



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

ELOISA MARIA FONSECA PEREIRA

**AVALIAÇÃO DO USO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA PARA PROCESSAMENTO
DE LAMAS DE MINÉRIO DE FERRO**

CRATEÚS

2025

ELOISA MARIA FONSECA PEREIRA

**AVALIAÇÃO DO USO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA PARA PROCESSAMENTO
DE LAMAS DE MINÉRIO DE FERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas Campus Crateús da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof. Dra. Tiany Guedes Cota.
Coorientador: Dr. Elves Matiolo.

CRATEÚS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P49a Pereira, Eloisa.
Avaliação do uso de flotação em coluna para processamento de lamas de minério de ferro. / Eloisa Pereira. – 2025.
62 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Tiany Guedes Cota.
Coorientação: Prof. Dr. Elves Matiolo.
1. Flotação em coluna. 2. Lama de minério de ferro. 3. Recuperação metalúrgica. 4. Quadrilátero Ferrífero. I. Título.

CDD 622

ELOISA MARIA FONSECA PEREIRA

AVALIAÇÃO DO USO DE FLOTAÇÃO EM COLUNA PARA PROCESSAMENTO DE
LAMAS DE MINÉRIO DE FERRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia de Minas Campus
Crateús da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em: 07/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Tiany Guedes Cota (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Elves Matiolo (Coorientador)
Centro de Tecnologia Mineral (CETEM)

Dr. Hudson Jean Bianchini Couto
Centro de Tecnologia Mineral (CETEM)

Prof. Ma. Thaíla Ravena Santana Carvalho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho a mim mesma, por ter acreditado quando tudo parecia impossível, por cada lágrima silenciada e cada passo firme rumo ao meu sonho. Por não ter desistido de mim.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a **Deus**, autor da minha vida, dos meus caminhos e de cada conquista. Sem sua presença constante, eu não teria tido forças para me reerguer nas vezes em que caí e pensei em desistir. Se hoje celebro esta vitória, é porque sua graça me sustentou em cada passo da caminhada. A Ele, toda honra e gratidão.

Agradeço também ao meu pai, **João**, que, antes de partir, me ensinou o valor da humildade e a acreditar que, com esforço e dignidade, eu seria capaz de conquistar tudo aquilo por que lutasse. Sua sabedoria e amor seguem vivos em mim, guiando meus passos. Sei que, onde quer que esteja, ele está orgulhoso de sua pirata e isso me fortalece todos os dias.

Às pessoas mais importantes da minha vida, que sempre acreditaram em mim, mesmo nos momentos em que nem eu mesma fui capaz disso, ofereceram amor incondicional e permaneceram ao meu lado em cada etapa da jornada. Ao meu amor, **Iuri**, que nunca soltou minha mão, me incentivou nos dias difíceis, cuidou de mim com carinho e me lembrou, todos os dias, do propósito desta caminhada. Às minhas mães, **Iêda e Irani**, que são minha maior inspiração de força e coragem, e que sempre me deram o aconchego de um lar para onde voltar. Aos meus irmãos, **Fellipe, João e Joaquim**, que, com sua leveza, me fizeram esquecer do mundo, sorrir e brincar, mesmo quando tudo ao redor parecia desmoronar. Ao meu padrasto, **Marcos**, meu conselheiro fiel, cuja sabedoria me orienta, e a quem recorro sempre que a vida me pede grandes decisões.

Aos meus tios, **Jairo, João Victor e Isiane**, que sempre foram meu amparo nos momentos difíceis, me defenderam com amor e orgulho, e comemoraram cada uma de minhas conquistas como se fossem deles. A presença de vocês na minha vida é um presente precioso.

À professora **Dra. Tiany Guedes Cota**, que apareceu na minha vida justamente quando eu mais precisava. Sua confiança e generosidade foram fundamentais para que eu acreditasse novamente em mim mesma, mesmo quando tudo parecia impossível. Você me ofereceu a maior oportunidade da minha trajetória até aqui e acreditou que eu seria capaz de honrá-la. Minha eterna gratidão também ao **Dr. Elves Matiolo**, que acolheu a ideia com entusiasmo e me recebeu em seu time com confiança e respeito. Essa etapa ficará para sempre na minha memória.

Aos verdadeiros amigos que a UFC me deu ao longo desta trajetória que tornaram os dias mais pesados mais leves, me incentivaram com palavras de apoio, estiveram presentes nos momentos difíceis e celebram comigo esta conquista.

“A fé consiste em acreditar no que você não vê; a recompensa dessa fé é ver aquilo em que você acredita.”

(Augustine of Hippo).

RESUMO

A mineração de ferro, atividade essencial para a economia global, gera grandes volumes de rejeitos finos e ultrafinos, cuja disposição representa desafios tanto ambientais quanto operacionais. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade da flotação em coluna para o reaproveitamento de lamas de minério de ferro, por meio da variação de parâmetros operacionais com foco na maximização da recuperação e do teor de ferro, assim como a diminuição a quantidade de sílica no concentrado. A pesquisa foi conduzida com amostras provenientes do Quadrilátero Ferrífero, as quais passaram por caracterização física e química. Inicialmente, os ensaios foram realizados em uma célula mecânica, para definição de alguns parâmetros experimentais. Posteriormente, foi utilizada uma coluna de flotação em escala piloto, analisando-se os efeitos da dosagem de reagentes, porcentagem de sólidos e velocidades superficiais do ar e da água. Os testes foram realizados no CETEM (Centro de Tecnologia Mineral), localizado no Rio de Janeiro/RJ. Os testes em bancada definiram os parâmetros operacionais ideais, destacando-se a dosagem de 300 g/t do coletor Flotador 16939 em pH 10,5, que resultou em recuperação metalúrgica de até 76,4% e teor de ferro de 56,2% no concentrado. Esses parâmetros foram posteriormente aplicados na flotação em coluna, onde os melhores resultados foram obtidos com velocidade superficial de ar (J_g) mais alta dentre as avaliadas sendo 1,5 cm/s e de água (J_w) mais baixa sendo 0,1 cm/s, alcançando teor de ferro de 54,8% e recuperação metalúrgica de 96%. A variação da porcentagem de sólidos, por sua vez, não apresentou impacto significativo sobre os resultados. Os resultados obtidos demonstraram a eficiência da flotação em coluna para a recuperação de ferro contido em lamas, com alto desempenho mesmo em condições variáveis. Os resultados confirmam o potencial da tecnologia como uma alternativa técnica e ambientalmente viável para o aproveitamento de rejeitos ultrafinos de minério de ferro em operações de beneficiamento mineral.

