



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

**ESCOLA DE MINAS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
METALÚRGICA**



Mateus de Oliveira Simão

**EFEITO DA RELAÇÃO AMIDO/NaOH SOB O TEOR DE FERRO NO  
REJEITO DA FLOTAÇÃO DE UM MINÉRIO DE FERRO - ESTUDO DE CASO**

Ouro Preto

2026

**Mateus de Oliveira Simão**

**“EFEITO DA RELAÇÃO AMIDO/NaOH SOB O TEOR DE FERRO NO  
REJEITO DA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO - ESTUDO DE CASO”**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientadora: Prof. Dra. Érica Linhares Reis

Ouro Preto

2026

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S593e Simão, Mateus de Oliveira.  
Efeito da relação amido/NaOH sob o teor de ferro no rejeito da flotação de minério de ferro - estudo de caso. [manuscrito] / Mateus de Oliveira Simão. - 2026.  
46 f.: il.: color., tab.. + Fluxogramas.

Orientadora: Profa. Dra. Érica Linhares Reis.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Beneficiamento de minério. 2. Flotação. 3. Minério de ferro. 4. Amido. 5. Hidróxido de sódio. I. Reis, Érica Linhares. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.765.063

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Mateus de Oliveira Simão**

### **EFEITO DA RELAÇÃO AMIDO/NaOH SOB O TEOR DE FERRO NO REJEITO DA FLOTAÇÃO DE UM MINÉRIO DE FERRO - ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Metalúrgica

Aprovada em 24 de fevereiro de 20226

#### Membros da banca

Dra - Érica Linhares Reis- Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP  
MSc. - Mariana Caroline Andrade Silva - Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP  
MSc.- Sávio José de Oliveira - Companhia Siderúrgica Nacional - CSN

Érica Linhares Reis, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Erica Linhares Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/03/2026, às 15:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1072907** e o código CRC **A7D0E510**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder saúde, força e perseverança ao longo de toda essa caminhada, permitindo que eu superasse os desafios e alcançasse mais esta conquista em minha vida.

Aos meus pais, Lourdes de Oliveira e Marco Simão, por todo o amor, apoio, dedicação e ensinamentos ao longo da minha vida. Sou profundamente grato pelos valores transmitidos, pelo incentivo constante e por sempre acreditarem em mim, sendo fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Aos meus familiares, que de alguma forma contribuíram e torceram pelo meu sucesso durante essa trajetória, deixo aqui minha sincera gratidão. Em especial, à minha tia Maria Aparecida Simão, pelo carinho, apoio e presença constante em minha vida.

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), especialmente à Escola de Minas, por toda a estrutura, oportunidades e formação acadêmica proporcionadas ao longo da minha graduação.

Aos professores e profissionais que contribuíram para a minha formação acadêmica, em especial à Prof.<sup>a</sup> Érica Linhares dos Reis e a Sávio José de Oliveira, pelos ensinamentos, orientação e contribuição para o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa caminhada e contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A flotação catiônica reversa é o principal método utilizado no Brasil para a concentração de minérios de ferro, especialmente no aproveitamento de itabiritos, sendo o amido de milho empregado como depressor dos minerais de ferro e o hidróxido de sódio (NaOH) utilizado tanto na sua gelatinização quanto no controle do pH do processo. O desempenho dessa etapa depende diretamente das condições de preparo e aplicação dos reagentes, principalmente da relação amido/NaOH e da concentração do amido na solução preparada. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência dessas variáveis sobre o teor de ferro presente no rejeito da flotação reversa de um minério de ferro. O estudo foi desenvolvido como um estudo de caso em uma unidade industrial localizada no Quadrilátero Ferrífero (MG), com base na análise de dados operacionais e resultados químicos registrados no sistema da empresa, comparando as relações amido/NaOH 4 e 5, associadas às concentrações de 10 e 15 % (p/v) de amido no preparo. Os resultados demonstraram que o aumento da concentração do amido, aliado a uma relação adequada com a soda cáustica, favorece uma gelatinização mais eficiente e melhora a atuação do depressor, reduzindo as perdas de ferro no rejeito. Dessa forma, conclui-se que o controle da relação amido/NaOH e da concentração do amido é fundamental para otimizar o processo e garantir maior estabilidade operacional na flotação reversa.

Palavras chave: Beneficiamento de Minério. Flotação. Minério de ferro. Amido. Hidróxido de sódio.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Condicionador de polpa.....	17
Figura 3.2 - Coluna de flotação.....	19
Figura 5.1 - Fluxograma da etapa de preparo do amido utilizado na flotação reversa de minério de ferro.....	30
Figura 5.2 - Fluxograma do circuito de flotação catiônica reversa de minério de ferro em colunas.....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 - Influência da relação amido/NaOH e da concentração de amido no preparo sobre o teor de ferro (%Fe) no rejeito da flotação reversa. ....	37
--	----

## **LISTA DE SIGLAS**

PI – Plant Information (Sistema de gerenciamento e armazenamento de dados operacionais industriais)

PIB – Produto Interno Bruto

QF – Quadrilátero Ferrífero

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
3.1	MINÉRIO DE FERRO NO BRASIL .....	14
3.2	FLOTAÇÃO.....	15
3.2.1	<i>Propriedades de interface</i> .....	15
3.2.2	<i>Condicionamento</i> .....	16
3.2.3	<i>Flotação reversa de minério de ferro</i> .....	17
3.2.4	<i>Flotação em coluna</i> .....	18
3.2.5	<i>Descrição da coluna de flotação</i> .....	19
<b>4</b>	<b>VARIÁVEIS DA COLUNA DE FLOTAÇÃO .....</b>	<b>21</b>
4.1.1	<i>Sistema de aeração da coluna</i> .....	22
4.1.2	<i>Reagentes utilizados</i> .....	23
4.1.3	<i>Éter aminas</i> .....	23
4.1.4	<i>Amidos</i> .....	24
4.1.4.1	<i>Hidróxido de sódio</i> .....	25
4.2	RESULTADOS DE ESTUDOS DA LITERATURA .....	26
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
5.1	ESTUDO DE CASO .....	29
5.2	PREPARAÇÃO DE REAGENTES .....	30
5.2.1	<i>Preparação do amido</i> .....	30
5.2.1.1	<i>Preparação do hidróxido de sódio</i> .....	31
5.3	CONDICIONAMENTO DO MINÉRIO DE FERRO .....	32
5.4	DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DE FLOTAÇÃO .....	33
5.5	SISTEMA DE AMOSTRAGEM .....	34
5.6	A CONCENTRAÇÃO DO AMIDO .....	35
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>

<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A mineração é um setor fundamental para a economia do Brasil, representando uma fatia muito importante do Produto Interno Bruto (PIB) e das vendas para o exterior (Luz; Lins, 2018). Antigamente, muitos tipos de minério de ferro não podiam ser aproveitados, mas isso mudou com a chegada da técnica de flotação, que permitiu usar os itabiritos e transformá-los em um produto comercial (Ferran, 2007). Hoje em dia, para conseguir um minério de ferro de qualidade, o método mais usado e eficiente nas usinas brasileiras é a chamada flotação catiônica reversa (Matos, 2017).

Nesse processo de flotação reversa de minério de ferro, o amido de milho é um reagente que não pode faltar, pois ele funciona como um "depressor" (Matos, 2017). A função dele é deprimir as partículas de óxidos de ferro e impedir que elas saiam junto com a espuma que transporta as partículas de quartzo (Brandão, 2005).

A atuação adequada dos reagentes de flotação no processo é assegurada pela utilização de agentes reguladores de pH, os quais ajustam o meio para favorecer seu desempenho. Nesse contexto, o hidróxido de sódio (NaOH) é comumente utilizado na flotação catiônica reversa de minério de ferro com a finalidade de controlar a alcalinidade do sistema, sendo mais eficaz em valores de pH situados entre 9 e 11 (Matos, 2017).

O principal objetivo de uma operação minerária é alcançar a maior produção possível, minimizando as perdas do mineral de interesse e mantendo o controle dos custos operacionais (Costa; Fernandez, 2015). Nesse sentido, o ajuste das dosagens dos reagentes utilizados no processo é fundamental, pois uma aplicação inadequada pode resultar no arraste de mineral minério para o rejeito (Matos, 2017). Dessa forma, este trabalho tem como finalidade avaliar a influência da relação entre amido e NaOH, bem como da concentração empregada em seu preparo, sobre o teor de ferro presente no rejeito da flotação.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da relação entre amido e NaOH, bem como da concentração empregada em seu preparo, sobre o teor de ferro presente no rejeito da flotação.

