{m}$  e a amostra de quartzo era composta por 46,25%.

Os testes de agregação evidenciaram que:

- O amido catiônico pré-gelatinizado foi o amido modificado de melhor resultado quanto a porcentagem de material sedimentado tanto para a hematita quanto para o quartzo na dosagem 10 mg/L no pH 7.
- O amido catiônico reticulado obteve bons resultados para a hematita nas dosagens 10 e 100 mg/L, porém houve apenas resultados satisfatórios para o quartzo na dosagem 100 mg/L;
- O amido ceroso não apresentou resultados satisfatórios para nenhum dos minerais, independente das dosagens e pH.
- Foram encontrados valores de resultados similares para os testes de agregação utilizando os minerais majoritários puros separadamente e a mistura de ambos utilizando amido catiônico pré-gelatinizado com dosagem 10 mg/L e pH 7.
- A poliacrilamida é um flocculante eficaz para hematita, porém o mesmo não foi observado para o quartzo;

Os resultados dos testes de eletroforese (potencial zeta) corroboram a hipótese de que o sistema parece ser de adsorção química.

Nos ensaios de *Jar Test* foram encontrados 2 resultados ótimos utilizando o amido catiônico pré-gelatinizado:

- Resultado A: Dosagem de 10 mg/L, 20 minutos de tempo de agitação e 60 minutos de tempo de sedimentação
- Resultado B: Dosagem de 50 mg/L, 10 minutos de tempo de agitação e 10 minutos de tempo de sedimentação

O tempo de sedimentação do Resultado B pode ser otimizado ainda mais para 5 minutos. Porém, é necessário a realização de estudos futuros de viabilidade técnica e econômica para analisar qual dos resultados poderia ser aplicado com melhor eficiência no processo de espessamento de lamas de minério de ferro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGI. **Dictionary of mining, mineral, and related terms**. 2.ed. Alexandria: American Geological Institute, 1997.

ALCÁZAR-ALAY, S. C.; MEIRELES, M. A. A. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. **Food Science and Technology**, v. 35, n.2, p. 215-236, 2015.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21.ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.

ARINAITWE, E.; PAWLIK, M. A role of flocculant chain flexibility in flocculation of fine quartz. Part I. Intrinsic viscosities of polyacrylamide-based flocculants. **International Journal of Mineral Processing**, v. 124, p. 50-57, 2013.

ATTIA, Y. A. Flocculation. In.: LASKOWSKI, J. S.; RALSTON, J. (eds.). **Colloid Chemistry in Mineral Processing**. Amsterdã: Elsevier Science Publishers B.V., 1992. p. 277-308.

BEZERRA, C. G. **Caracterização do rejeito de minério de ferro (IOT) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 053, p. 58-63, mar. 2005.

BRASIL. Conselho Estadual De Política Ambiental; Conselho Estadual De Recursos Hídricos De Minas Gerais. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERHMG nº1, de 05 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento e estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Diário do Executivo – “Minas Gerais”**, Belo Horizonte, 13 de maio de 2008.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 92, p. 89, mai. 2011.

BRATBY, J. **Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment**. 2.ed. Londres: IWA Publishing, 2006.

CAMPOS, J. R.; VIEIRA, M. B. S.; VILLELA, L. M. O. Comparação da eficiência de amido de diversas fontes naturais, quando empregado como auxiliar de floculação de águas para abastecimento. **Revista DAE**, v. 44, n. 137, p. 144-149, 1984.

CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros**. 2.ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2006.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**: desaguamento, espessamento e filtragem. 3.ed. São Paulo: Signus Editora, 2010.

CHIBOWSKI, S.; WIŚNIEWSKA, M. Study of electrokinetic properties and structure of adsorbed layers of polyacrylic acid and polyacrylamide at Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-polymer solution interface. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 208, n. 1-3, p. 131-145, 2002.

COELHO, T. M.; PARAGUAIO, T.; SANTOS NETO, J. B. S; ASSAD FILHO, N.; LUDEWIG, D. R. Estudo comparativo da floculação entre amido catiônico e amido interligado catiônico. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30, 2010, São Carlos-SP. **Maturidade e Desafios da Engenharia de Produção**: competitividade das empresas, condições de trabalho, meio ambiente. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2010.

DAS, S. K.; KUMAR, S. RAMACHANDRARAO, P. Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles. **Waste Management**, v. 20, n. 8, p. 725-729, 2000.

DASH, M.; DWARI, R. K.; BISWAL, S. K.; REDDY, P. S. R.; CHATTOPADHYAY, P.; MISHRA, B. K. Studies on the effect of flocculant adsorption on the dewatering of iron ore tailings. **Chemical Engineering Journal**, v. 173, n. 2, p. 318-325, 2011.

DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P. Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas. **Ciência Rural**, v. 39, n. 3, p. 945-954, 2009.