Palavras-chave: Flotação em coluna; Rejeitos de minério de ferro; Recuperação metalúrgica; Quadrilátero Ferrífero.

ABSTRACT

Iron mining, an essential activity for the global economy, generates large volumes of fine and ultrafine tailings, whose disposal poses both environmental and operational challenges. In this context, this study aimed to evaluate the feasibility of column flotation for the reuse of iron ore tailings, by varying operational parameters focusing on maximizing iron recovery and grade, as well as reducing the amount of silica in the concentrate. The research was conducted with samples from the Quadrilátero Ferrífero, which underwent physical and chemical characterization. Initially, tests were carried out in a mechanical cell to define some experimental parameters. Subsequently, a pilot-scale flotation column was used to analyze the effects of reagent dosage, solids percentage, and superficial velocities of air and water. The tests were performed at CETEM (Center for Mineral Technology), located in Rio de Janeiro/RJ. The bench-scale tests defined the optimal operational parameters, highlighting the dosage of 300 g/t of the collector Flotisor 16939 at pH 10.5, which resulted in a metallurgical recovery of up to 76.4% and an iron grade of 56.2% in the concentrate. These parameters were later applied in column flotation, where the best results were obtained with the highest air superficial velocity (J_g) evaluated, 1.5 cm/s, and the lowest water velocity (J_w), 0.1 cm/s, reaching an iron grade of 54.8% and metallurgical recovery of 96%. Variation in the percentage of solids, in turn, did not show a significant impact on the results. The results demonstrated the efficiency of column flotation for recovering iron from tailings, with high performance even under variable conditions. The results confirm the potential of the technology as a technically and environmentally viable alternative for the utilization of ultrafine iron ore tailings in mineral processing operations.

Keywords: Column flotation; Iron ore tailings; Metallurgical recovery; Quadrilátero Ferrífero.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais reservas mundiais de ferro em 2024.....	30
Figura 2 – Fenômeno de adesão bolha-partícula hidrofílica e hidrofobizada.....	34
Figura 3 – Contato bolha de ar/superfície do mineral em um sistema com e sem coletor.....	34
Figura 4 – Esquema da estrutura de uma célula de flotação de minério.....	36
Figura 5 –Esquema básico de uma coluna de flotação.....	37
Figura 6 – Fluxograma do Processo de Beneficiamento da empresa Sul Americana de Metais..	39
Figura 7 – Efeito do diâmetro da partícula na recuperação ou cinética de flotação.....	43
Figura 8 – Bombonas de amostras recebidas no CETEM.....	47
Figura 10 – Célula mecânica DENVER, modelo D12.....	49
Figura 11 – Circuito da flotação em coluna.....	51
Figura 12 – Coluna de flotação.....	51
Figura 13 – Células mecânicas da mini planta piloto.....	52
Figura 14 – Distribuição granulométrica da alimentação.....	54
Figura 15 – Teor versus Recuperação metalúrgica no concentrado rougher.....	57
Figura 16 – Dosagem do coletor versus Teor no concentrado rougher.....	58
Figura 17 – Dosagem do coletor versus Recuperação metalúrgica no concentrado rougher...58	
Figura 18 – Relação entre teor de ferro e recuperação metalúrgica para cada coletor.....	59
Figura 19 – Teor versus Recuperação metalúrgica no concentrado final.....	61
Figura 20 – Teor em função dos parâmetros J_g e J_w	62
Figura 21 – Recuperação metalúrgica em função dos parâmetros J_g e J_w	62
Figura 22 – Teor em função do parâmetro J_g	63
Figura 23 – Teor em função do parâmetro J_w	64
Figura 24 – Recuperação metalúrgica em função do parâmetro J_g	64
Figura 25 – Recuperação metalúrgica em função do parâmetro J_w	65
Figura 26 – Teor versus Recuperação metalúrgica em função do tipo de flotação.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais minerais de ferro.....	29
Tabela 2 – Principais produtores de ferro no Brasil.....	31
Tabela 3 – Parâmetros experimentais.....	44
Tabela 4 – Reagentes utilizados nos ensaios de bancada, função e fabricante.....	47
Tabela 5 – Coletor, pH e dosagem utilizados nos testes em bancada.....	50
Tabela 6 – Parâmetros utilizados na flotação em coluna.....	53
Tabela 7 – Resultado da análise química da alimentação.....	53
Tabela 8 – Resultados obtidos nos testes.....	55
Tabela 9 – Resultados obtidos nos testes.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS

CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
USGS	Serviço Geológico dos Estados Unidos
ANM	Agência Nacional de Mineração
FRX	Fluorescência de Raios X
DRX	Difração de Raio X
RG	Rougher

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	26
1.1	Objetivo Geral.....	27
1.2	Objetivos Específicos.....	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	29
2.1	Minério de Ferro.....	29
2.1.1	<i>Reservas e produção brasileira.....</i>	30
2.2	Beneficiamento de minérios.....	32
2.3	Equipamentos de flotação.....	36
2.4	Flotação de minério de ferro.....	39
2.5	Aproveitamento de lama de minério de ferro.....	44
3	METODOLOGIA.....	48
3.1	Materiais.....	48
3.2	Reagentes.....	48
3.3	Caracterização físico-química.....	49
3.4	Flotação em célula mecânica - Escala de bancada.....	49
3.5	Flotação em coluna - Escala mini planta piloto.....	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1	Caracterização físico-química.....	55
4.2	Flotação em escala bancada.....	56
4.3	Flotação em coluna.....	62
5	CONCLUSÃO.....	69
	REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel fundamental na economia global, sendo o minério de ferro um dos principais recursos explorados devido à sua ampla aplicação na produção de aço. De acordo com Santos (2021), no Brasil, o setor mineral possui grande relevância econômica e social, com o país ocupando uma posição de destaque entre os maiores produtores e exportadores desse insumo. Entretanto, o beneficiamento do minério de ferro de baixo teor gera grandes volumes de rejeitos, que representam um desafio ambiental e operacional para as mineradoras.