### 2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o teor de ferro presente no rejeito da flotação para diferentes relações amido/NaOH.
- Analisar o teor de ferro presente no rejeito da flotação para diferentes concentrações de amido na preparação.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Minério de Ferro no Brasil

A mineração exerce papel importante na economia do Brasil, com a indústria extrativa e a metalurgia respondendo por cerca de 4% do Produto Interno Bruto (PIB) e mais de 20% das exportações do país. No caso do minério de ferro, a introdução da flotação trouxe uma mudança significativa, permitindo o aproveitamento dos itabiritos, que antes não eram considerados economicamente interessantes por apresentarem teores mais baixos do que as hematitas compactas. Essa mudança representou um importante salto tecnológico para o setor mineral no país (Luz; Lins, 2018; Ferran, 2007).

Essa evolução tecnológica trouxe impactos diretos sobre a mineralogia e a textura das formações de ferro, contribuindo para a geração de corpos de minério de alto teor, classificados segundo sua gênese em não tectônicos, sintectônicos ou pós-tectônicos (supergênicos) (Ferran, 2007). A análise dessas formações revela variações na composição mineral e na estrutura das bandas, refletindo tanto processos geológicos antigos quanto condições específicas de metamorfismo e alteração supergênica.

As formações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero podem ser agrupadas com base nos minerais de ganga predominantes, originando três tipologias principais: o itabirito quartzoso, constituído por jaspilitos metamórficos com alternância de quartzo e óxidos; o itabirito dolomítico, associado a bandas de dolomita ferroana; e o itabirito anfibolítico, resultante de metamorfismo em fácies mais impuras com aporte terrígeno (Rosière; Chemale Jr., 2000). O termo “itabirito”, refere-se a formações de fácies óxidos nas quais as bandas originais de chert foram recristalizadas como quartzo granular, contendo hematita, magnetita e martita (Eschwege, 1833 *apud* Rosière; Chemale Jr., 2000).

O minério de ferro analisado neste estudo integra a Formação Cauê e é classificado como Itabirito Pobre Compacto (IPC) (Ribeiro, 2011). Apresentando teor médio de ferro em torno de 42% e elevada resistência mecânica, esse material exige processos de moagem específicos para garantir a liberação adequada dos minerais antes da concentração. Mineralogicamente, o minério é composto predominantemente por hematitas nas formas granular, especular e martítica, além de quartzo, com presença secundária de goethita e limonita (Ribeiro, 2011).

## 3.2 Flotação

A flotação é um método de concentração mineral realizado em polpa, no qual a separação é feita com base na capacidade de determinadas partículas se aderirem a bolhas de ar. Durante do processo, as partículas que se aderem às bolhas de ar são arrastadas até a superfície, onde são removidas na forma de espuma, enquanto as partículas restantes permanecem na polpa e são descarregadas no fundo da célula. A flotação, reconhecida como uma das inovações tecnológicas mais importantes no tratamento de minérios e foi essencial para viabilizar a produção larga escala de metais básicos e minerais estratégicos (Chaves; Leal Filho; Braga, 2018; ANM, 2018).

A separação dos minerais na flotação depende de suas propriedades de superfície onde minerais hidrofílicos têm afinidade pela água, enquanto minerais hidrofóbicos se ligam às bolhas de ar. Como a maioria dos minerais não apresenta hidrofobicidade de forma natural, torna-se necessário o uso de reagentes para modificar seletivamente essas propriedades, garantindo um processo de beneficiamento mais eficiente (Chaves; Leal Filho; Braga, 2018; ANM, 2018).

No contexto do beneficiamento mineral, a flotação por espumas consolidou-se a partir da década de 1960, representando um marco para a indústria. Esse método possibilitou a exploração de depósitos com menor teor do mineral de interesse, algo que técnicas anteriores, como a separação magnética e gravimétrica, não conseguiam realizar com a eficiência necessária para atender à demanda global (Chaves; Leal Filho; Braga, 2018; ANM, 2018).

### 3.2.1 Propriedades de interface

A eficiência da flotação está relacionada ao fato de que algumas partículas conseguem aderir às bolhas de ar e são carregadas até a espuma, enquanto outras continuam na polpa. Essa diferença de comportamento acontece por causa das características de superfície dos minerais, que definem se eles terão maior afinidade com a água (hidrofílicos) ou com o ar (hidrofóbicos). No caso da flotação reversa de minério

de ferro, controlar essas propriedades é indispensável para que ocorra uma separação adequada entre os óxidos de ferro e a ganga silicosa (Monte; Peres, 2010).

A alteração das propriedades superficiais dos minerais acontece, principalmente, com a adição de reagentes coletores, que possuem uma parte com afinidade pela água e outra com afinidade pelo ar. Ao se adsorverem na superfície das partículas, esses reagentes diminuem a interação com a água e facilitam a ligação com as bolhas de ar. O nível dessa hidrofobização pode ser analisado por meio do ângulo de contato em que valores mais altos indicam superfícies mais hidrofóbicas, enquanto ângulos menores estão relacionados a superfícies mais hidrofílicas (Monte; Peres, 2010).

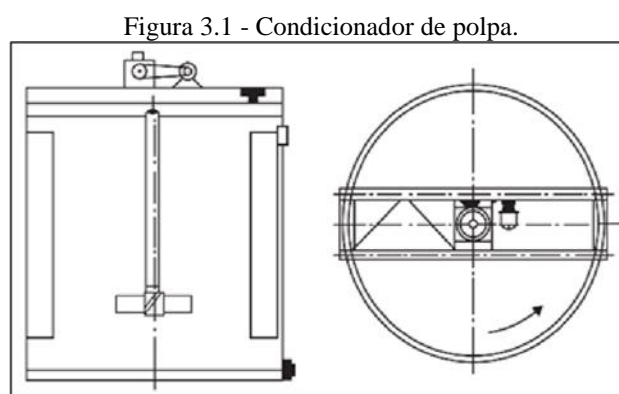
A energia superficial dos minerais também interfere no desempenho da flotação. Quando o minério passa pela etapa de fragmentação, sua estrutura cristalina é quebrada em novas superfícies, mais reativas, ficam expostas. Com o tempo, essas superfícies tendem a interagir com a água, o que aumenta seu caráter hidrofílico. Nesse sentido, os coletores são importantes porque ajudam a diminuir essa energia superficial, criando condições mais favoráveis para a adesão entre partícula e bolha e, assim, para que a separação mineral aconteça de maneira eficiente (Monte; Peres, 2010).

### 3.2.2 Condicionamento

O condicionamento é uma etapa fundamental no processo de flotação, pois é nesse momento que as partículas minerais entram em contato com os reagentes adicionados à polpa, permitindo a adsorção desses compostos na superfície dos minerais e a consequente modificação de suas propriedades físico-químicas. Essa etapa influencia diretamente a seletividade da separação e a estabilidade operacional do processo. Normalmente, o condicionamento é realizado com polpas mais concentradas, condição que favorece o contato entre partículas minerais e reagentes, contribuindo para uma distribuição mais uniforme dos produtos químicos e melhor aproveitamento durante a flotação (Chaves; Leal Filho; Braga, 2018).

Os equipamentos utilizados nessa etapa são denominados condicionadores, sendo geralmente constituídos por tanques com sistemas de

agitação mecânica que mantêm a polpa em suspensão e promovem a adequada dispersão dos reagentes, conforme ilustrado na Figura 3.1. Esse processo garante que todas as partículas tenham contato com os reagentes adicionados, favorecendo os mecanismos de adsorção na superfície mineral. Em algumas situações, também podem ser utilizados dispositivos internos que auxiliam na circulação e distribuição da polpa dentro do tanque, otimizando as condições para a etapa subsequente de flotação (Chaves; Leal Filho; Braga, 2018).



Fonte: CHAVES; LEAL FILHO; BRAGA (2018).

A eficiência do condicionamento está diretamente relacionada a fatores como tempo de contato, dosagem e ponto de adição dos reagentes, uma vez que cada reagente apresenta uma cinética de adsorção específica. Na flotação reversa de minério de ferro, por exemplo, o amido atua como depressor dos minerais portadores de ferro e requer tempo adequado para sua adsorção, enquanto os coletores catiônicos, como as aminas, apresentam ação mais rápida e são geralmente adicionados mais próximos da etapa de flotação. Dessa forma, o controle adequado dessas variáveis é essencial para garantir a seletividade do processo, reduzir perdas metálicas e assegurar maior estabilidade operacional do circuito de flotação (Chaves; Leal Filho; Braga, 2018).

### 3.2.3 Flotação reversa de minério de ferro

A flotação reversa de minério de ferro é uma operação fundamental para o processamento de itabiritos, com a finalidade de concentrar minerais de ferro por meio da remoção da ganga quartzosa. Diferente da flotação direta, nesse método o mineral de

interesse permanece na fase polpa (afundado), enquanto a sílica é hidrofobizada e transportada para a camada de espuma. (Matos, 2017), (Braga Jr, 2010).

