



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



EDUHARDA RIBEIRO RIOS

IMPACTOS DA VARIAÇÃO DE DOSAGEM DE AMINA 7848 NA
FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

OURO PRETO

2023

EDUHARDA RIBEIRO RIOS

IMPACTOS DA VARIAÇÃO DE DOSAGEM DE AMINA 7848 NA
FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Coorientador: João Paulo de Sena Garcia

OURO PRETO

2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA
MINERAL



FOLHA DE APROVAÇÃO

Eduarda Ribeiro Rios

Impactos da variação de dosagem de Amina 7848 na flotação de minério de Ferro

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

Aprovada em 28 de março de 2023

Membros da banca

PhD - Hernani Mota de Lima - Orientador (UFOP)
Engenheiro de Minas - João Paulo de Sena Garcia - (Anglo American)
Engenheiro de Minas - Higor Vinícius Lopes Guedes - (Vale SA)

Hernani Mota de Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/04/2023, às 14:01, 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, informando o código verificador **0505950** e o código CRC **255126DA**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.004560/2023-25

SEI nº 0505950

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: (31)3559-1593 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, a Deus por sempre me proporcionar tantas bênçãos.

Aos meus pais, Ramon e Bianca, por sempre me apoiarem e serem meu porto seguro.

Ao Pedro pelo incentivo e apoio.

Aos professores da Universidade Federal de Ouro Preto pelos ensinamentos compartilhados.

À minha segunda família, a República Minas Novas, por ser minha morada e por toda a amizade e apoio.

Aos meus orientadores Hernani Mota de Lima e João Paulo, pela disposição, paciência, incentivo e auxílio necessários para a elaboração deste trabalho.

À Ana, Augusto, Fernando, Janaina, João Paulo e Lucas por terem sido exemplos e parceiros durante todo o estágio. Vocês deixaram tudo melhor.

A Anglo American e a Gerência de Operação de Usina pela oportunidade de estágio e desenvolvimento deste estudo.

À Elisa por toda ajuda, amizade e companheirismo.

À UFOP pelo ensino público e de qualidade.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

Valeu a pena? Tudo vale a pena
Se a alma não é pequena.
Quem quer passar além do Bojador
Tem que passar além da dor.
Deus ao mar o perigo e o abismo deu,
Mas nele é que espelhou o céu.

Fernando Pessoa

RESUMO

O minério de ferro juntamente com seus produtos semi-elaborados possui grande representatividade na economia brasileira. A constante e intensa exploração do minério de ferro de elevados teores, culminaram com o esgotamento da maioria das reservas, resultando no desenvolvimento de técnicas que possibilitassem o aproveitamento de minérios de granulação fina, de baixos teores de ferro e elevados teores de ganga. Entre os métodos de flotação existentes, o método de flotação catiônica reversa é o mais amplamente utilizada na indústria de ferro. No presente estudo de caso, é analisado um processo de flotação catiônica reversa de minério de ferro, utilizando o amido como agente depressor e uma amina como coletor. É apresentada uma análise dos indicadores do processo que geram problemas no resultado do produto final e a identificação da reincidência na falha da dosagem da amina. Logo, foi feita a instalação de uma válvula no equipamento de dosagem que obteve a diminuição do tempo de manobra e a redução dos impactos da variação.

Palavras-chave: Minério de Ferro. Flotação. Amina. Amido.

ABSTRACT

Iron ore, together with its semi-elaborated products, has great representation in the Brazilian economy. The constant and intense exploitation of high grade iron ore culminated in the depletion of most of the reserves, resulting in the development of techniques that made it possible to use fine-grained ores with low iron grades and high levels of gangue. Among the existing flotation methods, the reverse cationic flotation method is the most widely used in the iron industry. In the present case study, a reverse cationic flotation process of iron ore is analyzed, using starch as a depressant agent and an amine as a collector. An analysis of the process indicators that generate problems in the result of the final product and the identification of the recurrence in the failure of the amine dosage are presented. Then, a valve was installed in the dosing equipment, which reduced the maneuver time and reduced the impacts of the variation.

Keywords: Iron ore. Flotation. Amine. Starch.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização das principais reservas minerais brasileiras de alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco.....	15
Figura 2. Etapa mineração e siderurgia.....	19
Figura 3. Fluxograma do processo de beneficiamento do minério de ferro.....	21
Figura 4. Estrutura do amido (α -D-glucose).....	25
Figura 5. Representação do mecanismo de adsorção depressor-mineral.....	26
Figura 6. Vista aérea da Mina do Sapo.....	29
Figura 7. Fluxo de operação Minas-Rio.....	30
Figura 8. Fluxograma simplificado do processo Minas-Rio.....	31
Figura 9. Carga circulante no circuito fechado de britagem.....	32
Figura 10. %SiO ₂ concentrado (19/02/2022).....	38
Figura 11. %Al ₂ O ₃ concentrado (19/02/2022).....	38
Figura 12. %Fe no rejeito realizado (24 – 29/04/2022).....	40
Figura 13. %SiO ₂ concentrado (21 – 26/04/2022).....	40
Figura 14. Variação da dosagem de amina 7848 no PiVSION (28/04/2022).....	40
Figura 15. Variação da dosagem de amina 7848 no PiVSION (02 e 03/08/2022).....	42
Figura 16. Aparelho de dosagem Amina 7848 na Anglo American.....	43
Figura 17. Esquema de funcionamento do aparelho de dosagem de Amina 7848.....	43
Figura 18. Esquema da manobra de drenagem do balão aparelho de dosagem Amina 7848.....	44

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1. Produção mundial de ferro em 2015 e estimativa para o ano de 2016.....	13
Tabela 2. Fórmula química e conteúdo teórico de ferro (em%) dos principais minerais portadores de ferro.....	16
Tabela 3. Principais minerais de ferro e suas características.....	18
Tabela 4. Coletores e suas respectivas estruturas químicas.....	24
Quadro 1. Porcentagem de aderência curva preta PROG x REAL e desvio do dia (19 – 25/02/2022).....	37
Quadro 2. Porcentagem de aderência curva preta PROG x REAL e desvio do dia (16/04 – 29/04/22).....	39
Quadro 3. Qualidade hora a hora concentrado final – 19h de 02/08 à 05h de 03/08/2022.....	42

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Reservas mundiais e brasileiras de minério de ferro	13
3.2 Descrição geológica dos principais depósitos de minério de ferro	15
3.3 Beneficiamento do minério de ferro	18
3.4 Concentração do minério de ferro	22
3.4.1 Flotação	22
3.4.2 Reagentes de flotação	23
3.4.3 Coletor	24
3.4.4 Depressor	25
3.5 Indicadores do processo	26
3.5.1 Recuperação mássica	27
3.5.2 Recuperação metalúrgica	27
4. METODOLOGIA	28
5. ESTUDO DE CASO	29
5.1 Descrição do empreendimento	29
5.2 Mina objeto de estudo: localização e operação	29
5.3 Contextualização	34
5.4 Acompanhamento dos indicadores	35
5.5 Análise de falha	36
5.6 Identificação do problema	41
5.7 Análise de causa	42
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
7. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades essenciais da nossa sociedade, pois através dela são fornecidas as matérias-primas necessárias aos diversos setores que compõem o padrão de vida atual, desde o setor alimentício até o setor tecnológico. Com o crescimento econômico e demandas cada vez maiores temos o impulsionamento da demanda do minério de ferro, todavia, as reservas mundiais de alto teor se esgotaram nos últimos anos (PEREIRA, 2012). Como resultado, a lavra de minérios tem sido realizada em corpos com teores cada vez mais baixos, tornando as etapas de beneficiamento cada vez mais complexas.

O processo de flotação catiônica reversa é o método mais utilizado para tratamento de minério de ferro. Trata-se de um procedimento realizado por meio de uma polpa onde utiliza-se as diferentes características da superfície do material por meio do seu grau de hidrofobicidade (natural ou induzido) para que ocorra a separação entre o minério e a ganga na fase de espuma. Sendo neste caso um método reverso, a ganga de sílica é coletada e os minerais de ferro são precipitados. Para explorar a propriedade diferenciadora das partículas são adicionados reagentes que as aumentam ou as alteram. Para que isso ocorra na concentração do minério de ferro os mais conhecidos reagentes são: o amido, que atua como depressor do minério de ferro e as aminas que exercem função coletora dos minerais de quartzo e função de estabilizadoras da espuma (BASTIELI, 2007; CHAVES, 2010).

As aminas, devido ao seu alto preço e seu consumo considerável à medida que o minério se torna mais pobre, é objeto de preocupação constante, pois representa aumento nos custos operacionais e são peças fundamentais no processo de beneficiamento. Espera-se que o consumo de aminas aumente nos próximos anos principalmente devido ao aumento das metas de produção e diminuição dos níveis ferro no minério (BASTIELI, 2007).

Com os desafios da produção e a dificuldade de teores cada vez mais baixo de ferro, como também aumento dos contaminantes, a dosagem de insumos de forma eficaz é fundamental para entrega de resultados como também impactos positivos nos indicadores da operação de usina. A amina, com sua função coletora, tem uma relação fundamental com o bom desempenho da

recuperação metalúrgica e qualidade do produto final. Dessa forma, a sua dosagem impacta ativamente nesses indicadores. A redução da vazão desse insumo causa problemas na seletividade das partículas, o que dificulta a remoção de sílica e demais contaminantes do concentrado final. Ademais, gera impacto nas entregas da produção e alavancando problemas na flotação e no processo como um todo.

Nesse sentido o presente trabalho apresentou um estudo das consequências da variação da dosagem de amina 7848 nas linhas de produção da Mina do Sapo, que integra o complexo de operação do Minas-rio, gerenciado pela unidade de negócio do minério de ferro pertencente a Anglo American.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo abordar os principais conceitos envolvidos na produção do minério de ferro, através de uma revisão bibliográfica, até as etapas finais de beneficiamento, concentração do mesmo e apresentar um estudo de caso da aplicação da técnica de flotação em uma empresa de mineração de ferro no estado de Minas Gerais.

2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar as consequências da variação da dosagem de amina 7848 nas linhas de produção;
- Análises dos indicadores de performance da operação e melhoria contínua do processo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Reservas mundiais e brasileiras de minério de ferro

O minério de ferro são rochas a partir das quais pode ser obtido ferro metálico de maneira economicamente viável. Quanto aos atributos químicos, o fator de extrema importância é o teor de ferro concentrado no minério, importante para a indústria siderúrgica, uma vez que o minério de ferro com maior teor exige uma quantidade menor de calor para o processamento nos altos fornos, o que economiza energia e reduz a emissão de gases na atmosfera (XIAOWEN, 2020).