O descarte de rejeitos de minério de ferro em barragens, prática predominante na indústria mineral brasileira devido ao seu baixo custo, representa um dos maiores desafios ambientais e sociais da mineração moderna. Apesar de tecnicamente viável, esse método acarreta sérios riscos, como o rompimento de estruturas, contaminação de solos e águas subterrâneas, desmatamento, poluição atmosférica e visual, além de graves consequências socioeconômicas para comunidades próximas, como evidenciado nos desastres de Mariana e Brumadinho. Diante disso, torna-se urgente a busca por alternativas sustentáveis de reaproveitamento desses rejeitos, que ainda possuem potencial relevante do elemento de interesse e podem ser reincorporados em processos industriais (CARVALHAIS, 2018).

Rocha *et al.* (2009) afirma que dentre as técnicas de beneficiamento, a flotação em coluna se destaca como uma alternativa eficiente para a recuperação das partículas finas de ferro contidas na lama. Esse processo, que difere da flotação convencional por utilizar colunas sem agitação mecânica e contar com a adição de água de lavagem na parte superior, permite uma separação mais seletiva dos minerais de interesse e minimiza o arraste de impurezas. Dessa forma, a flotação em coluna possibilita o aproveitamento do ferro contido nos rejeitos, reduzindo impactos ambientais e aumentando a eficiência do processo mineral.

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo realizar o aproveitamento da lama de minério de ferro advinda do Quadrilátero Ferrífero, utilizando a flotação em coluna. Para isso, são avaliadas condições operacionais que impactam diretamente na eficiência do processo, como a dosagem de reagentes, a porcentagem de sólidos na alimentação e as velocidades superficiais do ar e da água. Além de buscar a maximização da recuperação de ferro, o estudo visa contribuir para o reaproveitamento de rejeitos e a sustentabilidade do setor mineral.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo investigar a otimização do processo de flotação em coluna para o aproveitamento da lama de minério de ferro, alterando parâmetros operacionais com o intuito de melhorar a eficiência de recuperação do ferro e minimizar perdas no processo.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização física e química da amostra de lama de minério de ferro proveniente do Quadrilátero Ferrífero.
- Avaliar os parâmetros operacionais da flotação em bancada e em coluna que influenciam na recuperação do ferro, como porcentagem de sólidos na alimentação, dosagem do coletor e velocidade superficial do ar e da água.
- Comparar os resultados obtidos com os parâmetros convencionais utilizados em estudos anteriores.
- Verificar o impacto das alterações no processo da flotação em coluna sobre a qualidade do concentrado final e a redução da contaminação por ganga.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Minério de Ferro

O ferro está entre os elementos químicos mais abundantes do planeta Terra, representando aproximadamente 30% de sua composição total. No entanto, apenas 4% da crosta terrestre superior é formada por ferro. Esse elemento ocorre principalmente em formas minerais, com cerca de 300 variações (CAXITO *et al.*, 2018).

O metal em estudo apresenta coloração branco-prateada, textura macia, flexível e dúctil, além de possuir uma massa específica de $7,87 \text{ g/cm}^3$. Embora seja considerado um condutor de eletricidade inferior em comparação a outros metais de grande relevância, o ferro se destaca por sua facilidade de magnetização em temperaturas normais. Quimicamente ativo, esse metal combina-se espontaneamente com dióxido de carbono, oxigênio, enxofre e sílica, originando compostos como carbonatos, óxidos, sulfetos e silicatos (CHRISTIE *et al.*, 1997).

O ferro em sua forma nativa é raro na natureza. Por outro lado, minerais de ferro são amplamente encontrados na forma de óxidos, sendo a magnetita (Fe_3O_4) e a hematita (Fe_2O_3) suas principais ocorrências. Esses minerais, quando submetidos a altas temperaturas na presença de um agente redutor, liberam ferro em sua forma metálica (Fe). Além disso, o ferro também pode ser encontrado em formas de hidróxidos, como a goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e a limonita ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$). (CAXITO *et al.*, 2018).

A magnetita é um minério de ferro de grande relevância, amplamente encontrado em formações ferríferas metamórficas e sedimentares do período Pré-Cambriano. Destaca-se por seu intenso magnetismo e pela ocorrência frequente como mineral acessório em diversas rochas ígneas. Sua composição química é formada por 72,4% de ferro (Fe) e 27,6% de oxigênio (O), apresentando coloração preta e dureza de 6 na escala de Mohs (KLEIN, 2012).

O principal minério utilizado na produção de aço, a hematita (Fe_2O_3) destaca-se por sua ampla presença em rochas de diferentes idades geológicas, tornando-se a forma predominante de ferro. Em depósitos economicamente exploráveis, suas reservas podem atingir dezenas de milhões de toneladas. Além disso, esse mineral pode se formar como sublimação em processos relacionados à atividade vulcânica. Sua composição é majoritariamente ferro (70%) e oxigênio (30%), com pequenas concentrações de manganês (Mn) e titânio (Ti) (KLEIN, 2012).

Entre os compostos de ferro, além dos principais óxidos, destaca-se a goethita, o principal hidróxido que se diferencia da hematita principalmente pela cor do risco que

apresenta. Trata-se de um dos minerais mais abundantes, formado predominantemente por processos de intemperismo de minerais ricos em ferro, além de ser responsável pela formação do chamado 'chapéu de ferro'. Sua composição química é caracterizada por 62,9% de ferro (Fe), 27% de oxigênio (O), 10,1% de água (H₂O) e, geralmente, cerca de 5% de manganês (Mn) (KLEIN, 2012). De forma geral, os principais minerais de ferro estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais minerais de ferro.