No cenário industrial brasileiro, essa tecnologia é amplamente aplicada na produção de pellet feed, permitindo o aproveitamento econômico de minérios de baixo teor. O processo resulta em um rejeito predominantemente quartzoso e um concentrado de óxidos de ferro, empregando eteraminas como coletores e amido de milho como agente depressor. Quanto à infraestrutura das usinas, observa-se uma tendência no uso de colunas de flotação, que podem operar de forma isolada ou em circuitos associados a células mecânicas. (Monte; Peres, 2010), (Matos, 2017).

O fundamento da flotação catiônica reversa reside na manipulação da hidrofobicidade diferencial entre as interfaces minerais. Enquanto o quartzo adquire caráter hidrofóbico pela adsorção de coletores catiônicos, as partículas de ferro são mantidas em estado hidrofílico pela ação do amido, cujo mecanismo de adsorção é comumente associado à formação de pontes de hidrogênio (Cooke *et al.*, 1952 *apud* Matos, 2017). Esse mecanismo seletivo assegura que a sílica seja removida pelas bolhas de ar, garantindo a obtenção de um produto final com os elevados teores exigidos pelo mercado siderúrgico. (Matos, 2017), (Braga Jr, 2010).

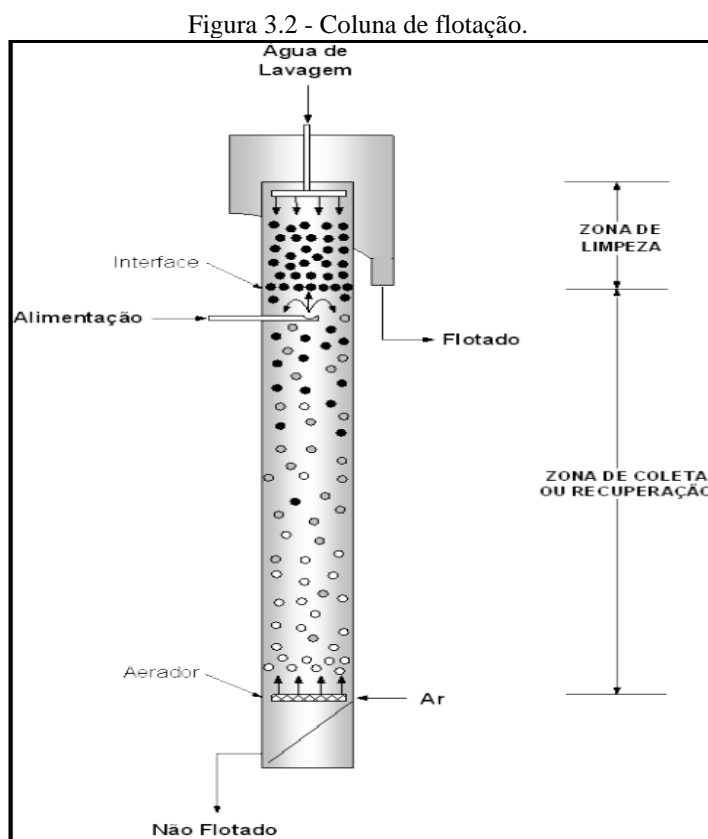
#### 3.2.4 Flotação em coluna

Com o objetivo de aumentar a seletividade exigida na flotação reversa de minério de ferro, especialmente na remoção eficiente da sílica, a flotação em coluna tem sido amplamente adotada em circuitos industriais. As colunas destacam-se pela elevada relação entre altura e diâmetro, característica que favorece um regime de escoamento próximo ao fluxo pistão. Apesar das diferentes concepções desenvolvidas ao longo do tempo, os equipamentos industriais mantêm, em sua maioria, os princípios básicos da coluna canadense (Luz; Lins, 2010).

Em relação às células mecânicas convencionais, a flotação em coluna diferencia-se principalmente pela ausência de agitação mecânica, pela utilização de água de lavagem na camada de espuma e pela presença de sistemas específicos de geração de bolhas. Esses fatores contribuem para o aumento da seletividade e para a melhoria da qualidade do concentrado obtido (Luz; Lins, 2010).

### 3.2.5 Descrição da coluna de flotação

As colunas de flotação (figura 3.2) apresentam diferenças significativas em relação às células mecânicas convencionais, destacando-se principalmente a relação entre altura e diâmetro, a utilização de água de lavagem, a ausência de agitação mecânica e o sistema de geração de bolhas de ar. Em aplicações industriais, o diâmetro efetivo da seção transversal varia, em geral, entre 0,3 e 5,0 metros, podendo apresentar formatos circulares, quadrados ou retangulares. Em colunas com seção quadrada ou retangular e diâmetro efetivo superior a 1,5 metro, é comum a utilização de baffles verticais, que atendem a requisitos estruturais e contribuem para uma melhor distribuição dos fluxos de polpa e ar, reduzindo recirculações indesejadas. A altura total das colunas depende das condições operacionais do processo, especialmente do tempo de residência requerido, sendo que a maioria das colunas industriais apresenta alturas entre 10 e 15 metros (Luz; Lins, 2010).



Fonte: Youg (1982)

Do ponto de vista operacional, a coluna de flotação é dividida em duas seções principais. A primeira é denominada seção de coleta e localiza-se entre o sistema de aeração, instalado na parte inferior da coluna, e a interface polpa-espuma. Nessa região ocorre o contato em contracorrente entre a polpa mineral e as bolhas de ar ascendentes, favorecendo a colisão e a adesão das partículas hidrofóbicas às bolhas, que são transportadas para a região superior. As partículas hidrofílicas ou com baixa afinidade pelas bolhas permanecem na fase líquida e são removidas pela base da coluna como rejeito (Luz; Lins, 2010).

A segunda região corresponde à seção de limpeza, também denominada seção de espuma, que se estende desde a interface polpa-espuma até o transbordo do material flotado. Essa região é composta por uma camada de espuma, normalmente com espessura em torno de 1,0 metro, na qual ocorre a remoção de partículas hidrofílicas arrastadas juntamente com as partículas hidrofóbicas. Esse processo é intensificado pela adição de água de lavagem na parte superior da coluna, distribuída por meio de dispersores, garantindo distribuição uniforme ao longo da camada de espuma e contribuindo para sua estabilidade (Luz; Lins, 2010).

A alimentação da polpa mineral, previamente condicionada com os reagentes adequados, é realizada aproximadamente a dois terços da altura da coluna a partir da base. O material flotado é removido pelo topo, enquanto o material não flotado é descarregado pela parte inferior do equipamento, caracterizando o rejeito do processo. Esse arranjo operacional contribui para o aumento da seletividade da flotação em colunas quando comparada às células mecânicas convencionais (Luz; Lins, 2010).

#### 4 VARIÁVEIS DA COLUNA DE FLOTAÇÃO

A vazão de ar é um dos principais parâmetros operacionais da coluna de flotação, pois está diretamente relacionada à quantidade de bolhas geradas no interior do equipamento. O aumento dessa vazão tende a elevar a taxa de colisão entre bolhas e partículas hidrofóbicas; entretanto, valores excessivos podem provocar instabilidade da espuma e aumento do arraste de partículas indesejadas. Dessa forma, a vazão de ar deve ser ajustada de modo a equilibrar a eficiência de coleta com a seletividade do processo (Luz; Lins, 2010).

O hold up de ar corresponde à fração volumétrica ocupada pelas bolhas no interior da coluna e está associado tanto à vazão de ar quanto às características das bolhas geradas. Esse parâmetro influencia diretamente o tempo de contato entre partículas e bolhas, sendo fundamental para o desempenho da flotação. Valores adequados favorecem a adesão das partículas hidrofóbicas, enquanto valores elevados podem comprometer a estabilidade do sistema (Luz; Lins, 2010).

O tamanho das bolhas exerce influência significativa na eficiência da flotação em colunas. Bolhas menores apresentam maior área superficial específica, aumentando a probabilidade de colisão e adesão das partículas hidrofóbicas. Contudo, bolhas excessivamente pequenas podem reduzir a velocidade de ascensão e dificultar a remoção do material flotado. Assim, o controle do tamanho das bolhas é essencial para garantir um desempenho operacional adequado (Luz; Lins, 2010).

O bias é definido como a diferença entre a vazão volumétrica de alimentação da polpa e a vazão de rejeito descarregada na base da coluna. Esse parâmetro está relacionado à quantidade de água que flui para a região da espuma e influencia o grau de lavagem do material flotado. O ajuste adequado do bias permite controlar o arraste hidráulico e melhorar a seletividade da separação, constituindo um dos principais parâmetros de controle da flotação em coluna (Luz; Lins, 2010).