A produção mundial de ferro tem como destino principal a indústria siderúrgica para a produção de ferro e aço. De acordo com os dados da pesquisa de levantamento Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey*) de 2013, as reservas mundiais de minério de ferro somam mais de 80 bilhões de toneladas (XIAOWEN, 2020). Austrália, Brasil e China são os maiores produtores mundiais de minério de ferro, juntos esses países produziram em 2015 o equivalente a 70% de todo o minério de ferro produzido no mundo, como é possível observar na **Tabela 1** (CARVALHO, 2017). Também é possível observar que Austrália, Brasil e Rússia possuíam em 2015 as maiores reservas com relativo alto teor de ferro contido. A China apesar de possuir uma reserva expressiva, apresenta um minério com um baixo teor de ferro contido (CARVALHO, 2017).

Tabela 1. Produção mundial de ferro em 2015 e estimativa para o ano de 2016.

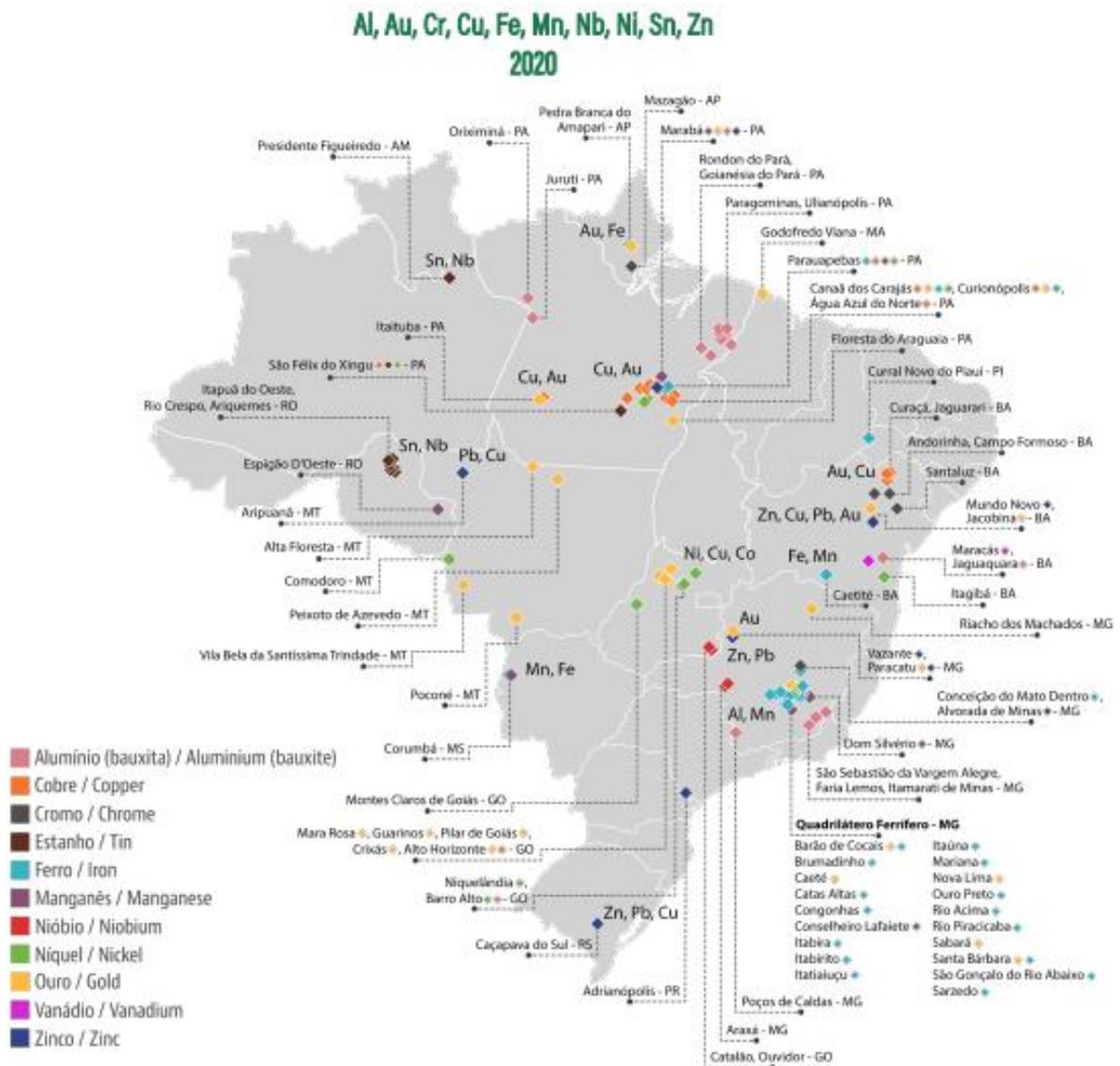
	Produção mundial de minério de ferro				Reservas	
	ROM		Ferro Contido		ROM	Ferro Contido
	2015	2016 ^a	2015	2016 ^a		
United States	46	41	29	26	3,000	790
Australia	817	825	486	491	52,000	23,000
Brazil	397	391	257	254	23,000	12,000
Canada	46	48	28	29	6,000	2,300
China ^b	375	353	232	219	21,000	7,200
India	156	160	96	98	8,100	5,200
Iran	27	26	13	11	2,700	1,500
Kazakhstan	21	21	12	12	2,500	900
Russia	101	100	61	60	25,000	14,000
South Africa	73	60	46	38	1,200	770
Sweden	25	25	15	15	3,500	2,200
Ukraine	67	58	40	35	7,650	7,230
Other countries	132	120	82	75	18,000	9,500
World total (rounded)	2,280	2,230	1,400	1,360	170,000	82,000

Fonte: USGS, 2015

As reservas medidas e indicadas de minério de ferro no Brasil alcançam 29 bilhões de toneladas, situando o país em quarto lugar em relação às reservas

mundiais, de 160 bilhões de toneladas. As reservas brasileiras estão localizadas, em sua quase totalidade, nos estados de Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul, conforme pode ser observado na **Figura 1** (ANM, 2022). Em Minas Gerais as reservas e a produção concentram-se na região denominada Quadrilátero Ferrífero, na porção central do Estado; no Pará, na Serra de Carajás; no Mato Grosso do Sul, nos municípios de Corumbá e Ladário, na porção noroeste do Estado, região do Pantanal Sul-Mato-Grossense na fronteira com a Bolívia (ANDRADE, 2018). O Brasil assume lugar de destaque no cenário internacional, considerando-se as reservas em termos de ferro contido no minério, esse fato é em função do alto teor encontrado nos minérios Hematita (60% de Ferro), predominante no Pará, e Itabirito (50% de Ferro), predominante em Minas Gerais (ANM, 2022).

Figura 1. Localização das principais reservas minerais brasileiras de alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco.



Fonte: Agência Nacional de Mineração, 2022.

As principais empresas produtoras de minério de ferro no mundo são a Vale, Rio Tinto, BHPB, Anglo American que, juntas, obtiveram um faturamento bruto de US\$ 117 bilhões em 2006, de acordo com a *Price Waterhouse Coopers* (LOPES, 2009).

3.2 Descrição geológica dos principais depósitos de minério de ferro

Industrialmente, a única forma pela qual se obtém o ferro (Fe) é a partir de substâncias minerais. O metal é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, de cuja composição participa com 4,5% em massa, superado apenas

pelo oxigênio, o silício e o alumínio (CARVALHO, 2017). Embora faça parte da composição de vários minerais, apenas alguns destes podem ser economicamente explorados para a obtenção do ferro, quer pela quantidade desse elemento nesses minerais, quer pela concentração ou distribuição desses minerais nas rochas que constituem os corpos de minério (CARVALHO et al., 2017).

Os tipos de minério de ferro economicamente explorados podem ser classificados de acordo com a sua composição química do mineral fornecedor do elemento metálico. Eles podem então ser classificados em: óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Para a obtenção do ferro, apenas a exploração dos óxidos tem expressão econômica (CARVALHO et al., 2014). Os principais minerais portadores e seus respectivos teores de ferro são mostrados na **Tabela 2**.

Tabela 2. Fórmula química e conteúdo teórico de ferro (em%) dos principais minerais portadores de ferro

Mineral	Fórmula química	Conteúdo teórico de ferro
Magnetita	Fe_3O_4	72,4
Hematita	Fe_2O_3	69,9
Goethita	$Fe_2O_3H_2O$	62,9
Limonita	$2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$	59,8
Ilmenita	$FeTiO_3$	36,8
Siderita	$FeCO_3$	48,2
Pirita	FeS_2	46,5
Pirrotita	$Fe_{(1-x)}S$	61

Fonte: www.re.unesp.br/museudmp/banco/gmt.html, 2013

Para o minério de ferro, existem principalmente dois tipos de depósitos: sedimentares acamados ou formações ferríferas bandadas (FFB) e depósitos resultantes da alteração e acúmulo em superfície.

As formações ferríferas bandadas são consideradas a mais importante fonte de minério de ferro do mundo, já que ela se encontra em todos os continentes que contenham depósitos com extensões laterais superiores a dezenas de km² contendo 104 - 105 toneladas de ferro. Consiste em depósitos sedimentares acamados de rochas laminadas, as quais são compostas pela alternância entre camadas de sílica e hematita-magnetita, além de carbonatos e silicatos de ferro (VILELA, 2001).

Estas formações ferríferas bandadas recebem diferentes denominações dependendo das características locais, como por exemplo: jaspelito, taconito, ironstone, itabirito, hematita jaspe bandada, hematita quartizito bandado, rocha zebra, barras de jaspe (TAKEHARA *et al.*,2013).