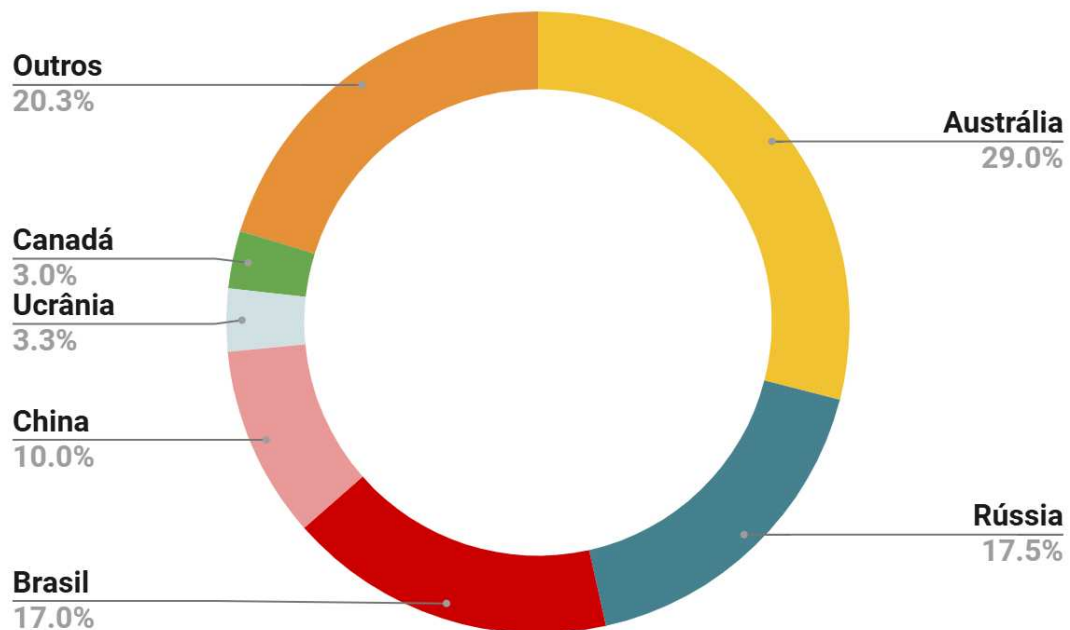
Mineral Composição Química Classe Mineralógica	Magnetita Fe ²⁺ Fe ³⁺ ₂ O ₄ Óxidos	Hematita Fe ₂ O ₃ Óxidos	Goethita Fe ³⁺ O(OH) Hidróxidos
Dureza	6,0	5,5-6,5	5,0-5,5
Densidade Relativa	5,18	5,26	4,37
Cor	Preto	Preto a castanho, cinza brilhante	Castanho-amarelo do a preto
Brilho Traço	Metálico; Preto	Metálico; Vermelho a Castanho-avermelhado	Graxo; Castanho-amarelado
Clivagem Fratura	Ausente; Subconchoidal	Ausente	Perfeita {010}; Irregular
Observações	Fortemente magnético; sem magnetismo	Embaçamento avermelhado	Pode apresentar iridescência

Fonte: Adaptado de Neves (2018).

2.1.1 Reservas e produção brasileira

De acordo com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (2025), em 2024, as reservas mundiais de minério de ferro classificadas como provadas e prováveis totalizaram aproximadamente 200 bilhões de toneladas de minério bruto, contendo cerca de 88 bilhões de toneladas de ferro metálico e entre elas, destacam-se a Austrália com 58 bilhões de toneladas de minério bruto, seguida pela Rússia (35,0), Brasil (34,0), China (20,0), Ucrânia (6,5), Canadá (6,0) e outros países somam 40,5 bilhões de toneladas. As principais reservas de ferro do mundo estão representadas em porcentagem na Figura 1.

Figura 1 – Principais reservas mundiais de ferro em 2024.



Fonte: Adaptado do USGS Mineral Commodity Summaries 2025.

Nos últimos dez anos, a China impulsionou significativamente o mercado de minério de ferro, transformando-o em um produto altamente lucrativo e atraindo o interesse de novos produtores. Entretanto, atualmente, enfrenta-se uma série de desafios, especialmente relacionados às burocracias legais para a abertura e operação de novas minas. Esses entraves acabam gerando atrasos consideráveis na entrada de novos participantes no mercado (CARVALHO *et al.*, 2014).

De acordo com dados do Informe Mineral da ANM (2024), o Brasil se mantém como um dos principais protagonistas no mercado global de minério de ferro. No primeiro trimestre de 2024, as exportações do setor mineral brasileiro somaram 16,33 bilhões, representando 21,0% do total das exportações brasileiras, e a mineração de ferro foi o principal item exportado, com 49,1% do total do setor. Os estados de Minas Gerais, Pará, Espírito Santo e São Paulo foram responsáveis por quase 80% das exportações do setor, destacando ainda mais a relevância do Brasil no comércio internacional de ferro. Embora tenha ocorrido uma queda nas exportações em relação ao trimestre anterior, o Brasil ainda exerce uma posição de liderança significativa, especialmente no mercado de minério de ferro.

A produção interna de ferro beneficiado no Brasil, no ano de 2022, totalizou 403,0 milhões de toneladas com um teor médio de 62,3% de Fe. Apesar dos valores altos, isso

representou uma queda de 4,9%, em relação ao ano anterior (ANM, 2023). A Tabela 2 apresenta os principais estados produtores de ferro no Brasil.

Tabela 2 – Principais produtores de ferro no Brasil.

Estado	Produção Bruta (t)	Produção Beneficiada Comercializada (t)	Valor Total (R\$)
Minas Gerais	361.691.408	211.519.619	82.223.550.704
Pará	174.315.360	169.840.998	699.436.824.048
Espírito Santo		8.317.569	8.141.793.789
Mato Grosso do Sul	9.371.285	8.291.321	2.128.740.125
Bahia	8.194.014	1.309.244	537.504.290
Goiás	71.964	71.964	39.021.806
Amapá	104.930	94.463	26.314.075
São Paulo		653.259	18.876.939
Ceará	17.299		6.023.443
Tocantins	14.459	42.839	5.291.992
Rio Grande do Norte	8.941	52.287	4.703.200
Piauí	300.069		2.230.315
Total	554.089.729	400.193.563	437.700.977

Fonte: Adaptado do Anuário Mineral Brasileiro (ANM, 2023).

2.2 Beneficiamento de minérios

A cominuição ou fragmentação inicia no desmonte do minério, ainda na lavra. Nas usinas de beneficiamento, esse processo ocorre, sobretudo, nas fases de britagem e moagem, visando atender a diferentes requisitos, como a liberação dos minerais, o aumento da área específica, a adequação ao transporte ou, em determinados casos, a comercialização direta do material (SAMPAIO; JÚNIOR, 2018).

Nos processos de britagem, as partículas mais grosseiras são submetidas a forças de compressão ou impacto. A aplicação dessas forças depende do volume das partículas, pois

é necessário um espaço adequado para que o processo ocorra de forma eficiente, o que limita sua atuação a materiais de maior granulometria (CHAVES; PERES, 2012).