A água de lavagem é adicionada na parte superior da coluna com o objetivo de remover partículas hidrofílicas arrastadas mecanicamente para a espuma. Esse parâmetro é fundamental para o aumento da seletividade do processo, pois promove a limpeza do material flotado sem comprometer a recuperação das partículas hidrofóbicas. A

distribuição uniforme da água de lavagem ao longo da camada de espuma é essencial para garantir sua eficiência (Luz; Lins, 2010).

A altura da camada de espuma está relacionada à eficiência da seção de limpeza da coluna. Camadas mais espessas proporcionam maior tempo de contato com a água de lavagem, favorecendo a remoção de partículas indesejadas. Entretanto, alturas excessivas podem causar instabilidade operacional e perdas de material flotado, exigindo ajustes conforme as características do minério e do processo (Luz; Lins, 2010).

A altura da seção de recuperação, também denominada seção de coleta, influencia diretamente o tempo disponível para o contato entre partículas e bolhas. Seções mais longas aumentam o tempo de residência da polpa e a probabilidade de adesão das partículas hidrofóbicas às bolhas, devendo ser definidas de acordo com a cinética de flotação do minério processado (Luz; Lins, 2010).

O tempo de residência corresponde ao período em que a polpa permanece no interior da coluna e está relacionado à vazão de alimentação, à geometria da coluna e à altura da seção de recuperação. Tempos adequados permitem que o processo de flotação ocorra de forma eficiente, enquanto tempos insuficientes podem resultar em perdas de partículas hidrofóbicas no rejeito (Luz; Lins, 2010).

#### 4.1.1 Sistema de aeração da coluna

O desempenho da flotação em coluna está diretamente relacionado à eficiência do sistema de aeração. Na unidade estudada, são utilizados aeradores do tipo SlamJet, amplamente empregados em instalações industriais. Esses dispositivos promovem a geração de bolhas a partir da injeção de ar em alta velocidade por meio de orifícios revestidos com materiais resistentes ao desgaste. Entre suas principais vantagens destacam-se a facilidade operacional, a boa estabilidade na formação de bolhas e a menor propensão ao entupimento, características que contribuem para a eficiência do processo de flotação em colunas (Luz; Lins, 2010).

Além do sistema de aeração, o desempenho do processo é influenciado por diversas variáveis operacionais interdependentes, entre as quais se destacam a vazão de ar, a vazão de água de lavagem, o hold up de ar, a altura da camada de espuma, o tamanho

das bolhas, a altura da seção de recuperação, o bias e o tempo de residência. O controle adequado dessas variáveis é fundamental para assegurar a eficiência da flotação e a qualidade do concentrado final (Luz; Lins, 2010).

#### 4.1.2 Reagentes utilizados

Os reagentes utilizados na flotação desempenham papel fundamental no controle do processo, pois são responsáveis por modificar as propriedades das interfaces entre as fases sólida, líquida e gasosa. Esses produtos podem ser de natureza orgânica ou inorgânica e atuam diretamente na seletividade da separação mineral, permitindo que determinadas partículas apresentem maior afinidade pelas bolhas de ar, enquanto outras permanecem na polpa. Dessa forma, o uso adequado dos reagentes possibilita direcionar o processo de flotação de acordo com o objetivo do beneficiamento mineral (Braga Jr, 2010).

De acordo com sua função no sistema de flotação, os reagentes são classificados em diferentes grupos, destacando-se os coletores, os espumantes e os modificadores ou reguladores. Os coletores tornam a superfície de determinados minerais hidrofóbica, favorecendo sua adesão às bolhas de ar. Os espumantes atuam na formação e estabilização da espuma, enquanto os modificadores ajustam as condições do meio, controlando parâmetros como pH, dispersão e depressão de minerais indesejáveis, contribuindo para a eficiência e seletividade do processo (Braga Jr, 2010).

#### 4.1.3 Éter aminas

As aminas são agentes tensoativos catiônicos derivados da amônia ( $\text{NH}_3$ ), amplamente utilizados na flotação reversa de minério de ferro para a coleta seletiva de minerais de ganga, como o quartzo. Estruturalmente, as aminas graxas primárias possuem um grupo funcional polar ( $\text{NH}_2$ ) e uma cadeia hidrocarbônica apolar, sendo que a intensidade de sua ação coletora está relacionada ao comprimento dessa cadeia. Devido à baixa solubilidade das aminas primárias em meio aquoso, a indústria utiliza preferencialmente as eteraminas, obtidas pela inserção de um grupo funcional éter entre

o radical e a cabeça polar, o que confere maior solubilidade ao reagente (Matos, 2017; Chaves; Leal Filho; Braga, 2018).

No ambiente industrial, as eteraminas são classificadas principalmente em etermonoaminas e eterdiaminas. A etermonoamina é produzida pela reação de um álcool graxo com a acrilonitrila, seguida de hidrogenação (Shapiro, 1968 *apud* Matos, 2017). A eterdiamina, por sua vez, apresenta dois grupos polares e maior massa molar, sendo especialmente eficaz no transporte de partículas grosseiras de quartzo para a camada de espuma. Para garantir estabilidade e aplicação na forma líquida, esses coletores são frequentemente neutralizados com ácido acético, formando acetatos de eteramina (Matos, 2017; Braga Jr, 2010).

O desempenho desses coletores é governado pelo pH da polpa, que define o equilíbrio entre as espécies iônicas e moleculares do surfatante. Na flotação reversa de minério de ferro, usualmente operada em pH entre 9 e 11, a forma iônica atua como coletor por atração eletrostática com a superfície negativa do quartzo, enquanto a forma molecular exerce a função de espumante, garantindo a estabilidade das bolhas de ar. Além do pH, a presença de lamas constitui um fator crítico, pois o aumento da superfície específica pode resultar em consumo excessivo de coletores e no fenômeno de slime coating, comprometendo a seletividade do processo (Matos, 2017; Braga Jr, 2010).

#### 4.1.4 Amidos

O amido de milho é um polímero natural de reserva vegetal, quimicamente representado pela fórmula  $(C_6H_{10}O_5)_n(C_6H_{10}O_5)_n(C_6H_{10}O_5)_n$ , atuando como o principal agente modificador depressor na flotação catiônica reversa de minério de ferro. Sua estrutura molecular é composta por dois polissacarídeos: a amilose, que apresenta cadeia linear e menor massa molar, e a amilopectina, caracterizada por uma estrutura ramificada e massa molar significativamente mais elevada (Monte; Peres, 2010; Matos, 2017).

A eficácia da depressão seletiva dos minerais de ferro, como a hematita, é atribuída majoritariamente à amilopectina, em função de seu elevado peso molecular e de sua conformação ramificada. O mecanismo fundamental de adsorção desse polímero sobre a superfície mineral ocorre predominantemente por meio de ligações de hidrogênio

entre as hidroxilas da cadeia orgânica e a superfície do óxido (Cooke *et al.*, 1952 *apud* Matos, 2017).

Devido à sua insolubilidade em água fria, o amido necessita do processo de gelatinização para tornar-se ativo como reagente de flotação. Esse processo consiste no inchamento e posterior rompimento dos grânulos, liberando as cadeias poliméricas de amilose e amilopectina no meio aquoso. Industrialmente, emprega-se a gelatinização química por meio da adição de hidróxido de sódio (NaOH), geralmente em proporções em massa de 4:1 ou 5:1 entre amido e soda (Monte; Peres, 2010; Braga Jr, 2010).

A eficiência da gelatinização é influenciada por variáveis como a granulometria do amido e o tempo de condicionamento com o álcali, sendo que a ruptura inadequada dos grânulos compromete a adsorção eficiente do polímero. Além disso, a soda residual proveniente desse preparo auxilia na dispersão da polpa ao elevar o pH do sistema, condição importante para evitar o recobrimento indesejado da hematita por partículas finas de ganga, conhecido como slime coating (Monte; Peres, 2010; Matos, 2017).

Após a gelatinização, o reagente deve ser consumido em curto intervalo de tempo, uma vez que soluções aquosas de amido estão sujeitas ao fenômeno de retrogradação. Esse processo provoca turbidez, precipitação do polímero e redução da viscosidade, comprometendo a seletividade da flotação. Observa-se, entretanto, que a amilopectina apresenta maior estabilidade e menor tendência à retrogradação quando comparada à amilose (Araujo, 1988 *apud* Monte; Peres, 2010).