De acordo com Schobbenhaus e Coelho (1990), os principais minerais que contêm ferro em sua fórmula química são:

1. **MAGNETITA (Fe_3O_4)**: apresenta cor preta, brilho metálico, fortemente magnética. Seu teor de ferro é de aproximadamente 72%.
2. **HEMATITA (Fe_2O_3)**: de acordo com a granulometria sua coloração pode variar entre a cor preta até a coloração vermelha. É um mineral não magnético com teor máximo de ferro (estequiométrico) de 70%. A hematita pode ser encontrada: a) em formações ferríferas bandadas (FFB) do Pré-cambriano; b) associada com goethita-limonita em cangas ou minérios oolíticos; c) associada com goethita, calcita e quartzo clássico; e d) em arenitos e quartzitos ferruginosos como material de cimentação.
3. **GOETHITA (FeOOH)**: tem coloração que varia do amarelo ao marrom, não apresenta magnetismo e seu teor de ferro é de aproximadamente 60%. Apresenta pouca consistência e textura porosa e brilho de adamantino a opaco. A goethita é um dos minerais mais comuns e se forma de modo típico, sob condições de oxidação, como produto de intemperismo dos minerais de ferro. Os minerais associados são geralmente hematita e minerais de argila.
4. **SIDERITA (FeCO_3)**: coloração varia de castanho claro a escuro, também não é magnética, transparente, brilho vítreo. O teor de ferro mineral puro é de 48%, mas na maioria das sideritas o ferro pode ser substituído pelo manganês, magnésio ou cálcio. A siderita é encontrada frequentemente em formações ferríferas do Pré-Cambriano e em alguns depósitos mais jovens.
5. **PIRITA (FeS_2) e PIRROTITA (FeS)**: apresentam cor amarelo latão e brilho metálico, com 46,6% de Fe e 53,4% de S, ela é fracamente magnética. A oxidação parcial da pirita e pirrotita produzem depósito de óxidos de ferro que tem sido minerados localmente.

6. **CHAMOISITA** $(\text{Mg,Fe})_3\text{Fe}_3^{+3}(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_8$: tem cor esverdeada, não apresentam magnetismo e são normalmente encontradas nos depósitos fanerozóicos. É minerada localmente na Europa, está geralmente associada à goethita e siderita.

A **Tabela 3** apresenta um resumo dos principais minerais de ferro, sua estrutura cristalina, fórmula química, densidade e teor de ferro.

Tabela 3. Principais minerais de ferro e suas características

Nome	Sistema cristalino	Fórmula química	Densidade	Teor de ferro (%)
Magnetita	Cúbico	$\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	4,97-4,18	72,4
Hematita	Romboédrico-hexagonal	Fe_2O_3	4,9-5,3	70
Martita	Cúbico	Fe_2O_3	4,8-5,3	70
Goethita	Romboédrico	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	4,0-4,4	62,9
Limonita	Misto, principalmente goethita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	3,6-4,0	60
Siderita	Romboédrico-hexagonal	FeCO_3	3,00-3,88	48,2
Pirita	Cúbico	FeS_2	4,95-5,17	46,6

Fonte: Yang, 1988

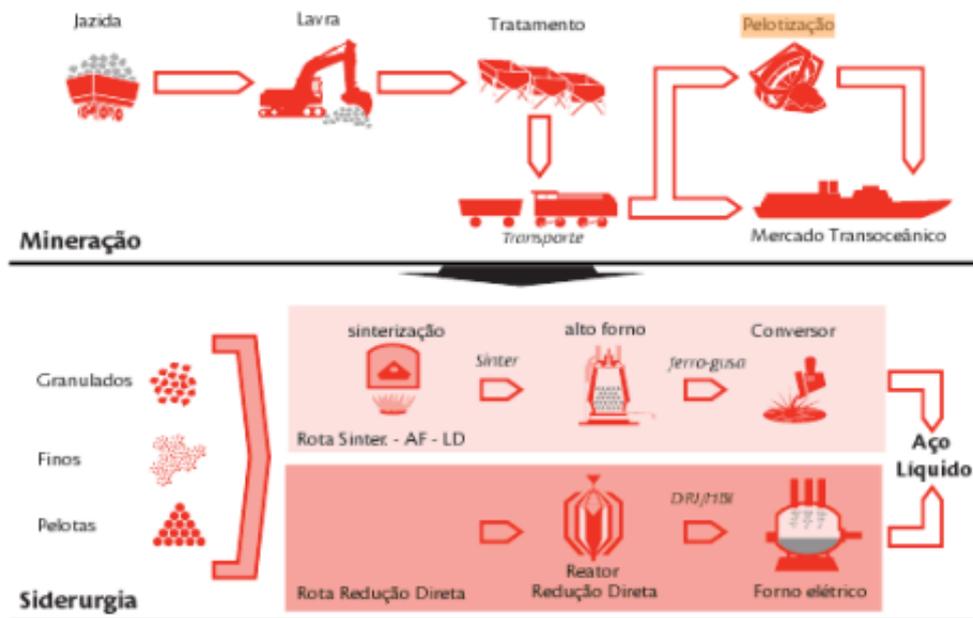
Os depósitos resultantes da alteração e acúmulo em superfície, como o próprio nome diz, são gerados a partir dos processos intempéricos e de lixiviação de rochas ricas em ferro, podendo ser encontrados como blocos rolados. Esse tipo de depósito ocorre normalmente próximos aos depósitos ricos em ferro e apresentam maior impureza, pois são formados a partir de várias fontes de sedimentos. Os minerais de ferro encontrados nesse tipo de depósito apresentam um maior grau de hidratação, sendo que esses minerais hidratados são aqueles que apresentam altos teores de elementos deletérios que ficam retidos na estrutura cristalina (TAKEHARA *et al.*, (2013).

3.3 Beneficiamento do minério de ferro

Conforme exposto anteriormente, na produção mineral brasileira, o minério de ferro é quase que totalmente utilizado na indústria siderúrgica, somente uma pequena parcela do montante da produção são destinadas às indústrias de cimento e química, por exemplo. A **Figura 2** esquematiza em detalhes como ocorre a interdependência da mineração de ferro e da siderurgia. Através das operações de lavra, faz-se a exploração (aproveitamento econômico) do minério da jazida, encaminhando-se o produto bruto (comumente

chamado de *run of mine* - ROM), para o beneficiamento. Este material é então submetido a uma série de operações de fragmentação, classificação por tamanhos, concentração, desaguamento, por exemplo, com o objetivo de alterar a forma química, física e metalurgicamente às exigências dos processos siderúrgicos (CGEE, 2010).

Figura 2. Etapa mineração e siderurgia



Fonte: CGEE, 2010

As indústrias mineradoras de grande porte possuem um processo de produção integrado, da mina ao porto, e o fluxo principal desse processo tem foco no controle para garantir a alta eficiência produtiva e baixos custos operacionais, levando sempre em consideração a segurança das operações, principalmente no que diz respeito ao meio ambiente que nos últimos anos tem sido um ponto extremamente ressaltado no processo de beneficiamento do minério (PEREIRA,2013).

O termo tratamento ou beneficiamento de minérios pode ser definido como o conjunto de operações, aplicadas aos bens minerais, com o objetivo de modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma. Essas operações devem ocorrer sem modificar a identidade química ou física dos minerais (LUZ *et al.*, 2004).

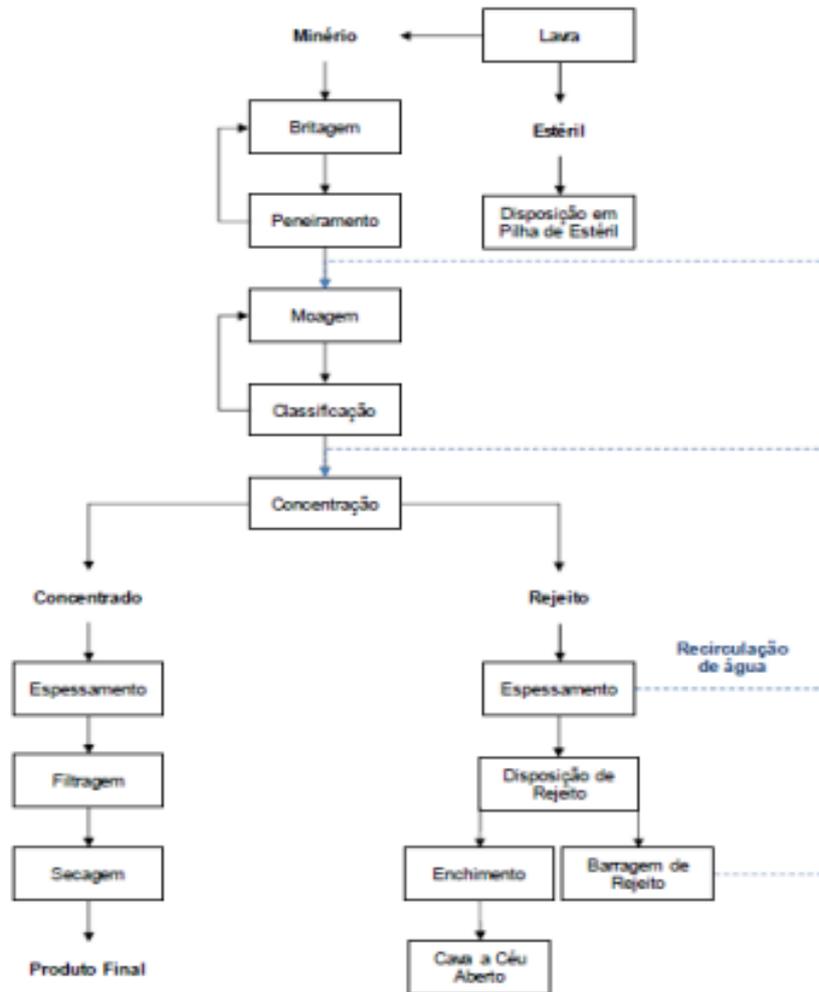
Em função do valor unitário da tonelada do minério de ferro, para que o

processo de beneficiamento seja economicamente viável, é necessário que as operações sejam realizadas em grande escala (ordem de milhões de toneladas/ano), o que demanda equipamentos de grande porte com elevada capacidade unitária. Apesar de simples, é fundamental que todas as etapas do processo sejam dimensionadas e controladas corretamente, de forma a minimizar seus custos e assegurando a qualidade final do produto beneficiado (GOMES, 2009).

Segundo Lins (2004) o processo de beneficiamento do minério de ferro consiste basicamente das seguintes operações, conforme pode ser observado na **Figura 3**:

- **Operações de cominuição (redução de tamanho):** obter a liberação do mineral: britagem e moagem.
- **Operações de separação por tamanhos:** peneiramento e classificação granulométrica (ciclonação, classificador espiral), além da deslamagem ou desempoeiramento.
- **Concentração:** concentrações gravítica, magnética, eletrostática, por flotação.
- **Operações auxiliares de desaguamento:** eliminação de parte da água do concentrado): espessamento e filtração.
- **Secagem:** secador rotativo, spray dryer, secador de leito fluidizado

Figura 3. Fluxograma do processo de beneficiamento do minério de ferro



Fonte: Lins, 2004

O beneficiamento de minério de ferro, principalmente no Brasil e na Austrália, onde os depósitos de grandes dimensões e alto teores são predominantes, permite que uma parcela expressiva dos produtos seja gerada apenas pelas etapas de britagem e classificação, este é o caso por exemplo de Carajás (PA) (GOMES, 2009).