DI BERNARDO, A. S. **Influência das condições de aplicação de polímeros catiônicos na eficiência da floculação**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

EBEWELE, R. O. **Polymer science and technology**. 1.ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.

FIORENTINI, V. **Uso do tanino no processo de tratamento de água como melhoria em sistema de gestão ambiental**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

GALEŠA, K.; BREN, U.; KRANJC, A.; MAVRI, J. Carcinogenicity of Acrylamide: A Computational Study. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 18, p. 8720-8727, 2008.

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. A.; PERES, A. E. C. Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro. **Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 2, p. 233-236, 2011.

GOODWIN, J. **Colloids and interfaces with surfactants and polymers**. Sussex do Oeste: John Wiley & Sons Ltd, 2004.

GREGORY, J. Effects of polymers on colloid stability. In: IVES, K.I. (ed.). **The scientific basis of flocculation**. Alphen aan den Rijn: Sijthoff and Noordhoff International Publishers B.V, 1978. p. 101–130.

IURCKEVICZ, G. **Utilização de amido reticulado como matriz para imobilização do fármaco diclofenaco de sódio**. 2014. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco.

HOGG, R. Flocculation and dewatering. **International Journal of Mineral Processing**, v. 58 n. 1-4, p. 223-236, 2000.

IBRAM. **Royalty: mineradoras recolhem mais CFEM em 2018**. Instituto Brasileiro de Mineração, 2018. Disponível em: <<http://portaldamineracao.com.br/ibram/royalty-mineradoras-recolhem-mais-cfem-em-2018/>>. Acesso em: 3 mai. 2018.

JIN, R.; HU, W.; HOU, X. Mechanism of selective flocculation of hematite from quartz with hydrolyzed polyacrylamide. **Colloids and Surfaces**, v. 26, p. 317-331, 1987.

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

KHANGAONKAR, P. R.; BALA SUBRAMANI, K. J. Flocculation of hematite fines by anionic polyacrylamide polymers. **Minerals Engineering**, v. 6, n. 7, p.765-774, 1993.

LEONEL, M.; CEREDA, M. P.; SARMENTO, S. B. S. Processamento de araruta (*Maranta arundinacea*) para extração e caracterização da fração amilácea. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 5, p. 151-155, 2002.

LI, C.; SUN, H.; BAI, J.; LI, L. Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings Part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting. **Journal of Hazardous Materials**, v. 174. 1-3, p. 71-77, 2010.

LIMA, R. M. F. **Adsorção de amido e amina na superfície da hematita e quartzo, e sua influência na flotação**. 1997. Tese (Doutorado em Tecnologia Mineral) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

LOPES, M. A. **Avaliação de diferentes coagulantes para remoção de sólidos por flotação e sedimentação de água residuária de uma indústria metal-mecânica**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MA, X.; BRUCKARD, W. J. The effect of pH and ionic strength on starch-kaolinite interactions. **International Journal of Mineral Processing**, v. 94, n. 3-4, p. 11-114, 2010.

MARINELLI, P. S.; FROLLINI, E.; DI BERNARDO, A.S.; DI BERNARDO, L. Emprego de amidos de milho catiônico comum e híbrido como auxiliares de coagulação/floculação. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27, 2000, Porto Alegre-RS. **Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 2000.

MARTINS, M.; LIMA, N. P.; LEAL FILHO, L. S. Depressão de minerais de ferro: influência da mineralogia, morfologia e pH de condicionamento. **Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 3, p. 393-399, 2012.

MOREIRA, W. R. **Fontes de amido aplicáveis à flotação de minério de ferro**. 2013. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MURAKAMI, M. F.; MORUZZI, R. B. Avaliação do amido natural como alternativa simples para tratamento de águas pluviais para fins de aproveitamento não potável. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 12, n. 20, p. 1-13, 2012.

NEBO, C. O.; NWAJIOBI, H.; ANEKE, N. A. G.; FUERSTENAU, M. C. A study of the flocculation of pure goethite, quartz, and kaolinite and the selective flocculation of Agbaja iron ore Part 1. Adsorption of cassava starch on pure goethite, quartz, and kaolinite. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 17, n. 1, p. 1-12, 1996.

NGAKFUMBE, J. **The use of organic polymers in the chemical purification of peat derived runoff water**. 2013. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento de Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Oulu, Oulu.

OLIVEIRA, M. F. M.; **Poliacrilamidas na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 2016. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 50, n. 316, p. 324-330, 2004.

ORUMWENSE, O. F. F. Dispersion – Flocculation studies on a goethite-clay system. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 60, n. 4, p. 405-411, 1994.

ORUMWENSE, F. F. O.; NWACHUKWU, J. C. Flocculation studies on hematite-silica system using polymeric flocculants. **Indian Journal of Chemical Technology**, v. 7, p. 23-29, 2000.