#### 4.1.4.1 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio (NaOH), comercialmente conhecido como soda cáustica, é um reagente inorgânico classificado como modificador regulador de pH. Na indústria mineral, sua utilização é amplamente difundida devido ao custo relativamente baixo quando comparado a outros agentes alcalinizantes. Trata-se de uma base forte que, em solução aquosa, sofre dissociação completa, liberando íons sódio ( $\text{Na}^+$ ) e hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), sendo esta última responsável pelo aumento da alcalinidade do meio. Na flotação, sua principal função é o controle do pH da polpa, variável que influencia o potencial zeta dos minerais e a dissociação das espécies moleculares e iônicas dos coletores catiônicos, como as aminas (Chaves; Leal Filho; Braga, 2018; Matos, 2017).

No processo de flotação catiônica reversa de minério de ferro, o hidróxido de sódio apresenta importância fundamental na preparação do amido de milho. Como o amido é insolúvel em água fria, torna-se necessário o processo de gelatinização química, que ocorre pela absorção do álcali pelas moléculas do amido em suspensão. Esse contato enfraquece as pontes de hidrogênio intergranulares, promovendo o inchamento e o rompimento dos grânulos e liberando as cadeias de amilose e amilopectina. Industrialmente, esse preparo é realizado em proporções em massa que variam de 4:1 a 5:1 entre amido e soda, sendo o tempo de condicionamento dependente da granulometria do polímero (Viana; Souza, 1988 *apud* Braga Jr, 2010; Matos, 2017).

Além de viabilizar a atuação do depressor, o hidróxido de sódio residual proveniente da gelatinização exerce papel importante no controle do estado de agregação da polpa. Ao elevar o pH para a faixa alcalina adequada, geralmente entre 9 e 11, a soda favorece a dispersão das partículas finas e coloidais por meio do aumento da repulsão eletrostática. Essa dispersão é essencial para evitar o fenômeno de slime coating, caracterizado pelo recobrimento indesejado da superfície da hematita por partículas ultrafinas de ganga, assegurando maior seletividade na flotação e evitando o consumo excessivo de coletores pela elevada área superficial das lamas (Monte; Peres, 2010; Matos, 2017).

#### 4.2 Resultados de estudos da literatura

Este trabalho investigou como a concentração do amido de milho e a proporção de soda cáustica utilizada em seu preparo impactam a recuperação do ferro. Foi empregado um planejamento estatístico utilizando amostras da Mina Casa de Pedra, verificando-se que a concentração inicial da solução de amido é o fator que mais influencia a recuperação metálica. Quando essa condição de preparo não é adequada, a eficiência do depressor é reduzida, resultando em maiores perdas de ferro para o rejeito. O equilíbrio entre amido e soda é essencial para garantir que todos os grãos de amido sejam adequadamente gelatinizados e não permaneçam partículas sem reagir (Reis, 1987 *apud* Moreira, 2012). Além disso, verificou-se que a correta preparação do depressor exerce influência direta sobre a recuperação metálica do processo (Cândido *et al.*, 2017).

Os autores buscaram determinar a proporção ideal entre amido e soda cáustica, bem como o tempo necessário para o preparo da solução utilizada na flotação de minério de ferro. Foram avaliadas diferentes combinações e realizadas análises por microscopia para verificar o grau de gelatinização do amido. Os resultados indicaram que a relação de quatro partes de amido para uma parte de soda, com 15 minutos de preparo, proporcionou o melhor desempenho, favorecendo a depressão dos minerais de ferro e reduzindo suas perdas para o rejeito de sílica. As condições de preparo seguiram as recomendações clássicas para a gelatinização do amido e para a condução do processo de flotação (Taggart, 1945 *apud* Souza; Magalhães, 2016). Os resultados experimentais confirmaram que essa condição promove maior eficiência na atuação do depressor (Souza; Magalhães, 2016).

Foi avaliada a influência de diferentes coletores e amidos com distintos teores de amilopectina na flotação de minérios de ferro da Samarco. Os resultados demonstraram que a utilização de um amido constituído integralmente por amilopectina proporcionou maior seletividade do processo, permitindo a obtenção de um concentrado de melhor qualidade e reduzindo as perdas de ferro para o rejeito. Também foi observado que a presença de minerais como a goethita pode dificultar a separação e aumentar as perdas metálicas quando o sistema de reagentes não é adequadamente ajustado (Rocha e Brandão, 1996 *apud* Rodrigues, 2016). Esse comportamento foi confirmado nos ensaios realizados, evidenciando a necessidade de uma adequada seleção dos reagentes para minimizar as perdas de ferro (Matos, 2017).

Esta pesquisa avaliou diferentes polímeros como possíveis substitutos do amido de milho na depressão dos minerais de ferro durante a flotação. Foram realizados estudos do comportamento eletrocinético das partículas e ensaios de flotação, verificando-se que a goma guar apresentou desempenho semelhante ao do amido convencional, podendo inclusive ser utilizada em menores dosagens. Estudos anteriores demonstraram que é possível alcançar recuperações próximas de 96% do ferro utilizando reagentes alternativos (Souza *et al.*, 2007 *apud* Turrer, 2007). Os resultados obtidos reforçaram o potencial desses polímeros como alternativas ao amido convencional (Turrer, 2007).

Nesta pesquisa foram determinadas as quantidades de soda cáustica necessárias para o preparo de farinhas de sorgo e milho como alternativas ao amido industrial. O grau de gelatinização foi avaliado por meio de análises microscópicas, confirmando a eficiência do preparo. Os resultados mostraram que a farinha de sorgo apresentou desempenho semelhante ao do amido de milho na depressão dos minerais de ferro, com a vantagem de demandar menor consumo de soda cáustica. A eficiência desses depressores está diretamente relacionada ao teor de amilopectina presente em sua composição (Franco, 2001 *apud* Silva *et al.*, 2022). Os resultados experimentais confirmaram essa relação ao comparar diferentes fontes de amido empregadas como depressores na flotação (Silva *et al.*, 2022).

A utilização de nanoemulsões foi avaliada como alternativa para promover uma distribuição mais eficiente da amina e do amido durante a flotação reversa de minério de ferro. A flotação catiônica reversa continua sendo considerada a principal rota para concentração de minérios de ferro de baixo teor (Filippov *et al.*, 2014 *apud* Neitzke, 2020). Os resultados demonstraram que a aplicação de nanoemulsões possibilitou elevada remoção das impurezas utilizando menores quantidades de reagentes, favorecendo a obtenção de concentrados de maior qualidade e reduzindo as perdas de ferro para o rejeito de quartzo (Neitzke, 2020).

Este estudo teve como objetivo recuperar o ferro presente em rejeitos depositados em barragens. Foram realizadas análises granulométricas e ensaios utilizando farinhas de mandioca e milho como depressores. A caracterização geológica da área de estudo foi realizada conforme descrito na literatura (Arroyo, 2014 *apud* Rocha *et al.*, 2019), garantindo a seleção adequada da fração granulométrica utilizada nos ensaios. Os resultados demonstraram que uma das farinhas de mandioca avaliadas proporcionou recuperação próxima de 76% do ferro presente no rejeito (Rocha *et al.*, 2019).

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Estudo de Caso

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso desenvolvido em uma empresa de mineração situada na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, com foco no processo industrial de concentração de minério de ferro por flotação catiônica reversa. O trabalho foi estruturado a partir de pesquisa bibliográfica e da análise de dados operacionais e resultados químicos do processo, buscando integrar a fundamentação teórica à avaliação prática das condições reais de operação.

A revisão bibliográfica teve como objetivo fornecer embasamento sobre o beneficiamento de minério de ferro, com ênfase na flotação reversa, no papel do amido como agente depressor e na influência da relação amido/NaOH e da concentração de amido no preparo sobre o desempenho do processo. Essa etapa permitiu compreender os mecanismos de gelatinização e ativação do amido, além de subsidiar a interpretação técnica dos resultados obtidos ao longo do estudo.

Os dados analisados são provenientes da própria empresa, coletados diariamente entre janeiro de 2025 e dezembro de 2025, a partir de registros operacionais internos armazenados no sistema PI (Process Information), garantindo confiabilidade, rastreabilidade e integração das informações. Foram avaliados os teores de ferro (%Fe) no rejeito da flotação reversa, bem como as variáveis operacionais relacionadas à concentração de amido utilizada no preparo e à relação amido/NaOH adotada no processo.

Para o desenvolvimento da análise, os dados foram selecionados e agrupados conforme as condições estudadas, possibilitando a comparação entre as relações amido/NaOH 4 e 5 e as concentrações de amido de 10% e 15%, correlacionando essas variáveis aos teores de ferro observados no rejeito. Após a consolidação, as informações foram organizadas em planilhas no software Microsoft Excel para tabulação e análise descritiva comparativa, realizada sem qualquer intervenção nos parâmetros industriais, de modo a refletir o comportamento real do processo.