Quando após a etapa de separação de tamanho são obtidos produtos com baixo teor de ferro é necessário a utilização de etapa de concentração (GOMES, 2009). Na maioria dos casos, as operações de concentração são realizadas a úmido. Antes de se ter um produto para ser transportado, ou mesmo adequado para a indústria química ou para a obtenção do metal por métodos hidropirometalúrgicos é necessário eliminar parte da água do concentrado. Estas operações compreendem desaguamento (espessamento e filtragem) e secagem (LUZ e LINS, 2010).

3.4 Concentração do minério de ferro

3.4.1 Flotação

A flotação é um processo físico de separação de misturas heterogêneas, aplicado a partículas sólidas baseado nas diferenças de densidade entre os materiais presente no sistema. É um processo que consiste basicamente em adicionar uma vazão de um gás ao sistema, fazendo com que as partículas em suspensão em fase aquosa (menos densas), passem a aderir-se a bolhas provenientes da vazão do gás e da substância líquida, tornando possível então a separação das impurezas do material útil. A escolha pelo processo é definida através de estudos dos minerais, com intuito de entender como é a sua estrutura superficial e molecular, possibilitando o aumento das chances de sucesso do método utilizado (SILVA, 2004).

A concentração de minerais por flotação requer três condições básicas (PERES, 2004):

1. **Liberabilidade:** a liberação dos grãos dos diferentes minerais é obtida através de operações de fragmentação (britagem e moagem), intercaladas com etapas de separação por tamanho;

2. **Diferenciabilidade:** é a base da seletividade do método. A seletividade do processo de flotação baseia-se no fato de que a superfície de diferentes espécies minerais pode apresentar diferentes graus de hidrofobicidade;

3. **Separabilidade dinâmica:** está diretamente relacionada aos equipamentos empregados. As máquinas de flotação caracterizam-se por possuírem mecanismos capazes de manter as partículas em suspensão e possibilitarem a aeração da polpa.

A principal impureza responsável pela perda da qualidade do minério de ferro é o quartzo, e para separar essa ganga silicática as mineradoras vem utilizando vários processos de flotação: a flotação catiônica reversa do quartzo, flotação aniônica direta de óxido de ferro e flotação aniônica reversa de quartzo ativo. Entre os métodos de flotação citados, o método de flotação catiônica reversa é o mais amplamente utilizada na indústria de ferro (NASCIMENTO, 2010).

No presente trabalho, o processo analisado no estudo de caso, é o de flotação catiônica reversa de minério de ferro, que de acordo Sousa (2016),

consiste na utilização de uma eteramina, um tensoativo iônico carregado positivamente e que apresenta função de coletor e espumante, agregando as partículas de quartzo nas bolhas originadas pela força aplicada pela vazão do gás agitando as moléculas do líquido inserido no sistema, facilitando a flotação dele.

O termo 'reversa' na titulação do procedimento representa a promoção da flotação das impurezas do minério, no caso o quartzo, e depressão do material útil, a hematita, utilizando o amido. O hidróxido de sódio (NaOH) e ácido clorídrico (HCl) são utilizados para ajustar o pH alcalino da mistura, que se encontra na faixa entre 10 e 10.5, faixa onde será observada máxima flotabilidade.

3.4.2 Reagentes de flotação

Reagentes de flotação por definição são aqueles compostos orgânicos e inorgânicos adicionados com o objetivo de controle das características das interfaces envolvidas no processo. De acordo com sua função específica em um sistema de flotação, os reagentes podem ser divididos em: coletores, espumantes e modificadores ou reguladores. As ações dos modificadores são diversas, destacando-se: ajustar o pH do sistema, controlar o estado de dispersão da polpa, facilitar e tornar mais seletiva a ação do coletor (função designada como ativação) e tornar um ou mais minerais hidrofílicos e imunes à ação do coletor, função conhecida como depressão. Na flotação catiônica reversa de minério de ferro, os reagentes utilizados são os coletores e depressores. As aminas são utilizadas como coletores de quartzo e espumantes; o amido é utilizado como depressor de hematita (ARAUJO *et al.*, 2008).

De maneira resumida, o processo de flotação consiste basicamente na separação seletiva entre as partículas de quartzo e os óxidos de ferro. A amina graxa é adicionada ao sistema, sendo adsorvida na superfície do quartzo e ambos são removidos na forma de espuma do sistema. Entretanto, na faixa de pH próximo a 10, em que ocorre a flotação, tanto a superfície do quartzo, quanto da hematita, são carregadas negativamente e poderiam adsorver a amina, embora a atração seja maior para o quartzo. Para evitar que o óxido de ferro seja flotado, é utilizado o amido como agente depressor (ARAUJO *et al.*, 2008).

3.4.3 Coletor

Os coletores são substâncias orgânicas, eletricamente carregadas ou neutras que, que atuam na interface sólido-líquido, alterando a superfície mineral hidrofílica, tornando-a hidrofóbica, ou reforçam a hidrofobicidade existente de determinado mineral (BULATOVIC, 2007).

Os principais coletores catiônicos são as aminas, que são derivadas da amônia (NH_3), onde alguns átomos (no máximo três) de hidrogênio são substituídos por um número correspondente de cadeias hidrocarbônicas. As aminas podem ser classificadas pelo comprimento da cadeia hidrocarbônica, como eteraminas, aminas graxas, diaminas graxas (DEDES, 2018). A amina e seus derivados estão apresentados conforme o **Tabela 4**, assim como suas estruturas químicas.

Tabela 4. Coletores e suas respectivas estruturas químicas

Coletores	Estrutura química
Amina Primária	$R-\ddot{N}H_2$
Diamina Primária	$R-\ddot{N}H-CH_2-CH_2-CH_2-\ddot{N}H_2$
Éter amina	$R-\ddot{O}-CH_2-CH_2-CH_2-\ddot{N}H_2$
Éter diamina	$R-\ddot{O}-CH_2-CH_2-CH_2-\underset{H}{\ddot{N}}-CH_2-CH_2-CH_2-\ddot{N}H_2$
Condensado	$R-\overset{H}{\underset{ }{C}}-\underset{ }{N}-CH_2-CH_2-\underset{H}{\ddot{N}}-CH_2-CH_2-\underset{ }{N}-\overset{H}{\underset{ }{C}}-R$

Fonte: Prasad, 1992

De acordo com a literatura, existem dois mecanismos propostos para explicar a adsorção das aminas e seus derivados na superfície mineral (FURTADO, 2017):

- 1. ATRAÇÃO ELETROSTÁTICA:** quando a superfície do mineral é negativa e o grupo funcional positivo. As moléculas atuam como contra-íons e as aminas devem estar na sua forma neutra, se posicionando entre as espécies carregadas.
- 2. INTERAÇÕES INTERMOLECULARES LATERAIS ENTRE AS CADEIAS HIDROCARBÔNICAS E QUE INTERAGEM POR FORÇAS DE VAN DER WALLS:** Acontece com o aumento da concentração de coletor e formação de hemimicelas. Este tipo de

interação complementar o filme hidrofóbico formado na interface da partícula mineral (SOMASUNDARAN & RAMACHANDRAN, 1988).

O mecanismo de adsorção por atração eletrostática é predominante, embora o desenvolvimento de ligações hidrofóbicas entre suas cadeias hidrocarbônicas e conseqüente formação de hemimicelas também sejam essenciais à imobilização do coletor na superfície do mineral e completa hidrofobização (LEJA, 1982).

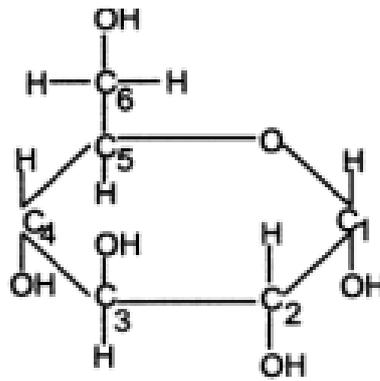
3.4.4 Depressor

Os depressores são compostos que melhoram a interação entre a superfície do mineral e moléculas de água, além de evitar a adsorção do coletor sobre o mesmo. Os depressores podem ser de dois tipos: orgânico e inorgânico (NASCIMENTO, 2010).

O amido é o depressor universal utilizado na flotação de minério de ferro. Ele pode ser extraído de várias espécies vegetais como milho, mandioca, arroz, batata, trigo, por exemplo. Na indústria mineral o amido mais utilizado é o amido de milho, ele é utilizado na flotação de minério de ferro no Brasil desde 1978 (ARAÚJO; VIANA; PERES, 2005).

O amido é uma reserva energética vegetal formada basicamente por moléculas de α -D-glucose (**Figura 4**). A unidade D-glucose tem uma estrutura cíclica composta de cinco átomos de carbono e um átomo de oxigênio e α representa a orientação axial do grupo hidroxila ligado aos átomos de carbono C-1 (LIU *et al.*, 2000).

Figura 4. Estrutura do amido (α -D-glucose)

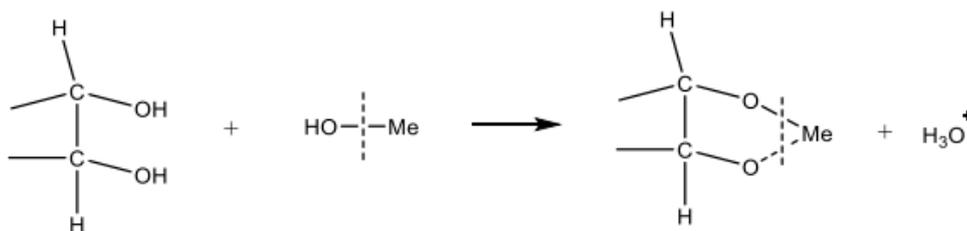


Fonte: Liu et al., 2000

As macromoléculas do amido são altamente hidrofílicas em função da presença de muitos grupos hidroxila (OH) no monômero D-glucose, por isso ela ele utilizado como depressor e floculante seletivo para óxidos de ferro (Liu *et al.*, 2000).