A moagem abrange as operações de cominuição em materiais com granulometria inferior a 3/4" e ocorre por meio de mecanismos como arredondamento das partículas, quebra de pontas e abrasão. Nesse processo, que ainda lida com granulometrias relativamente grosseiras, a redução de tamanho se dá principalmente por compressão ou impacto. Assim, a principal diferença entre a moagem e a britagem está na faixa de tamanho das partículas processadas e nos mecanismos responsáveis pela redução do material (CHAVES; PERES, 2012).

A etapa de separação por tamanho tem como finalidade separar as partículas minerais de acordo com a sua granulometria. Esse procedimento pode ser realizado por peneiramento ou por classificação em meio fluido, ambos visando separar o material em diferentes frações conforme a granulometria das partículas (COMINUIÇÃO, 2012).

A deslamagem tem como função a remoção de partículas ultrafinas, evitando impactos negativos no processo de concentração. Em instalações de menor porte, essa operação é realizada por meio de tanques deslamadores, onde os sólidos se depositam no fundo enquanto a lama é removida pelo *overflow*, podendo também auxiliar no desaguamento. Já em usinas com um controle operacional mais rigoroso, o ciclone é empregado para desempenhar essa função. É essencial que a deslamagem ocorra de forma a minimizar a perda de partículas finas valiosas, que podem ser recuperadas em etapas posteriores de concentração. Além disso, esse procedimento também é aplicado ao longo das fases de concentração, garantindo que os concentrados secundários ou terciários apresentem menor teor de lama e finos em comparação à alimentação inicial (LINS, 2010).

A deslamagem desempenha um papel fundamental na etapa que antecede a flotação, pois a presença excessiva de partículas finas pode aumentar o consumo de coletor e comprometer a seletividade do processo. Estudos realizados na planta de Mikhailovsky, na Rússia, revelaram que a remoção de partículas menores que 10 µm de um minério originado da barragem de separação magnética não obteve uma boa recuperação metalúrgica na flotação catiônica reversa. No entanto, quando a deslamagem foi realizada para remover finos abaixo de 20 µm, a seletividade foi substancialmente melhorada, apesar do aumento na perda de ferro, que passou de 7,6% para 16,6%.

De acordo com Nascimento (2014), uma abordagem eficaz para o processo de deslamagem é a elevação do pH por meio da adição de altas dosagens de NaOH, o que promove a repulsão eletrostática entre as partículas. Isso ocorre porque, para uma

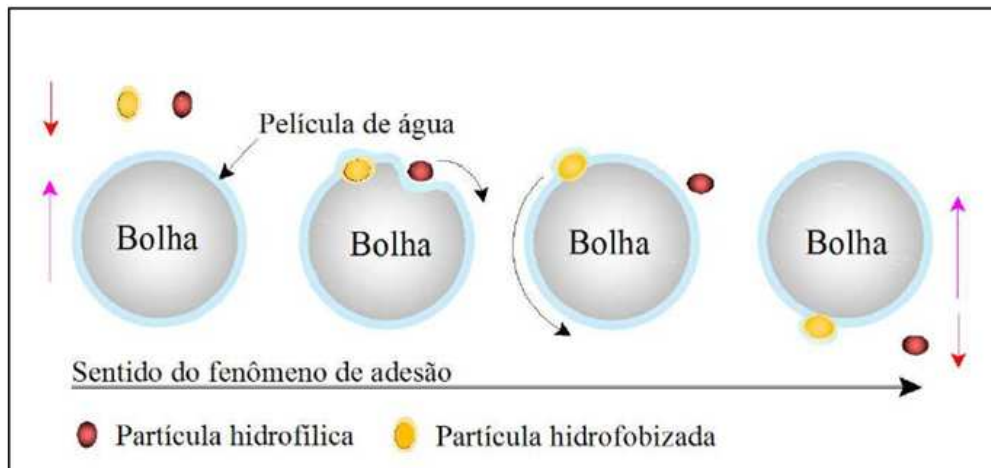
deslamagem eficiente, é essencial alcançar um nível adequado de dispersão das partículas. Em algumas situações, adiciona-se silicato de sódio como dispersante para auxiliar esse processo (FERREIRA, 2015).

O termo concentração refere-se, de modo geral, à remoção da maior parte da ganga, que está presente no minério. Já a purificação consiste na eliminação de minerais contaminantes, que ocorrem em menor proporção, tanto do minério quanto do pré-concentrado. Os métodos de concentração mineral são fundamentados na separação seletiva entre o mineral de interesse e a ganga, levando em consideração diferenças em suas propriedades físicas ou físico-químicas. Dentre essas propriedades, destacam-se a densidade, suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, química de superfície, cor, radioatividade e forma (LUZ; LINS, 2010).

A flotação é um processo amplamente utilizado no beneficiamento mineral sendo baseado nas características de superfície das partículas minerais. Esse método é especialmente eficiente na concentração de minerais de baixo teor e na recuperação de partículas finas. O princípio básico envolve a introdução de bolhas de ar em uma polpa mineral, permitindo que partículas hidrofóbicas se fixem às bolhas e sejam transportadas para a superfície, enquanto as partículas hidrofílicas permanecem na fase líquida e são descartadas. Essa técnica é aplicada em diversos setores da mineração, como na recuperação de sulfetos, fosfatos, carvões e minerais oxidados (ARAUJO *et al.*, 2005).

A adesão das partículas às bolhas depende da hidrofobicidade delas, pois as partículas mais hidrofóbicas têm afinidade à substâncias apolares, facilitando a adesão às bolhas de gás. Embora a hidrofobicidade seja crucial para a flutuação, a maioria das partículas minerais são naturalmente hidrofílicas. Assim, para permitir a flotação e sua maior seletividade, são adicionados reagentes à polpa (SANTOS, 2021). Tal interação está demonstrada na Figura 2.

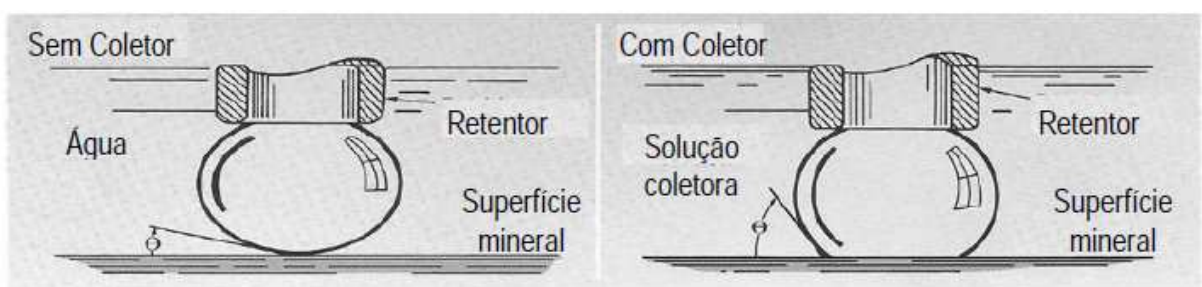
Figura 2 – Fenômeno de adesão bolha-partícula hidrofílica e hidrofobizada.