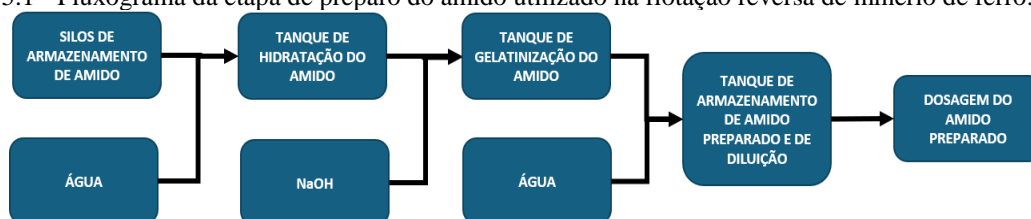
A metodologia adotada teve como foco a avaliação do comportamento do processo em condições reais de operação, sem qualquer intervenção ou alteração nos parâmetros industriais. As conclusões foram fundamentadas na interpretação dos dados coletados e na comparação com os conceitos apresentados na revisão bibliográfica, garantindo coerência entre a base teórica e os resultados observados no estudo.

## 5.2 Preparação de Reagentes

### 5.2.1 Preparação do amido

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma simplificado da etapa de preparo do amido utilizado na flotação reversa de minério de ferro. O esquema ilustra, de forma sequencial, as etapas desde o armazenamento do reagente sólido até sua dosagem no processo, evidenciando os pontos de adição de água e de NaOH, bem como os tanques envolvidos nas fases de hidratação, gelatinização, armazenamento e diluição.

Figura 5.1 - Fluxograma da etapa de preparo do amido utilizado na flotação reversa de minério de ferro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O amido utilizado no processo é inicialmente armazenado em silos, destinados ao estocamento do reagente em sua forma sólida. A partir desses silos, o material é encaminhado para balanças de pesagem, onde é realizada a quantificação da massa necessária de acordo com as condições operacionais estabelecidas para o processo.

Após a pesagem, o amido é direcionado para o tanque de hidratação, etapa na qual é adicionada água com o objetivo de promover sua hidratação inicial. Nessa fase, o material permanece sob agitação, garantindo contato adequado com a água e favorecendo

a formação de uma suspensão homogênea, condição essencial para o bom desempenho das etapas seguintes.

Em seguida, a suspensão é transferida para o tanque de gelatinização, onde ocorre a adição de hidróxido de sódio (NaOH). A interação entre o amido e a soda promove uma reação com liberação de calor, que, associada à agitação, possibilita a gelatinização do amido. Essa etapa é fundamental, pois promove a ativação do reagente, tornando-o mais eficiente na depressão dos minerais portadores de ferro durante a flotação reversa.

Após a gelatinização, o amido preparado segue para um tanque de armazenamento e diluição. Nessa etapa, é realizada a adição controlada de água para ajuste da concentração final do reagente, de acordo com os parâmetros operacionais definidos para o circuito de flotação. Esse controle é importante para garantir estabilidade na aplicação e melhor desempenho do processo.

Por fim, o amido já preparado e na concentração adequada é encaminhado para o sistema de dosagem, sendo aplicado no tanque de alimentação da flotação. Dessa forma, assegura-se sua correta incorporação à polpa mineral antes das etapas de condicionamento e flotação, contribuindo para a eficiência da separação mineral.

#### 5.2.1.1 Preparação do hidróxido de sódio

A soda cáustica utilizada no processo é inicialmente armazenada em sua forma concentrada em um tanque específico destinado à sua estocagem. Esse tanque tem a função de garantir o fornecimento contínuo do reagente para as etapas de diluição e aplicação no circuito de flotação.

A partir do tanque de armazenamento, a soda cáustica concentrada é transferida para um tanque de diluição, no qual ocorre a adição controlada de água com o objetivo de obter a concentração adequada para uso no processo. Durante essa etapa, a mistura é submetida à agitação, de modo a assegurar a completa dissolução da soda em água e a homogeneização da solução preparada.

Após a diluição, a soda cáustica na concentração adequada é encaminhada para o tanque de armazenamento de soda preparada, onde permanece disponível para utilização operacional. A soda preparada é empregada em duas etapas principais do processo: na

gelatinização do amido, etapa necessária para ativar o reagente antes de sua adição à polpa mineral, e no controle do pH da flotação.

O controle do pH é realizado por meio da adição de soda cáustica durante a etapa de condicionamento, sempre que necessário, com o objetivo de manter o pH do processo ajustado na faixa de 9,5 a 10,5, garantindo condições químicas adequadas para a atuação dos reagentes e para a eficiência da flotação reversa de minério de ferro.

### 5.3 Condicionamento do Minério de Ferro

O processo de condicionamento avaliado neste estudo tem início com o armazenamento do pellet feed em polpa em um tanque de alimentação principal, denominado Tanque 1. Esse tanque é responsável por receber e manter a polpa de minério fino antes do seu encaminhamento às etapas subsequentes do processo de flotação. No Tanque 1, ocorre a adição direta do amido previamente preparado, que atua como depressor dos minerais portadores de ferro no processo de flotação reversa. A adição do amido nesse ponto visa promover o contato inicial entre o reagente e a polpa mineral, permitindo sua dispersão inicial no sistema.

Após essa etapa, a polpa contendo o amido segue para o Condicionador 1, equipamento destinado a intensificar a mistura entre o reagente e as partículas minerais. O Condicionador 1 tem como principal objetivo garantir uma homogeneização mais eficiente do amido na polpa, proporcionando condições adequadas para que o reagente atue de forma efetiva sobre a superfície dos minerais. A agitação promovida nesse equipamento é fundamental para aumentar a eficiência do condicionamento, assegurando que o amido esteja bem distribuído e adsorvido de maneira adequada nas partículas de interesse.

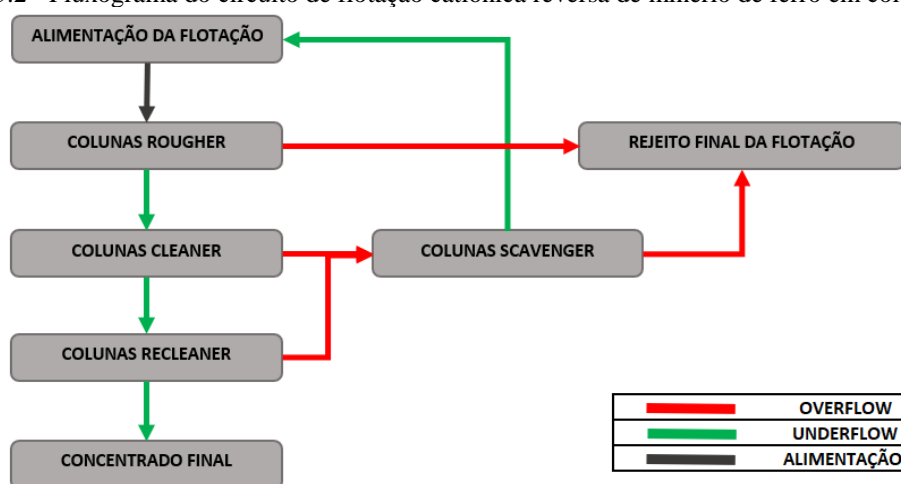
Na sequência, o material condicionado é direcionado para uma caixa de passagem, na qual ocorre a adição da amina, utilizada como coletor no processo de flotação reversa de minério de ferro. A adição da amina é realizada após o condicionamento com amido, respeitando a lógica do processo, uma vez que a amina apresenta cinética de atuação mais rápida e não demanda longos tempos de contato com a polpa. Essa etapa tem como finalidade tornar hidrofóbicas as partículas de sílica, possibilitando sua flotação seletiva.

Por fim, após a adição da amina, a polpa já condicionada segue diretamente para as colunas de flotação rougher, onde ocorre a separação propriamente dita entre a sílica flotada e o rejeito contendo os minerais portadores de ferro. Dessa forma, a sequência operacional adotada é Tanque 1, adição de amido, Condicionador 1, adição de amina e flotação rougher, o que permite avaliar o efeito do condicionamento sobre o desempenho do processo, especialmente em relação ao comportamento do ferro no rejeito da flotação.

#### 5.4 Descrição do Circuito de Flotação

O sistema de flotação estudado neste consiste em um circuito de flotação reversa de minério de ferro em coluna. Esse circuito (Figura 4.2) é composto por diversas etapas operacionais, as quais serão descritas detalhadamente a seguir.