Apesar da aplicação do amido e de outros polissacarídeos como depressores em processos de flotação, ainda não foram bem estabelecidos os mecanismos de adsorção polissacarídeos-mineral (PAVLOVIC, BRANDÃO, 2003; BUDEMBERG, 2016). Entretanto em estudo desenvolvido por Liu e Laskowski, 2000, demonstrou que os polissacarídeos podem ser utilizados como depressores no processo de flotação já que possuem grande número de grupos hidroxila livres, que forma ligações de hidrogênio com o metal presente na superfície mineral, dando origem a complexos metal-polissacariode no formato de anel de 5 membros, sendo observado também a queda no pH da polpa (**Figura 5**).

Figura 5. Representação do mecanismo de adsorção depressor-mineral



Fonte: Liu et al., 2000

3.5 Indicadores do processo

3.5.1 Recuperação mássica

A recuperação em massa (Y) de um processo é a relação entre a massa de concentrado e a massa de alimentação do sistema, a qual é dada por:

$$Y = \frac{C}{A} \times 100$$

Expressando a recuperação em massa em função dos teores, tem-se

$$Y = \frac{(a - e)}{(c - e)} \times 100$$

3.5.2 Recuperação metalúrgica

A recuperação metalúrgica do componente (i) (R) no concentrado é dada pela equação:

$$R = \frac{Cc}{Aa} \times 100$$

Expressando a recuperação metalúrgica em função dos teores, tem-se:

$$R = \frac{c(a - e)}{a(c - e)} \times 100$$

4. METODOLOGIA

O presente trabalho foi um estudo de caso da unidade de beneficiamento do minério explorado na mina do SAPO, localizada em Conceição do Mato Dentro – MG, administrada pela Anglo American.

As informações e observações foram coletadas em um estágio na usina mencionada, durante o período compreendido entre abril de 2021 e dezembro de 2022. Portanto, o estudo de caso baseia-se na vivência do aluno juntamente com o auxílio essencial dos profissionais da empresa.

5. ESTUDO DE CASO

5.1 Descrição do empreendimento

A Anglo American trata-se de um empreendimento global do setor de mineração, trabalhando de forma diversificada com minerais de vida útil e longa. Dentre suas áreas de atuação, o complexo Minas-Rio localizado no estado de Minas Gerais no município de Conceição do Mato Dentro e Alvorada de Minas. Trata-se de uma operação de exportação de minério de ferro integrada com mina, planta de beneficiamento e mineroduto que destina o material para a etapa de filtragem em uma instalação dedicada a exportação em Porto do Açu no Rio de Janeiro.

5.2 Mina objeto de estudo: localização e operação

A operação Minas-Rio iniciou no ano de 2014 com uma capacidade produtiva de 26,5 milhões de toneladas naturais por ano de pellet feed (TURRER, 2015). O depósito mineral da Mina do Sapo (**Figura 6**) possui quase a totalidade de seu minério constituído por Itabirito, com teores de ferro entre 25% e 60% (BARROS, 2017). O minério de ferro é caracterizado por material compacto, semi-compacto e friável.

Figura 6. Vista aérea da Mina do Sapo



Fonte: Google Maps, 2023

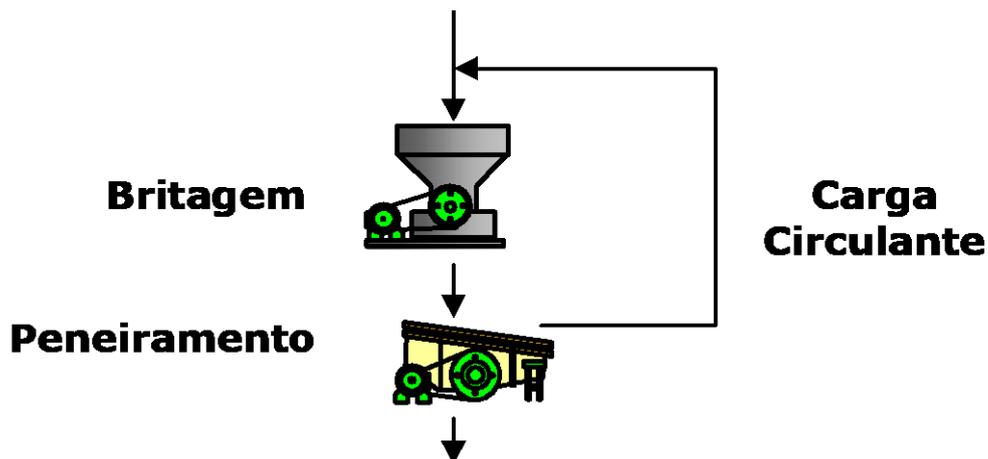
O fluxo de operação começa na mina de lavra a céu aberto com a utilização do método de lavra por bancada. O minério proveniente da mina (ROM), com tamanho máximo de 850mm, será transportado através de caminhões fora de estrada de 240t de capacidade e descarregado nos silos. Destes silos, o minério será retomado pelos alimentadores de placas, sendo alimentado, respectivamente, nas grelhas vibratórias. O material retido nas grelhas vibratórias, acima de 150 mm, alimentará os britadores de mandíbulas. O material passante na grelha vibratória, juntamente com o produto do britador de mandíbulas, será descarregado, sequencialmente, no transportador de correia e assim o material abastece o silo do peneiramento (**Figura 7 e Figura 8**).

Figura 7. Fluxo de operação Minas-Rio



Fonte: Anglo American, 2023

Figura 9. Carga circulante no circuito fechado de britagem



Fonte: Anglo American, 2023

O material passante nas peneiras, seguirá, sequencialmente, para os transportadores de correia, para formação da pilha pulmão, com 123.177 m³ de capacidade, correspondentes a uma autonomia de 8 horas. A pilha será dotada de sistema de nebulização de água. O desviador de fluxo possibilitará o “by-pass” da pilha pulmão, através do transportador de correia. Com isso, o material alimentará a usina

O minério vindo da prensa de rolos e/ou da pilha pulmão alimenta os silos das duas linhas de operação da usina. O minério passa então para os alimentadores de correia que alimenta os moinhos de bolas. Na alimentação dos moinhos temos além da adição da água, em alguns momentos, adição de soda para uma correção do pH da polpa que ajudam na promoção da dispersão das partículas na deslamagem. O material cominuído na saída dos moinhos descarrega em caixas individuais e é bombeado para a bateria de hidrociclones classificadores.

Nessa etapa o *underflow* retorna aos moinhos como carga circulante e o *overflow* segue por gravidade até as caixas de polpa do primeiro estágio da deslamagem que é realizada em dois estágios. O *overflow* da classificação da moagem alimenta os hidrociclones de 15”. O *overflow* que sai dos ciclones segue, por gravidade e vão para o segundo estágio da deslamagem em um hidrociclone 4” que faz a deslamagem da fração fina. O *underflow* das duas etapas vai para a flotação enquanto o *overflow* vai para o espessador de lamas.

O circuito de flotação, conforme dito anteriormente recebe o *underflow* do primeiro e segundo estágio da deslamagem. Sendo assim o material do *underflow* vai para os tanques condicionadores de polpa com os reagentes. Nesse primeiro tanque é adicionado o amido gelatinizado com objetivo de envolver as partículas de ferro para depressão da ação do coletor e o CO₂ e soda para correção do pH da polpa. Por transbordo, a polpa segue para o tanque condicionador secundário onde se adiciona a amina, reagente coletor de sílica e adicionado também água para correção da densidade. O material alimenta as células de flotação.

O primeiro estágio desse processo é a etapa *rougher* onde rejeito será direcionado ao espessador de lamas. O concentrado dessa etapa alimenta a *cleaner 1* que alimenta o *cleaner 2* e o concentrado desse alimenta o *cleaner 3*. Depois dessas etapas o concentrado do *cleaner 3* é o produto da flotação que por gravidade alimenta as caixas de concentrado final da flotação. Enquanto isso o rejeito do *cleaner 1*, *cleaner 2* e *cleaner 3* alimenta a *scavenger I* e o *underflow* vai para a *scavenger II*. Após isso o overflow dessas etapas e o rejeito da etapa *rougher* compõe o rejeito final da etapa da flotação. Enquanto isso o concentrado do *scavenger II* alimenta a caixa de recirculação, retornando esse material para o início do processo, na etapa *rougher*.

Na etapa da remoagem o concentrado do *cleaner 3* proveniente da etapa de flotação alimenta o tanque da remoagem e é bombeado para a classificador de ciclones de 20". O *underflow* da classificação alimenta os moinhos secundários, tipo vertimill e o produto da remoagem retorna para o tanque em um circuito fechado. O overflow dos ciclones é o produto da remoagem e alimenta o espessador de concentrado.

Os fluxos de *overflow* da bateria de hidrociclones da classificação da remoagem alimenta o espessador de concentrado. Na caixa de alimentação do espessador adiciona-se cal, coagulante e floculante para auxiliar na sedimentação. O fluxo do *underflow* do espessador do concentrado é bombeado para o mineroduto júnior na faixa de 69,5% a 71% de sólidos. Abaixo de 69,5% o material é recirculado para promover o adensamento da polpa. O fluxo *overflow* do espessador de concentrado segue para o reservatório de água recuperada pela usina.

Os fluxos de *overflow* das etapas de 4ª deslamagem e o rejeito da flotação

alimenta o espessador de lamas. Na caixa de alimentação do espessador é adicionado cal e floculante na calha do espessador para auxiliar na sedimentação dos sólidos. O *underflow* do espessador de lamas é bombeado para a barragem e o fluxo de overflow do espessador de rejeito e lama seguem para o reservatório de água recuperada da usina se juntando ao fluxo de overflow do espessador concentrado.

5.3 Contextualização

O processo de concentração de minério de ferro realizado pela empresa é por meio da flotação catiônica reversa. Como já dito anteriormente, esse processo é relacionado diretamente com o grau de hidrofobicidade (natural ou induzido) das partículas que desejamos separar na fase de espuma, logo o processo de flotação reversa é onde os minerais de ganga são os flotados e o minério permanece na polpa (CHAVES, 2010).

O processo de beneficiamento como um todo é complexo. São várias etapas, onde cada uma delas desempenham um importante papel, desde diminuição da granulometria, retirada da lama, preparação da polpa, separação e dentre outros. Temos avaliação a respeito do desempenho dos equipamentos, qualidade do material que alimenta a usina, além de todo o contexto do processo naquele dia de produção.