Fonte: VERAS (2010).

O coletor é um reagente que se adsorve seletivamente na superfície dos minerais, tornando-os hidrofóbicos. Esse processo ocorre quando as moléculas do reagente migram do meio líquido para a superfície do mineral, interagindo com ela por meio de forças eletrostáticas ou moleculares, como as de Van der Waals. O coletor pode se ligar à superfície do mineral de diferentes formas, seja de maneira física ou química, dependendo da intensidade da interação entre as moléculas do reagente e a superfície da partícula (CHAVES *et al.*, 2010). Na Figura 3, é possível observar a adesão da bolha de ar à superfície do mineral, comparando a situação com e sem a presença do coletor.

Figura 3 – Contato bolha de ar/superfície do mineral em um sistema com e sem coletor.



Fonte: LUZ (2010)

Os surfactantes utilizados como espumantes na flotação são, em sua maioria, compostos não iônicos, como álcoois, éteres e seus derivados. Eles possuem estrutura semelhante à dos coletores, diferenciando-se pelo caráter funcional do grupo polar. Enquanto os coletores interagem ativamente com a superfície mineral, os espumantes apresentam maior afinidade com a água. Alguns reagentes podem exercer ambas as funções, como as aminas, que em determinados valores de pH podem atuar tanto como

coletores quanto como espumantes. Além disso, a presença desses reagentes na interface líquido-gás influencia diretamente o tamanho das bolhas, a estabilidade da espuma e as propriedades fluidodinâmicas do processo (MATOS, 2017).

Os reagentes modificadores são utilizados na flotação para alterar a flotabilidade dos minerais e aumentar a seletividade do processo. Eles atuam no controle do pH, na densidade de carga das interfaces e na concentração de íons metálicos na polpa. Estes reagentes podem ser classificados em diferentes categorias, como depressores, que evitam a adsorção do coletor em determinados minerais; ativadores, que favorecem essa adsorção; dispersantes, que impedem a agregação de partículas; e reguladores de pH, que influenciam o potencial zeta e a adsorção de íons na superfície mineral. Cada um desses reagentes desempenha um papel essencial para otimizar a eficiência da flotação (SANTOS, 2021).

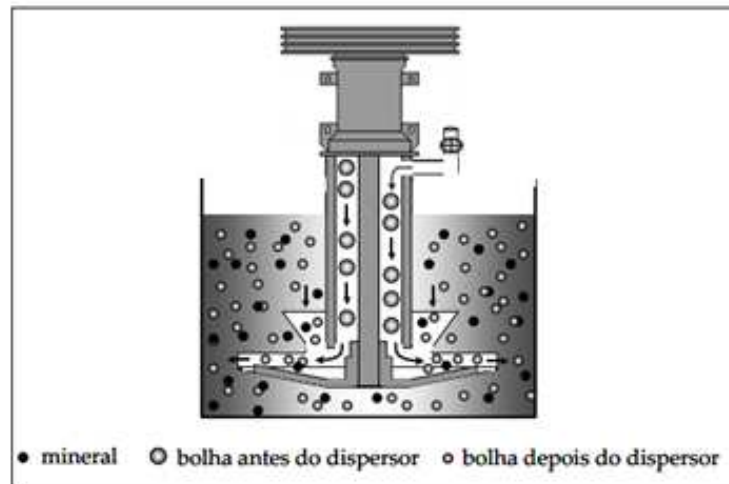
Os depressores são reagentes que aumentam a seletividade da flotação, favorecendo a interação da água com a superfície de um mineral e impedindo a adsorção do coletor. Um dos depressores mais utilizados na indústria é o amido, especialmente na flotação catiônica reversa de óxidos de ferro, devido à sua eficiência e ampla disponibilidade. O amido é composto principalmente por amilose e amilopectina, sendo esta última considerada mais eficiente na depressão da hematita em testes laboratoriais, embora não tenha apresentado o mesmo desempenho em testes industriais. Devido à sua baixa solubilidade em água fria, o amido precisa passar por um processo de gelatinização, que pode ser realizado por aquecimento ou adição de soda cáustica, a fim de aumentar sua solubilidade e eficiência na flotação (FURTADO, 2017).

2.3 Equipamentos de flotação

As células mecânicas de flotação são tanques que recebem a polpa lateralmente, permitindo a separação entre a espuma mineralizada, removida pela parte superior, e o material não flotado, coletado na parte inferior. Em escala industrial, essas células são organizadas em bancos de flotação para aumentar a probabilidade de recuperação das partículas hidrofobizadas, reduzindo perdas por "exaustão da espuma". Elas podem ser classificadas como fechadas ("*cell-to-cell*") ou abertas, sendo que, nas células abertas, o fluxo deprimido passa de uma célula para outra por controle de nível, enquanto nas fechadas esse controle é realizado por um dispositivo específico. A máquina de flotação é um componente interno da célula, responsável por manter a polpa em suspensão por meio de um rotor

conectado a um eixo de acionamento. O movimento do rotor gera uma pressão negativa, permitindo a entrada de ar na polpa e promovendo a flotação das partículas. Em alguns casos, utiliza-se ar comprimido junto a um estator ao redor do rotor, favorecendo a formação de pequenas bolhas, que aumentam a eficiência do processo ao transportar as partículas coletadas (SANTOS, 2021). As estruturas de uma célula mecânica estão representadas na Figura 4.

Figura 4 – Esquema da estrutura de uma célula de flotação de minério.



Fonte: SAMPAIO e BALTAR (2007).