Figura 5.2 - Fluxograma do circuito de flotação catiônica reversa de minério de ferro em colunas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No que se refere ao arranjo físico do circuito de flotação da Figura 4, este é organizado em múltiplas etapas com o objetivo de alcançar a eficiência desejada do processo. De modo geral, o circuito é composto inicialmente pela etapa rougher, caracterizada por elevadas recuperações e menores teores do mineral de interesse. Em seguida, o concentrado dessa etapa é direcionado à etapa cleaner, cuja finalidade é elevar o teor do concentrado, ajustando-o às especificações do produto final. A etapa de recleaner é empregada de forma contínua no circuito, tendo como principal função garantir a manutenção da qualidade do produto, promovendo um refino adicional do

concentrado e assegurando o atendimento aos parâmetros exigidos. Por fim, a etapa scavenger tem como função recuperar o mineral de interesse remanescente nos rejeitos das etapas anteriores, sendo também responsável pela geração do rejeito final do processo. A configuração do circuito e o número de estágios adotados podem variar conforme as características do minério e as exigências operacionais (LUZ et al., 2010).

## 5.5 Sistema de Amostragem

A metodologia de amostragem adotada baseia-se na utilização de amostradores automáticos configurados de forma distinta, com o objetivo de garantir a representatividade das amostras geradas ao longo da operação de flotação. Os amostradores são ajustados para promover enchimentos graduais das amostras por meio da geração de incrementos, permitindo a formação de amostras compostas representativas de intervalos operacionais definidos.

As amostras referentes à alimentação da flotação são geradas por incrementos coletados em intervalos de tempo previamente determinados pelo colaborador responsável pela operação, considerando as condições do processo e a variabilidade operacional. Esses incrementos são acumulados no recipiente do amostrador até a formação da amostra composta, a qual é coletada a cada 4 horas.

De forma análoga, o mesmo procedimento é aplicado às amostras de rejeito da flotação, utilizando amostradores dedicados e configurados segundo a mesma lógica de geração de incrementos temporais. Essa padronização assegura a comparabilidade entre as amostras de alimentação e rejeito, permitindo uma avaliação consistente do desempenho do processo.

A estratégia de geração de incrementos ao longo do tempo tem como principal finalidade reduzir vieses associados a coletas pontuais, garantindo que a amostra final represente fielmente o material processado durante o intervalo considerado. Após a coleta, as amostras compostas são devidamente identificadas e encaminhadas ao laboratório químico para análise.

Essa metodologia possibilita um acompanhamento contínuo e confiável dos resultados da flotação, fornecendo subsídios técnicos para a tomada de decisões

operacionais e para a implementação de ações corretivas visando à adequação e otimização do desempenho do processo de concentração.

## 5.6 A Concentração do Amido

A metodologia adotada para o controle da concentração do amido no processo de flotação reversa baseia-se no ajuste da proporção entre amido, soda cáustica e água adicionadas ao sistema, sendo essas definições realizadas pelos colaboradores responsáveis pela operação, conforme as condições operacionais do circuito de flotação.

A principal modificação implementada consiste no aumento da concentração do amido preparado, obtido por meio da adição de uma maior massa de amido de milho, associada à adição proporcionalmente maior de soda cáustica, mantendo-se controlada a quantidade de água adicionada ao sistema. Esse procedimento resulta na obtenção de um reagente mais concentrado e adequadamente ativado, favorecendo sua atuação como depressor dos minerais portadores de ferro.

Com o objetivo de garantir maior estabilidade e reprodutibilidade do preparo do reagente, o controle operacional passa a ser realizado por meio da utilização de uma relação amido/soda previamente definida. Essa relação é empregada como parâmetro de controle do processo, assegurando que o aumento da concentração do amido seja acompanhado por uma quantidade adequada de soda cáustica, evitando variações indesejadas no grau de ativação do reagente.

A definição e o ajuste da relação amido/soda são realizados de forma operacional, considerando o desempenho metalúrgico da flotação, a variabilidade do minério processado e os resultados analíticos obtidos. Dessa forma, o controle da concentração do amido por meio da relação amido/soda constitui uma ferramenta essencial para a otimização do desempenho da flotação reversa, permitindo adequações consistentes e seguras às condições operacionais do circuito.

A relação amido/soda exerce influência direta no processo de gelatinização do amido. A diminuição dessa relação, que corresponde ao aumento da quantidade de soda cáustica em relação à massa de amido adicionada, tende a favorecer uma gelatinização

mais eficiente, uma vez que a soda atua na ruptura das ligações de hidrogênio da estrutura do amido, promovendo maior inchamento e solubilização dos grânulos.

Nesse contexto, uma relação amido/soda mais baixa disponibiliza maior quantidade de agente alcalino por unidade de amido, resultando em um reagente mais completamente gelatinizado e com maior grau de ativação, o que contribui para uma atuação mais eficaz do amido como depressor dos minerais portadores de ferro na flotação reversa.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados obtidos permite avaliar a influência da concentração do amido e da relação amido/NaOH sobre o teor de ferro presente no rejeito da flotação reversa. Na Tabela 5.1 estão apresentados os resultados de porcentagem de ferro no rejeito da flotação considerando o desvio padrão relacionando a influência da relação amido/NaOH e da concentração de amido no preparo da solução.

Tabela 6.1 - Influência da relação amido/NaOH e da concentração de amido no preparo sobre o teor de ferro (%Fe) no rejeito da flotação reversa.

<b>Relação Amido/NaOH</b>	<b>Concentração do amido na</b>	<b>%Fe no rejeito da flotação</b>	<b>Desvio padrão do ferro no rejeito</b>
4	10	19,77	2,72
	15	15,11	2,78
5	10	19,99	3,29
	15	16,95	2,37

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para a relação amido/NaOH igual a 4, verificou-se que, na concentração de 10% (em peso) na preparação, o teor de ferro no rejeito foi de 19,77%. Quando a concentração foi elevada para 15%, houve redução significativa desse valor, atingindo 15,11%. Esse comportamento indica que o aumento da concentração favoreceu a atuação do amido como depressor dos minerais de ferro, reduzindo sua flotação indesejada. Esse resultado está de acordo com o discutido na literatura, que destaca que a eficiência do amido está diretamente relacionada ao seu grau de gelatinização e à adequada ativação alcalina (Matos, 2017). Segundo o autor, concentrações mais elevadas no preparo podem favorecer a liberação das cadeias de amilose e amilopectina, aumentando a adsorção sobre a superfície dos óxidos de ferro.

Para a relação amido/NaOH igual a 5, os resultados mostraram teor de 19,99% de Fe no rejeito na concentração de 10% e 16,95% na concentração de 15%. Assim como observado na relação 4, o aumento da concentração proporcionou redução das perdas metálicas, embora de forma menos expressiva. Esse comportamento pode estar associado à menor quantidade relativa de NaOH disponível para promover a completa gelatinização do amido, o que pode limitar sua eficiência como depressor. Esse comportamento está de

acordo com a literatura, que ressalta que a relação adequada entre amido e soda é fundamental para garantir a ativação completa do polímero, sendo que proporções inadequadas podem comprometer a seletividade do processo (Ribeiro, 2011).

Comparando-se as duas relações na concentração de 10%, os valores obtidos foram bastante próximos (19,77% para relação 4 e 19,99% para relação 5), indicando que, em menores concentrações de preparo, a variação da proporção amido/NaOH não provocou alterações significativas no teor de ferro do rejeito. Esse resultado está em consonância com o discutido na literatura, que afirma que a eficiência do amido depende não apenas da relação com o agente alcalinizante, mas também do grau efetivo de dispersão e ativação no meio (Braga Jr., 2010).

Entretanto, na concentração de 15%, a relação 4 apresentou melhor desempenho (15,11%) quando comparada à relação 5 (16,95%), evidenciando que uma maior disponibilidade de NaOH por unidade de amido favoreceu o processo. Esse comportamento está de acordo com o descrito na literatura, segundo a qual o hidróxido de sódio promove a ruptura das ligações de hidrogênio na estrutura do amido, facilitando sua solubilização e aumentando sua capacidade de adsorção sobre os minerais de ferro (Monte e Peres, 2010). Dessa forma, uma ativação mais eficiente resulta em maior depressão da hematita e, conseqüentemente, menor perda de ferro para o rejeito.

Além disso, o equilíbrio entre concentração, relação amido/soda e condições de preparo é determinante para o desempenho metalúrgico da flotação reversa (Cândido *et al.*, 2017). Os resultados obtidos neste estudo confirmam essa afirmação, uma vez que a melhor condição avaliada, correspondente à relação 4 e concentração de 15%, apresentou o menor teor de ferro no rejeito, indicando maior eficiência na depressão dos minerais portadores de ferro.