No dia-a-dia da operação temos que lidar frequentemente com variação dos teores dos minérios alimentados o que gera impactos no concentrado final. Com isso, a Anglo American trabalha com dois produtos finais de diferentes especificações de maneira a ajudar nessa variação e usar ela a nosso favor. Dessa forma, é possível monitorar melhor a qualidade, e assim, manter dentro da especificação desejada.

O primeiro produto é denominado Blast Furnance (BF), que possui especificação de qualidade com porcentagem de sílica desejada no concentrado final de 2,75%, podendo chegar no máximo em 2,95%. Já o segundo tipo de produto é Direct Reduction (DR) com porcentagem de sílica e alumina no concentrado final de 1,80%. Sendo assim é realizado o acompanhamento destes produtos, através das campanhas, tendo assim uma análise diária se a produção fechou dentro do programado para os teores estimados e a qualidade da

campanha. A partir desse acompanhamento, por meio de relatórios horários e diários dos principais indicadores do processo, é possível avaliar a margem de perdas e/ou ganhos do dia, além de ajustar os parâmetros do processo para atingimento da qualidade especificada.

Além da preocupação com os teores finais do produto, desde o acidente no mineroduto, ocorrido no ano de 2018, há também a preocupação com o *blaine* (superfície específica). Esse fator é responsável pelo controle do *yield stress* (tensão de escoamento) que é fundamental para evitar danos a integridade do mineroduto e assim, impedir novos acidentes.

Dentre os diversos fatores que implicam no desempenho da produção, a dosagem de insumos é um dos pontos a se atentar. A falta de um insumo ou até mesmo o seu excesso podem trazer riscos para a entrega do produto final e acarretar problemas na produção como um todo.

Na flotação tem-se adição de reagentes que são os responsáveis para o controle das características da interface durante o processo e eles podem agir com a função de depressores ou coletores (BASTIELI, 2007). Logo, essa adição é primordial para que o processo de separação do minério da ganga ocorra. Na empresa em questão o reagente depressor é o amido de milho e como agente coletor temos a o uso de dois tipos de amina: a amina 7848 (eterdiamina) e amina 7500 (etermonoamina). A primeira usada nos tanques condicionadores e a segunda usada de forma estagiada na *cleaner 1* e na *cleaner 2* para otimizar a performance da flotação.

A dosagem de reagentes, seja na sua função coletora ou depressora no processo de flotação, impacta ativamente nos indicadores do processo de produção, recuperação metalúrgica e qualidade do produto, pois agem na seletividade das partículas. Portanto, o controle da sua vazão e sua dosagem é fundamental, visto que o seu descontrole gera impactos na seletividade de partículas dificultando, dessa forma, a remoção da sílica no concentrado final.

5.4 Acompanhamento dos indicadores

Os problemas na rotina operacional acarretam prejuízos para o dia da produção, como por exemplo, os indicadores abaixo do programa e um produto final fora das especificações desejadas. Dentre os mais variados controles de

indicadores e monitoramento das entregas cotidianas, a variação de dosagem de insumos já gerou gatilhos de análise de falha. Com isso, é de extrema importância uma solução para o problema de modo que este não seja mais recorrente e não se some a mais um dos inúmeros imprevistos da rotina da operação, como manutenção, falhas de equipamentos e dentre outros.

Os denominados gatilhos são gerados através da não adesão dos valores programados de algum indicador em decorrência de algum problema no dia operacional ou até mesmo naquela semana. Um dos pontos que geram gatilhos é o indicador de % de aderência a curva preta, avaliado de forma semanal. Ele relaciona o % de recuperação em massa realizado a partir do % Fe na alimentação do circuito de concentração. Os gatilhos gerados são repassados para o setor responsável para que seja efetuado a análise de falha de modo a identificar as causas raízes dos problemas que ocorreram e as soluções propostas que estão em andamento ou realizadas.

Dessa forma foi apresentada uma análise da performance em semanas distintas em que se teve gatilhos gerados como também resultados impactados na produção para uma melhor compreensão e demonstração da importância do acompanhamento do processo e seus indicadores de forma a trazer os problemas gerados como também medidas e soluções que foram tomadas. Posteriormente será detalhado o problema na variação de dosagem de amina 7848 que foi algo recorrente para a apresentação e aplicação de uma solução mais eficiente.

5.5 Análise de falha

Na semana do dia 19 a 25 de fevereiro de 2022 foi gerado um gatilho para análise de falha de % de aderência a curva preta abaixo do programado. Para a análise são levantados os dados do indicador dessa semana tanto dos resultados programados e quanto realizados dia a dia. Em seguida, são identificados os dias que fecharam abaixo do programado e é feito um levantamento dos ocorridos que possam ter impactado na aderência a curva preta para a identificação dos problemas e justificativas (**Quadro 1**).

Como essa metodologia foi realizado a coleta e separação dos dados programados e realizados da semana e assim a identificação dos dias que

geraram maior impacto neste período para o indicador de % aderência a curva preta (**Quadro 1**).

Quadro 1. Porcentagem de aderência curva preta PROG x REAL e desvio do dia (19 – 25/02/2022)

DATA	Aderência Curva Preta Programado	Aderência Curva Preta Realizado	Desvio
19/02/2022	93,55%	91,92%	-1,63%
20/02/2022	94,62%	97,42%	2,79%
21/02/2022	96,60%	84,81%	-11,79%
22/02/2022	96,28%	97,67%	1,39%
23/02/2022	94,71%	96,60%	1,89%
24/02/2022	100,78%	97,76%	-3,02%
25/02/2022	101,17%	104,09%	2,92%
MÉDIA	96,82%	95,75%	-1,06%

Fonte: Anglo American

Conforme observado no **Quadro 1**, os dias que prejudicaram a semana foram os dias 19, 21 e 24 de fevereiro. Com base nesses dados, inicia-se a análise de todos os indicadores e ocorrências do dia para conclusão de qual foi a causa raiz da entrega abaixo do programa.

No dia 19 de fevereiro houve uma falha na preparação de amido na etapa de gelatinização, na dosagem de soda, que impactou na seletividade da flotação. Por consequência é observado um aumento da porcentagem de sílica e alumina no concentrado final (**Figura 10** e **Figura 11**), prejudicando assim a entrega do dia. Além disso, uma parada de 1,89 horas efetivas devido ao rasgo rompido 0221-TR-02 ocasionando corte nas duas linhas. Ademais, esse mesmo rasgo também foi o que afetou a produção no dia 21 de fevereiro, tais paradas geram instabilidade no circuito prejudicando a performance do processo.

Figura 10. %SiO₂ concentrado (19/02/2022)



Fonte: Anglo American

Figura 11. %Al₂O₃ concentrado (19/02/2022)



Fonte: Anglo American

Por fim, no dia 24 de fevereiro obteve-se um resultado abaixo devido um aumento na dosagem de finos para correção do *blaine*, ou seja, adição de lama que acarreta aumento nos teores de contaminantes do concentrado final. Ademais, houve também a redução de *setpoint* devido ao nível baixo da pilha e, uma baixa vazão na dosagem de amina 7848 na linha 1. Com a variação de taxa causando mais instabilidade no circuito e problemas na vazão do agente coletor perdeu-se a seletividade da flotação e assim, impactando o resultado final.

Com base nesses problemas foram realizadas duas medidas mitigatórias, a primeira a implementação de uma lógica de segurança dos fluxos prioritários da soda para priorizar o fluxo na preparação de gelatinização do amido. A outra foi a manutenção elétrica no *flowmeter* (medidor de vazão) do aparelho da amina 7848.

Para sequência, foi feita uma segunda análise de outros dois gatilhos gerados no mês de abril referente a aderência a curva preta abaixo do programa nas semanas do dia 16 a 22 de abril e 23 a 29 de abril de 2022. A metodologia aplicada seguiu o mesmo padrão (**Quadro 2**).

Quadro 2. Porcentagem de aderência curva preta PROG x REAL e desvio do dia (16/04 – 29/04/22)

DATA	Aderência Curva Preta Programado	Aderência Curva Preta Realizado	Desvio
16/04/2022	97,81%	96,23%	-1,58%
17/04/2022	94,22%	95,62%	1,40%
18/04/2022	94,06%	97,16%	3,10%
19/04/2022	92,13%	92,44%	0,31%
20/04/2022	87,60%	87,33%	-0,28%
21/04/2022	94,04%	80,68%	-13,36%
22/04/2022	100,20%	82,16%	-18,03%
MÉDIA	94,29%	90,23%	-4,06%
23/04/2022	85,89%	92,36%	6,48%
24/04/2022	101,02%	88,24%	-12,77%
25/04/2022	103,16%	99,51%	-3,65%
26/04/2022	103,03%	97,27%	-5,76%
27/04/2022	102,17%	99,96%	-2,21%
28/04/2022	97,79%	97,47%	-0,32%
29/04/2022	98,14%	93,92%	-4,22%
MÉDIA	98,74%	95,53%	-3,21%

Fonte: Anglo American

Detalhando os dados da primeira semana (16 a 22 de abril de 2022) observa-se que os dias que apresentaram desvios consideráveis foram os dois últimos e esses são os maiores responsáveis pelo resultado abaixo do esperado. Sendo assim, no dia 21 teve a ocorrência novamente da variação da dosagem de amina 7848 que, conseqüentemente, impacta na qualidade final do produto gerando assim um teor de sílica no concentrado final acima das especificações para a campanha DR, comprometendo o resultado da campanha, -diminuindo os indicadores de recuperação mássica e assim impactando na aderência a curva preta. No dia 22 houve adição de finos para correção de *blaine*, ou seja, adição de lama que acarreta aumento nos teores de contaminantes do concentrado final, prejudicando os resultados diários.

Já na segunda semana (23 a 29 de abril de 2022) teve-se vários dias com resultados abaixo do programa. No dia 25 produção prejudicada com corte na alimentação e redução de *setpoint* para controle de torque do espessador de concentrado, o que refletiu nos resultados de ferro no rejeito acima da especificação.

Dia 26 foi marcado pela baixa concentração de amido impactando na seletividade da flotação assim, foi feita alterações na flotação para buscando

Além das ações cotidianas de manobras na flotação buscando melhores resultados, outra medida tomada foi a realização da troca da bomba de dosagem de amina 7848 como meio de mitigar o problema com a sua dosagem.