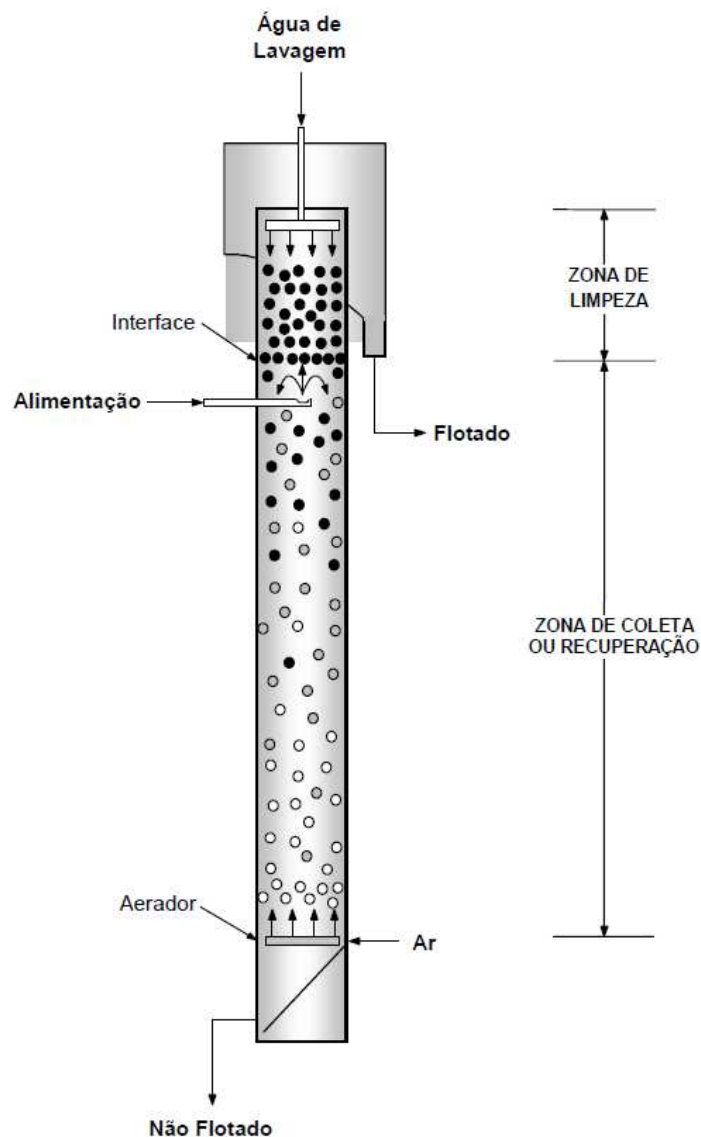
De acordo com Aquino, Oliveira e Fernandes (2010), a flotação em coluna representa uma alternativa às células mecânicas convencionais, diferenciando-se principalmente em quatro aspectos fundamentais: geometria, uso de água de lavagem, ausência de agitação mecânica e sistema de geração de bolhas.

As colunas possuem uma relação altura-diâmetro maior do que as células convencionais, permitindo uma melhor separação das partículas minerais. A alimentação da polpa ocorre a aproximadamente dois terços da altura da coluna, promovendo um contato eficiente entre as partículas e as bolhas de ar geradas na base. A estrutura pode ter seção transversal circular, quadrada ou retangular, e, em modelos de grande diâmetro, são utilizados baffles para melhorar a distribuição do fluxo e evitar macro recirculações. Além disso, a altura das colunas industriais pode variar entre 10 e 15 metros, dependendo das características operacionais e do tempo de residência necessário para uma separação eficiente (AQUINO; OLIVEIRA; FERNANDES, 2010).

O processo na coluna de flotação é dividido em duas seções distintas: a seção de coleta, onde ocorre a interação entre as partículas hidrofóbicas e as bolhas de ar, e a seção de limpeza, localizada na camada de espuma. Um dos diferenciais da flotação em coluna é a

utilização da água de lavagem na parte superior, distribuída por dispersores. Essa etapa tem um papel fundamental na remoção de partículas finas que possam ser arrastadas para a espuma, aumentando a seletividade do processo e estabilizando a camada de espuma. Dessa forma, a flotação em coluna se destaca como uma técnica eficiente para a concentração mineral, proporcionando uma separação mais seletiva e um melhor controle sobre as variáveis operacionais (AQUINO; OLIVEIRA; FERNANDES, 2010). O esquema, de modo geral, da coluna de flotação é mostrado na Figura 5.

Figura 5 –Esquema básico de uma coluna de flotação.



Fonte: AQUINO; OLIVEIRA; FERNANDES, (2010)

Destaca-se que a flotação em coluna foi desenvolvida com o objetivo de melhorar a interação entre partículas e bolhas, aumentando a probabilidade de colisão e diminuindo a flotação por arraste. Neste sentido, torna-se uma alternativa interessante para a flotação de finos. Além disso, as colunas de flotação oferecem outras vantagens, como permitir o fluxo em contracorrente entre as partículas e bolhas, maior eficiência energética, necessidade reduzida de espaço, possibilidade de automação e a incorporação de técnicas de flotação com bolhas mais finas (SANTOS, 2010).

2.4 Flotação de minério de ferro

O intemperismo promove a desagregação física e química das rochas, transformando minerais complexos em estruturas mais simples, como argilas e óxidos finos, resultando em elevada geração de partículas finas. (FORMOSO, 2020).