De modo geral, os dados experimentais corroboram os fundamentos apresentados na revisão bibliográfica, evidenciando que tanto a concentração do amido quanto a relação amido/NaOH influenciam diretamente o desempenho da flotação catiônica

reversa (Matos, 2017; Ribeiro, 2011; Monte e Peres, 2010). A adequada ativação alcalina do amido mostrou-se essencial para otimizar sua ação depressora sobre os minerais de ferro, favorecendo a seletividade da flotação e minimizando as perdas metálicas. Dessa forma, os resultados obtidos neste trabalho reforçam a coerência entre os dados experimentais e os fundamentos apresentados na literatura.

## 7 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a influência da relação amido/NaOH e da concentração do amido no teor de ferro presente no rejeito da flotação reversa de minério de ferro, com base em dados obtidos em escala industrial. A partir dos resultados alcançados, foi possível verificar, de forma objetiva, que o preparo do depressor exerce papel fundamental no desempenho metalúrgico do processo.

Os dados demonstraram que tanto a concentração do amido quanto a relação amido/NaOH impactam diretamente a eficiência da depressão dos minerais de ferro. Observou-se que o aumento da concentração de amido de 10% para 15% promoveu redução significativa do teor de ferro no rejeito, evidenciando menor perda metálica. Esse comportamento confirma que uma maior concentração no preparo favorece a atuação do amido, tornando-o mais eficiente na manutenção da hidrofobicidade seletiva do quartzo e na depressão dos óxidos de ferro.

A análise gráfica dos resultados, apresentada nas Figuras 5.1 e 5.2, reforça essas conclusões ao evidenciar, por meio dos gráficos de dispersão, a tendência de menor variabilidade e menor ocorrência de valores extremos de %Fe no rejeito quando utilizada a concentração de 15%. Além disso, a comparação entre as relações amido/NaOH mostrou que a relação igual a 4 apresentou comportamento mais estável e, em geral, menores teores de ferro no rejeito quando comparada à relação 5, especialmente na concentração de 15%. A menor dispersão observada nos dados indica maior previsibilidade e controle operacional, aspecto relevante para a estabilidade do processo industrial.

Os resultados obtidos mostraram-se coerentes com os fundamentos apresentados na literatura técnica, que ressaltam a importância da correta ativação alcalina do amido para o bom desempenho da flotação catiônica reversa. A confirmação desses conceitos em condições industriais reforça que o controle da relação amido/NaOH e da concentração do depressor deve ser tratado como variável operacional estratégica.

Dessa forma, conclui-se que o ajuste adequado desses parâmetros pode contribuir significativamente para a redução das perdas de ferro no rejeito, promovendo maior recuperação metalúrgica e melhor aproveitamento do recurso mineral, além de fornecer

subsídios técnicos para otimizações operacionais futuras e para o aprimoramento contínuo do processo de flotação reversa de minério de ferro.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **A mineração e a flotação no Brasil**. Brasília: ANM, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/anm/publicacoes-economia-mineral/arquivos/a-mineracao-e-a-flotacao-no-brasil.pdf/@download/file>. Acesso em: 3 fev. 2026.

ARROYO, C. E. O. **Caracterização geometalúrgica e modelagem geostatística da mina de Brucutu**. 2014. Tese (Doutorado) – UFOP, Ouro Preto, 2014.

BRAGA JÚNIOR, M. M.. **Efeito do scalping de quartzo grosso na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

BRANDÃO, P. R. G. **A seletividade na flotação reversa de minério de ferro: adsorção dos reagentes**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 21., 2005, Natal. Anais... Natal: IFRN, 2005. p. 22–33.

CÂNDIDO, L. M.; BALTAR, C. A. M.; LEAL FILHO, Laurindo de Salles. **Influência da concentração do amido na gelatinização**. In: **SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO**, 18., 2017, São Paulo. Anais... São Paulo: ABM, 2017. v. 47, n. 2. p. 115-123.

CHAVES, A. P.; LEAL FILHO, L. S.; BRAGA, P. F. A. Flotação. In: **Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap. 10, p. 405–459. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/744>. Acesso em 03/03/2026.

COOKE, S. R. B.; SCHULTZ, N. F.; LINDROOS, E. W. **The effect of certain starches on quartz and hematite suspensions**. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, v. 193, p. 697-698, 1952.

COSTA, R. S.; FERNANDEZ, O. J. C. **Tratamento de Minérios**. Cuiabá: Rede e-Tec Brasil/UFMT, 2015.

ESCHWEGE, W. L. v. **Pluto Brasiliensis**. Berlin: Verlag G. Reimer, 1833.

FERRAN, A. P. N.. **A mineração e a flotação no Brasil: uma perspectiva histórica**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2007.

FILIPPOV, L. O.; SEVEROV, V. V.; FILIPPOVA, I. V. **An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation**. *International Journal of Mineral Processing*, v. 127, p. 62–69, 2014.

FRANCO, C. M. L.. **Propriedades gerais do amido**. São Paulo: Fundação Cargill, 2001.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F.. Introdução ao Tratamento de Minérios. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Eds.). **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 3-20.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F.. Introdução ao tratamento de minérios. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Eds.). **Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. p. 3–23.

MATOS, V. **Sistemas de reagentes surfatantes na flotação catiônica reversa de minério de ferro**. 2017. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MONTE, M. B. M.; PERES, A. E. C.. Química de Superfície na Flotação. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (Eds.). **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 399-461.

MOREIRA, W. R. **Fontes de amido aplicáveis à flotação de minério de ferro**. 2012. f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

NEITZKE, P. R. M. C.. **Flotabilidade de hematita e quartzo com amina e amido dosados em microemulsões e nanoemulsões**. 2020. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

REIS, R. L. R. **Propriedades e aplicações do gritz de milho na flotação catiônica reversa de minérios itabiríticos**. 1987. f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1987.

RIBEIRO, E. Q. **Caracterização tecnológica do itabirito pobre compacto – “IPC” da mina Casa de Pedra**. 2011. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

ROCHA, G. M.; MACHADO, N. R. S.; SANTOS, B. T.; CLERICI, M. T. P. S.; PEREIRA, C. A.. **Caracterização tecnológica e avaliação de depressores na flotação de rejeito de minério de ferro**. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 16, n. 1, p. 68-74, 2019.

ROCHA, J. M. P.; BRANDÃO, P. R. G.. **Goethitas da mina de Alegria, MG**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 1., 1996, Ouro Preto. Anais... São Paulo: ABM, 1996. p. 383-402.

RODRIGUES, R. S. **Grau de Liberação de Diferentes Tipos de Minério de Ferro das Minas de Alegria (Mariana-MG) e sua Influência nas Etapas de Cominuição e Concentração**. 2016. f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JÚNIOR, F.. **Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – uma visão geral e discussão**. Geonomos, Belo Horizonte, v. 8, n. 2, p. 27–43, 2000.

SHAPIRO, S. H. **Commercial nitrogen derivatives of fatty acids**. In: PATISSON, E. S. (Ed.). *Fatty Acids and their Industrial Applications*. New York: Marcel Dekker, 1968. p. 77-154.

SILVA, L. A.; SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S.; OLIVEIRA, L. B. A.. **Determinação da relação farinha/NaOH na gelatinização de depressores à luz da microscopia óptica e a sua influência nos testes de flotação mineral**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 19, e2734, 2022.

SOUZA, E. C.; OLIVEIRA, P. S.; SEGATO, M. C.; MOREIRA, T. O. MAGALHÃES, D.; AQUINO, J. A.; ALBUQUERQUE, R. O.; JUNIOR, W. E. **Desenvolvimento de processo para a flotação reversa de pellet feed na mineração Casa de Pedra através da aplicação de novos reagentes, 8 coletores e depressores**. In: Anais do VII Simpósio brasileiro de minério de ferro. Salvador. 2007, v.2, p.598-609.

SOUZA, E. C.; OLIVEIRA, P. S.; SEGATO, M. C.; MOREIRA, T. O.; MAGALHÃES, D.; AQUINO, J. A.; ALBUQUERQUE, R. O.; JUNIOR, W. E. **Desenvolvimento de processo para a flotação reversa de pellet feed na mineração Casa de Pedra através da aplicação de novos reagentes, coletores e depressores**. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 2007, [Local do evento]. Anais [...] v. 2, p. 598-609.

TAGGART, A. F. **Handbook of mineral dressing**. New York: John Wiley, 1945.

TURRER, H. D. G.. **Polímeros depressores na flotação de minério de ferro**. 2007. 305 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

VIANA, P. R. M.; SOUZA, H. S. **The use of corn grits as a depressant for the flotation of quartz in hematite ore.** In: Froth Flotation, Developments in Mineral Processing, Amsterdam, v. 9, p. 233-244, 1988.