5.6 Identificação do problema

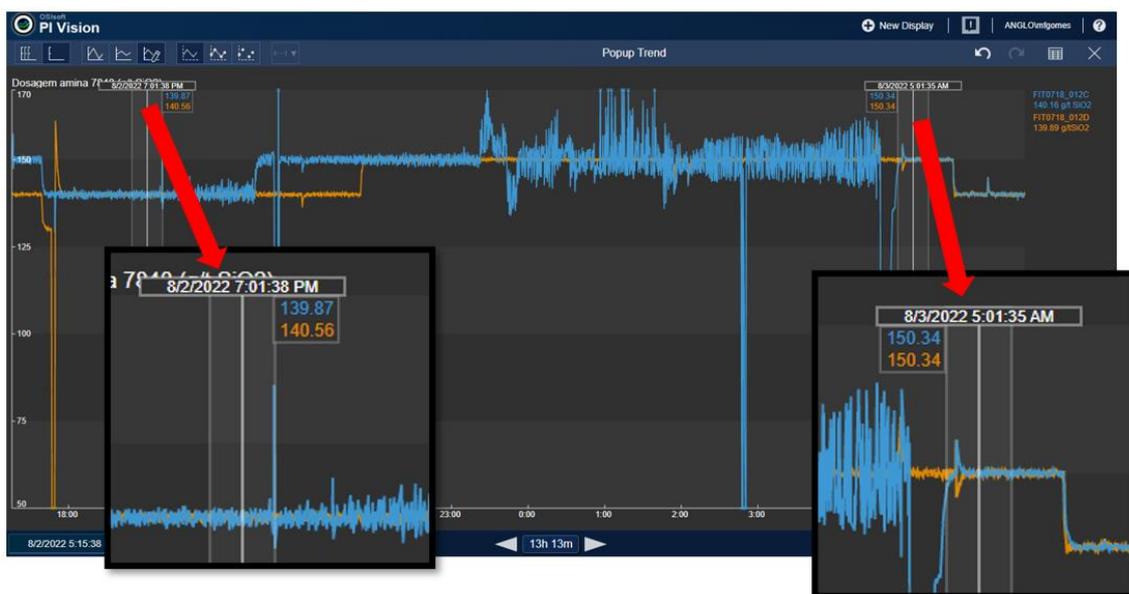
Para o desenvolvimento do processo de flotação, muito tempo, esforço e investimento são gastos na escolha de reagentes que proporcionem separações mais eficientes, em termos de concentração. Logo, em uma escala industrial, controlar a adição de reagentes é a parte mais importante de todo esse processo (BULATOVIC, 2007).

Devido ao alto preço das aminas e ao aumento do seu consumo à medida que o teor minério ferro fica mais pobre e, portanto, mais rico em sílica, as aminas são uma preocupação constante para as empresas que as utilizam, dada a sua representatividade em termos de custos operacionais (BASTIELI, 2007). Como já citado, a amina desempenha função coletora sendo assim de extrema importância o controle da sua vazão, pois qualquer problema resulta em impactos nos indicadores de recuperação metalúrgica e qualidade do produto final. Conforme observou-se nas análises de falha, os problemas na falha de dosagem de amina 7848 são frequentes. E por isso foi necessário a adoção de melhorias.

Além dos eventos apresentados em fevereiro e abril e demais eventos não citados, houve um problema na dosagem de amina 7848 que chamou atenção da equipe operacional. Apesar de todas as ações foram tomadas, o problema persistiu, sendo necessária uma ação mais eficiente.

No dia 02 de agosto de 2022 até o dia 03 de agosto de 2022 do período de sete horas da noite até as cinco horas da manhã, foi identificado uma instabilidade na dosagem de amina 7848 na flotação na linha 1, gerando assim, um total de 10 horas de impacto (**Figura 15**).

Figura 15. Variação da dosagem de amina 7848 no PiVision (02 e 03/08/2022)



Fonte: Anglo American

Como consequência foi observado uma elevação do teor de sílica do concentrado final a partir das oito horas da noite do dia 02 de agosto e assim permaneceu até as duas horas da manhã do dia seguinte (**Quadro 3**). Levando em consideração que a usina estava em operação da campanha BF, que tem como objetivo 2,75% de sílica no concentrado final, observou-se que os parâmetros ficaram bem acima do desejado. Logo, a média do dia fechou em 3,75%, ou seja, 1% a mais do desejável para atendimento das especificações.

Quadro 3. Qualidade hora a hora concentrado final – 19h de 02/08 à 05h de 03/08/2022

Concentrado Final	02/08/2022						03/08/2022				
	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00
Fe %	67.29	65.65	65.14	64.80	65.40	66.03	65.91	67.34	68.31	68.25	67.74
SiO2 %	2.80	5.00	5.25	5.46	4.88	4.35	4.63	2.76	1.06	0.98	1.68
Al2O3 %	0.62	0.66	0.74	0.73	0.70	0.62	0.64	0.47	0.41	0.51	0.56
<0,045mm %	80.09	78.06	76.83	77.04	78.53	81.18	84.56	84.54	86.50	81.82	81.82
>0,300mm %	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
>0,074mm Acumulado	0.89	3.93	3.72	3.94	2.77	2.06	1.11	1.23	1.28	1.64	1.35
Blaine cm2/g	950	960	970	1.040	1.060	1.130	1.170	1.110	970	980	990

Fonte: Anglo American

5.7 Análise de causa

O aparelho de amina 7848 é composto por um tanque reservatório, um conjunto de bombas, balão de ar comprimido, medidor de vazão e manômetro (**Figura 16**). As bombas funcionam de forma deslocamento positivo o que acaba gerando uma instabilidade na dosagem, que é feita por meio de pulsos. O balão

presente funciona de modo a amortecer esses pulsos para que haja dosagem contínua na linha.

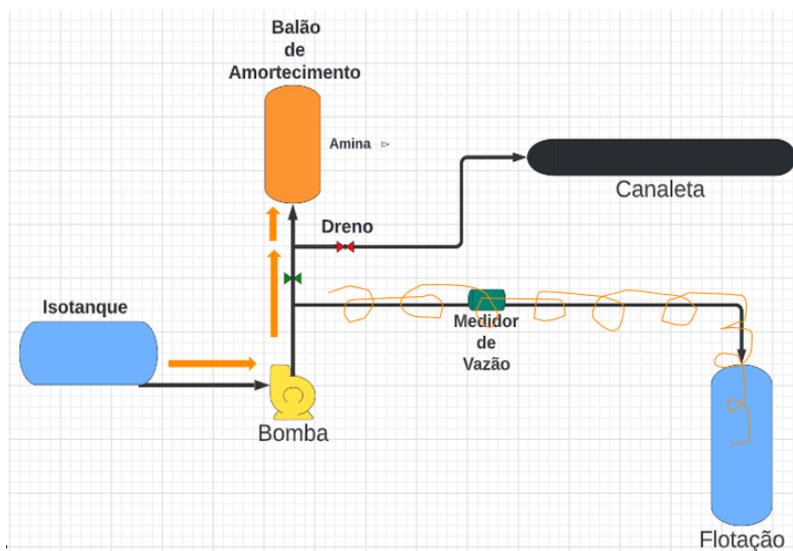
Figura 16. Aparelho de dosagem Amina 7848 na Anglo American



Fonte: Anglo American

Todavia, de tempos em tempos, durante o processo de operação do equipamento por um longo período ou ocorrência de algum vazamento na tubulação, o balão perde um percentual de ar residual que é preenchido por amina. Essa perda ocasiona na redução do amortecimento e consequentemente a dosagem perde a estabilidade causando variações (**Figura 17**).

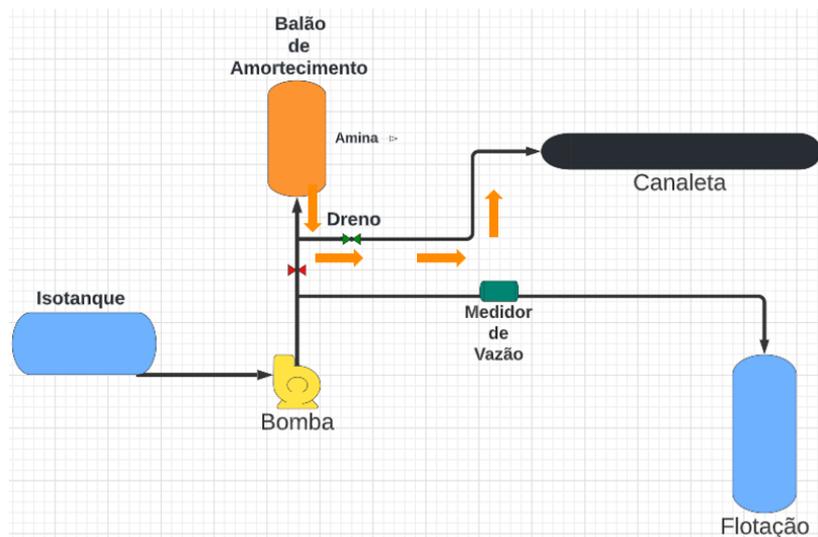
Figura 17. Esquema de funcionamento do aparelho de dosagem de Amina 7848



Fonte: Anglo American

Como forma de solucionar o problema é necessário realizar a drenagem do balão de amortecimento e assim o residual de amina 7848 é direcionado para canaleta de contenção (**Figura 18**).

Figura 18. Esquema da manobra de drenagem do balão aparelho de dosagem Amina 7848



Fonte: Anglo American

Para realização da drenagem é feito o isolamento do balão através de uma válvula localizada em sua base onde o *by-pass* é fechado. Em seguida ocorre a abertura do dreno e a válvula de escape para que o ar entre no balão e ocorra sua drenagem. Porém, é gerada uma perda de aproximadamente 20 litros do insumo por manobra, além do processo como um todo demorar cerca de 40 minutos para ser executado, ou seja, todo esse tempo de parada na dosagem do insumo.

Dada a importância do controle da vazão da amina 7848, somada com a reincidência dos problemas e além das ações já realizadas com as análises de falhas foi necessário adoção de uma melhora na drenagem do balão. Por isso a equipe da gerência responsável pela melhoria contínua do processo propôs a instalação de uma válvula esfera de inox na parte superior do balão, facilitando a entrada de ar e acelerando o processo de drenagem e retorno de dosagem do insumo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Atualmente, há uma necessidade constante da indústria utilizar os recursos de que dispõe de forma eficiente. Desta forma, qualquer sugestão de melhoria não deve ser ignorada, mas sim pesquisada para maximizar os possíveis ganhos na eficiência e/ou obter o conhecimento necessário para o desenvolvimento futuro. Logo, qualquer proposta seja ela pequena ou grande deve ser ouvida e estudada.