PEÇANHA, E. R.; ALBUQUERQUE, M. D. F.; SCHNEIDER, C. L.; LEAL FILHO, L. S.; MONTE, M. B. M. Estudos das forças que envolvem a interação de amido em quartzo e em hematita pela teoria DLVO. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 27, 2017, Belém-PA. **Anais XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**. ENTEMME, 2017.

PENNA, K. S. F. **Remoção de óleo do meio filtrante no processo de retrolavagem em filtros de areia**. 2009. Tese (Doutorado em Metalurgia de Extração) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. São Paulo: ABES, 2006. cap. 6.

QUIROGA, A. L. B. Amidos. **Food Ingredients Brasil**, n. 35, p. 31-56, 2015.

RAMACHANDRAN, R.; SOMOSUNDARAN, P. Polyelectrolyte interactions at the hematite/water interface. Part 1. **Colloids and Surfaces**, v. 32, p. 307-317, 1988.

REIS, E. L. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Disciplina de Tratamento de Efluentes da Universidade Federal de Ouro Preto. Notas de aula. 2017.

RICHSTFDON, P.F.; CONNELLY, L.J. Industrial Coagulants and Flocculants. In.: SOMASUNDARAN, P.; MOUDGIL, B.M. (eds.). **Reagents in Mineral Technology**. Nova Iorque: Marcel Dekker Inc., 1988. p. 519-558.

ROCHA, L. **Estudo de aproveitamento econômico das lamas de uma mineração de ferro, através de concentração por flotação catiônica reversa**. 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SANTOS, F. S. **Potencial de uso do amido de inhame (*Colocasia esculenta* (L.) schott) na indústria de mineração**. 2001. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SHARMA, B. R.; DHULDHOYA, N. C.; MERCHANT, U. C. Flocculants – an ecofriendly approach. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 14, n. 2, p. 195-202, 2006.

SOMASUNDARAN, P.; LEE, L. T. Polymer-surfactant interactions in flotation of quartz. **Separation Science and Technology**, v. 16, n. 10, p. 1475-1490, 1981.

SOMASUNDARAN, B. R. Principles of flocculation, dispersion and selective flocculation. In: **Fine particles processing**. Nova Iorque: American Institute of Mining, v. 2, p. 947-976, 1980.

SOUZA, D. N. **Depressores alternativos na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 2016. Dissertação (Mestrado em Gestão Organizacional) - Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional, Universidade Federal de Goiás, Catalão.

TURRER, H. D. G. **Polímeros depressores na flotação de minério de ferro**. 2007. Tese (Doutorado em Tecnologia Mineral) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

WEISSENBORN, P. K. Behaviour of amylopectin and amylose components of starch in the selective flocculation of ultrafine iron ore. **International Journal of Mineral Processing**, v. 47, n. 3-4, p. 197-211, 1996.

WEISSENBORN, P. K.; WARREN, L. J.; DUNN, J. G. Optimization of selective flocculation of ultrafine iron ore. **International Journal of Mineral Processing**, v. 42, n. 3-4, p. 191-213, 1994.

WEISSENBORN, P. K.; WARREN, L. J.; DUNN, J. G. Selective flocculation of ultrafine iron ore: 2. Mechanism of selective flocculation. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 99, n.1, p. 29-43, 1995.

WOLF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

XIE, S.X.; LIU, Q.; CUI, S.W. Starch Modifications and Applications. in: Cui. S.W (Ed.), **Food Carbohydrates: Chemistry, physical properties, and applications**. United States of America. CRC Press. p. 362-410, 2005.

ZHANG, S.; XUE, X.; LIU, X.; DUAN, P.; YANG, H.; JIANG, T.; WANG, D.; LIU, R. Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources. **Journal of Mining Science**, v. 42, n. 04, p. 403-408, 2006.



## ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DOS CORPOS DE ÁGUA CONAMA 357/2005

<b>Classificação</b>	<b>Destino</b>
<b>Classe I</b>	<p>Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;</p> <p>Proteção das comunidades aquáticas;</p> <p>Recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA no 274, de 2000;</p> <p>Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película;</p> <p>Proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.</p>
<b>Classe II</b>	<p>Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;</p> <p>Proteção das comunidades aquáticas;</p> <p>Recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA no 274, de 2000;</p> <p>Irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto;</p> <p>Aqüicultura e à atividade de pesca.</p>
<b>Classe III</b>	<p>Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado;</p> <p>Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;</p> <p>Pesca amadora;</p> <p>Recreação de contato secundário;</p> <p>Dessedentação de animais.</p>
<b>Classe IV</b>	<p>Navegação;</p> <p>Harmonia paisagística.</p>

FONTE: adaptado de BRASIL (2005)