Dada as dificuldades e as inúmeras influências no processo da flotação como um todo é necessário o acompanhamento criterioso do processo e um olhar crítico para novas medidas, propostas e ideias. Na Anglo American é incentivado o desenvolvimento de trabalhos de melhoria contínua através de propostas de soluções de problemas identificados do processo. Conforme observamos a rotina da produção pode ser influenciada desde paradas por falhas em equipamentos, manutenções preventivas, variação de teores alimentados na planta, cortes na produção para correção no processo, redução de taxa devido falta de oferta de minério e outros inúmeros eventos. Com a realização das análises de falhas a partir dos gatilhos gerados é possível adotar medidas e ações para mitigar problemas e evitar a reincidência do erro.

Foi possível observar a partir das análises de falha um gatilho que ocorria com frequência em relação a um dos insumos mais importantes do processo: a amina 7848. Com o cuidado de sempre se atentar aos detalhes, foi observado a falha de 10 horas na dosagem do insumo e assim, tomada a medida necessária. Com os incentivos da gerência em sempre buscar soluções, a equipe de produção adotou a instalação da válvula para reduzir o tempo de drenagem, evitar desperdícios do reagente e assim diminuir o tempo sem dosagem do insumo.

A instalação da válvula proporcionou a redução do tempo de drenagem de 40 minutos para apenas 1 minuto, dessa forma, uma a recuperação da amina 7848 que era perdida durante a manobra antiga e também a redução dos impactos na flotação por distúrbios de dosagens.

Todas as propostas de melhorias são benéficas para o processo, todavia,

existem outras medidas que podem sempre vir a acrescentar como forma de ajudar e facilitar o cotidiano da operação. Com isso, a realização das análises de falhas efetuadas pela equipe de processos junto com o trabalho e o olhar atento da equipe de operação devem caminhar juntas de forma a se somarem na tomada de decisões para melhoria contínua.

7. CONCLUSÕES

A variabilidade e a incerteza dos preços de mercado de commodities, como o minério de ferro, fazem com que as empresas desse setor busquem cada vez mais reduzir custos operacionais e agregar valor aos seus produtos para atender às especificações dos clientes (DA SILVA, 2017). Para reduzir custos e atingir o produto desejado é necessário que haja um controle do processo de forma a sempre se atentar aos parâmetros e aos problemas cotidianos. A não entrega de um produto dentro dos parâmetros desejados, como também as perdas no processo, desde desperdícios de reagentes, como perda de ferro no rejeito, acarretam para a empresa prejuízos.

De acordo com a literatura mais de trinta parâmetros afetam o rendimento metalúrgico do processo de concentração de um minério. Isso inclui granulometria dos minerais, o grau de liberação, a temperatura da flotação, o tipo e a dosagem dos reagentes, a precisão na dosagem etc (SILVA, 2016). Conforme observado nesse trabalho não só é necessário o cuidado com as variações de dosagens de insumos, como a amina 7848, como também a análise diária de todas as variáveis envolvidas no processo.

Portanto o trabalho apresenta um estudo das análises de falhas realizadas diante de gatilhos gerados assim como as suas soluções propostas como forma de solucionar os problemas apresentados. Além disso, uma solução mais aprofundada para um problema recorrente de falha na dosagem de amina 7848 em que, uma pequena mudança obteve, uma grande redução no tempo de manobra como também uma redução da perda do reagente. Tais medidas trazem consigo a diminuição de prejuízos com um insumo de alto custo operacional para a empresa como também uma melhor eficiência dele no processo ajudando, assim, na qualidade do produto final.

Todavia, conforme já citado e observado, apesar das soluções implementadas sempre é possível e necessário apresentar outras melhorias. Além da troca da válvula no aparelho de dosagem de amina 7848 é preciso a criação de um alarme na sala de controle para distúrbios de oscilações exorbitantes desse insumo. A partir desse controle mais assíduo temos menos variações nas perdas de seletividade de flotação, perdendo cada vez menos

recuperação metalúrgica.

Contextualizando um todo, além do cuidado com esse reagente, os problemas gerados em gatilhos de análises de falhas assim que resolvidos com as soluções propostas devem ser acompanhados para observar se ocorreu ou não a sua reincidência em meses seguintes, para assim, determinar realmente a eficiência da ação tomada. Logo, além do acompanhamento diário dos problemas da rotina operacional é preciso um acompanhamento mais aprofundado das soluções cotiadas tomadas de modo a sempre que possível aplicar melhorias. Ademais, diante de problemas persistentes é preciso uma análise mais aprofundada e com maiores detalhes contextualizando sempre todos os setores envolvidos no processo, ou seja, desde a lavra do minério até a sua concentração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, W.F. **Beneficiamento de minério de ferro: A importância da caracterização tecnológica na definição de rota de processo.** 2017. 45f. Monografia – Curso de Engenharia de Minas, Fundação Presidente Antonio Carlos, 2017.
- ALMEIDA S. L. M.; Tratamentos de Minérios, 2004, Centro Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro, pág 4-5.
- Agência Nacional de Mineração. 2022. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais substâncias metálicas.** Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>>. Acesso em 05 mar. 2023.
- ARAUJO, A.C., VIANA, P.R.M., PERES A.E.C.. Reagents In Ore Flotation. **Minerals Engineering**, v.18, p. 219-224,2005.
- ARAUJO, D.M.; YOSHIDA, M.I.; CARVALHO, C.F.; STAPELFELDET, F. Reciclagem de aminas na flotação de minério de ferro. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 61, 2008.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDES. **Minério de ferro.** Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4802/1/BS%2039%20minério%20de%20ferro_P.pdf. Acesso em: 05 mar. 2023.
- BATISTELI, G.M.B. **Amina residual na flotação catiônica reversa de minério de ferro.** 2007. 118f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- CARVALHO, B.S.L. **Aproveitamento de minérios de ferro de baixo teor: tendências, tecnologias utilizadas e influências no sequenciamento de lavra.** 2012. 122f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 2012.
- CARVALHO, P. S. L.; SILVA, M. M.; ROCIO, M. A. R.; MOSZKOWICZ J. **Minério de ferro.** BNDES Setorial 39, p. 197-234, 2014.
- CARVALHO, V.V. **Mercado internacional de minério de ferro.** 2017. 35 f. Monografia – Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.
- CGEE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Siderurgia no Brasil. 2010-2025. subsídios para tomada de decisão – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. Série Documentos Técnicos.
- DEDES, V.E.L. **Flotação catiônica reversa de minério de ferro usando soluções microemulsionadas e nanoemulsionadas.** 2018. 38f. Monografia – Bacharelado em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2018.

FERRANTE, F. **Estudo de viabilidade para recuperação de minério de ferro em rejeitos contidos em barragens**. 2014. 86f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 2014.

FURTADO, R.M. **Estudo acerca dos reagentes na flotação catiônica reversa de minério de ferro: recirculação de amina e degradação do amido**. 2017. 54f. Trabalho de conclusão de curso – Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2017.

GOMES, M. A. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro**. 2009. 89f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.

LEJA, J. Flotation Surfactants. Surface Chemistry of Froth Flotation. Plenum Press, vol. 2, 2ª ed., New York, 1982.

LINS, F.A. F. **Concentração gravítica**. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 7, p. 301-325. LUZ A. B.; SAMPAIO J. A.;

LINS, Fernando A. F. **Concentração gravítica**. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 7, p. 301-325

LIU, W.; ZHANG, Y.; LASKOWSKI, J.S. The adsorption of polysaccharides onto mineral surfaces: an acid/base interaction. **International Journal of Mineral Process**, v.60, p. 229-245, 2000.

LUZ, Adão B.; LINS, Fernando A. F. **Introdução ao tratamento de minério**. In: Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 1, p. 3-18.

LUZ, J. A. M. da. **Aspectos reológicos de polpas em sedimentação**. In: CIMINELLI, R. R. et alii (Ed.). In: CONGRESSO DA ABM, 64. Anais... São Paulo: ABM, 2009. p. 1-11. CDROM. LUZ, A. B., LINS, F. F. Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil. 2004.p.93-102. Slides.

MONTE, M.B.M., PERES, A.E.C.. **Química de Superfície na Flotação**. In: DA LUZ, A.B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S.C.A.. Tratamento de Minérios. 5ª Edição. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, CETEM, 2010. Volume Único, Capítulo10, páginas 397- 461.

NASCIMENTO, D.R. **Flotação aniônica de minério de ferro**. 2010. 116f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

PAVLOVIC, S.; BRANDÃO, P.R.G. Adsorption of starch, amylose, amylopectin and glucose monomer and their effect on the flotation of hematite and quartz. **Minerals Engineering**, v.16, p. 1117-1122,2003.

PEREIRA, L.H.C.S. **Considerações sobre o processo de beneficiamento de minério de ferro**: Beneficiamento, pelotização e análise online de teores. 2013. 44f. Monografia (Pós Graduação em Engenharia de Recursos Minerais), Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

PEREIRA, S.A.C. **O mercado de minério de ferro**. 2012. 47f. Monografia – Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

SANTIAGO, A.M.O. **O contexto do minério de ferro no Brasil. Estudo de caso: produção da mina ponto verde – Itabirito/Brasil**. 2017. 66f. Monografia – Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

SCHOBENHAUS, C.; COELHO, C.E.S. Principais depósitos mineirais do Brasil. DNPM/CVRF, v.2, 110p. 1986.

SILVA, L.N. **Sistema para fechamento de balanços de massas complexos e reconciliação de dados**. 2017. 63f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas, Universidade Federal de Minas, 2017.

SILVA, R.R.R. **Sistemas de reagentes surfatantes na flotação catiônica reversa de minérios de ferro**. 2004. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

SOMASUNDARAN, P.; RAMACHANDRAN, R. Surfactants in Flotation. **Surfactants in chemical/ Process Engineering**, v.28, p. 195-235, 1988.

SOUSA, N. D. Depressores alternativos na flotação catiônica reversa de minério de ferro. 2016. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão Organizacional), Universidade Federal de Goiás, 2016.

TAKEHARA, L.; JUNIOR, F.C. **Minério de ferro: geologia e geometalurgia**. Edgard Blücher Ltda, 2013.

XIAOWEN, W. **Uma análise do comércio de minério de ferro entre a China e o Brasil: contexto, fatores de influência e perspectivas**. 2020. 75 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Estudos Estratégicos Internacionais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.