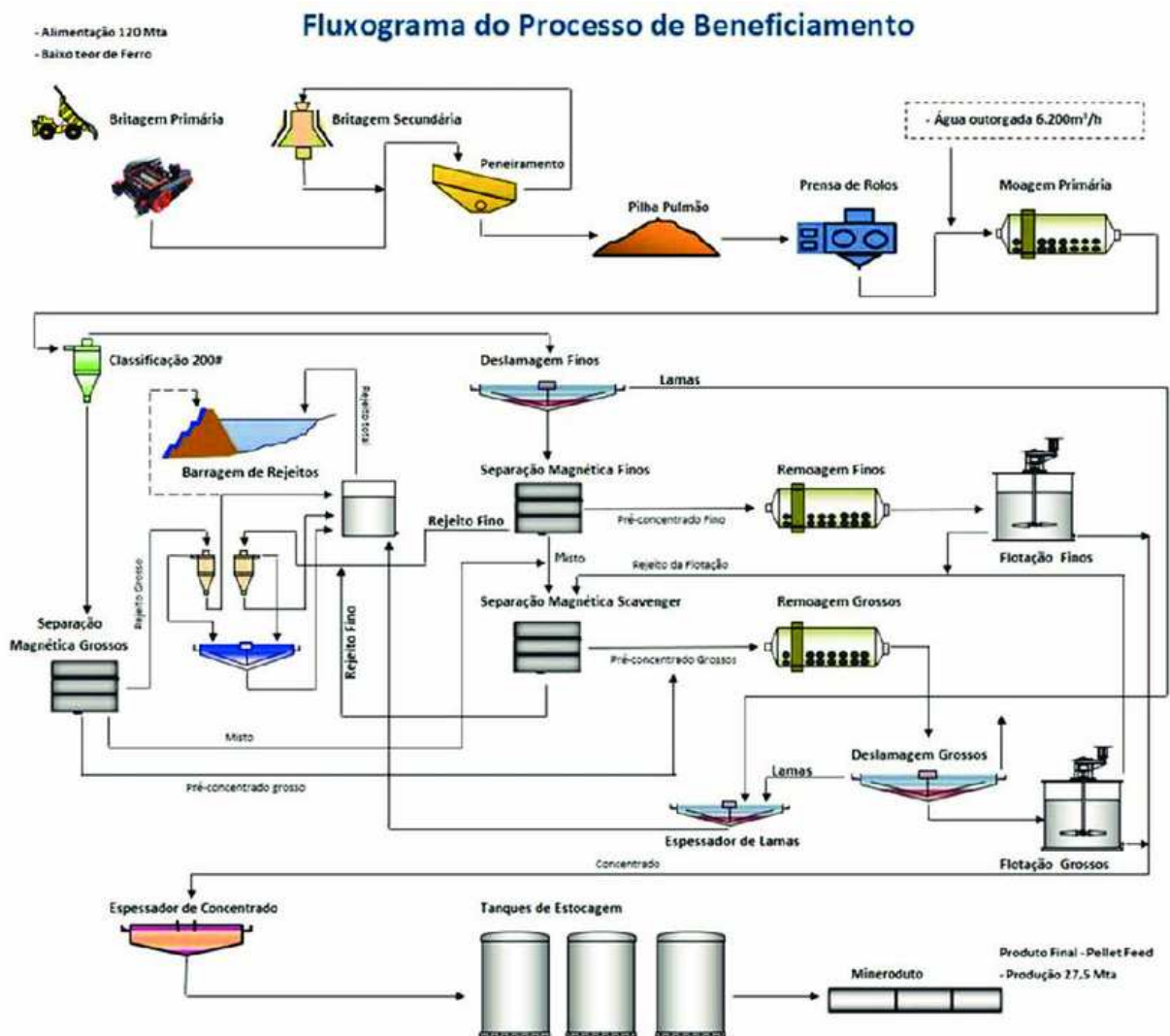
De acordo com Santos (2018), uma parcela significativa dos depósitos de minério de ferro no Brasil apresenta áreas intensamente intemperizadas, o que resulta na formação de grandes quantidades de partículas finas. Além dessas partículas de origem natural, a geração de finos também ocorre durante as etapas de lavra e nos processos de cominuição. Além disso, Duarte (2008) afirma que os rejeitos de granulometria fina são conhecidos como lama, enquanto aqueles com partículas mais grossas, superiores a 0,074 mm, são denominados rejeitos granulares.

Somasundaran (1980) define as lamas como uma combinação de colóides e partículas ultrafinas, englobando tanto as naturalmente presentes quanto as geradas durante as etapas de cominuição. A principal característica dessas partículas é sua sedimentação extremamente lenta. Ainda segundo Somasundaran (1980), a classificação das partículas pode ser feita com base em seu tamanho.

- Finos – partículas com tamanho médio entre 10 μm e 100 μm , que não podem ser facilmente separadas por processos gravitacionais.
- Ultrafinos – partículas com tamanho médio entre 1 μm e 10 μm , cuja separação não é facilmente realizada por métodos convencionais, incluindo a flotação.
- Colóides – partículas com tamanho médio inferior a 1 μm .
- Lamas – composição de colóides e ultrafinos, tanto os naturalmente presentes quanto os gerados nos processos de cominuição. Sua principal característica é a sedimentação extremamente lenta.

O beneficiamento do minério de ferro é definido, principalmente, com base em seu teor. Minérios de alto teor passam por processos como britagem e classificação granulométrica. Aqueles de baixo teor e granulometria mais grosseira necessitam de etapas adicionais, incluindo britagem, moagem, separação por tamanho, concentração gravítica e flotação. Por sua vez, os minérios de baixo teor e com granulometria fina são concentrados por meio de separadores magnéticos de alta intensidade a úmido e flotação catiônica reversa (FERREIRA, 2011). A Figura 6 ilustra um exemplo de fluxograma do processo de minério de ferro da SAM - Sul Americana de Metais.

Figura 6 – Fluxograma do Processo de Beneficiamento da empresa Sul Americana de Metais.



Fonte: BASTOS (2023)

Os minérios de ferro brasileiros, conhecidos como itabiritos, são formados principalmente por hematita e quartzo, além de conterem limonitas e argilo-minerais

De acordo com Lopes (2009), a flotação é um dos principais métodos de concentração mineral utilizados na indústria de beneficiamento de minérios. No caso do minério de ferro, esse processo se destaca especialmente para a separação de partículas finas, onde métodos gravimétricos e magnéticos podem apresentar limitações.

A flotação é o método de concentração de minério de ferro mais amplamente utilizado no mundo para faixas granulométricas entre 250 e 10 μm . Existem diferentes abordagens para a flotação desse minério, sendo as mais comuns a flotação aniônica de óxidos de ferro, a flotação aniônica reversa de quartzo ativado e a flotação catiônica reversa de quartzo, sendo esta última especialmente empregada em minérios com alto teor de contaminação por quartzo (FERREIRA, 2018).

A flotação aniônica direta de óxidos de ferro surge como uma alternativa promissora para a concentração de minérios de baixo teor ou para o reaproveitamento de materiais armazenados em bacias de rejeitos. Nessa técnica, ácidos graxos podem ser empregados como coletores, porém, a efetiva depressão dos minerais de ganga ainda representa um desafio a ser superado (ARAÚJO *et al.*, 2005).

Tal rota de processo consiste na flotação do próprio mineral de interesse, no caso, os óxidos de ferro, como a hematita e a magnetita. Nesse método, os coletores aniônicos são utilizados para tornar a superfície dos minerais hidrofóbica, permitindo sua adesão às bolhas de ar e subsequente recuperação na espuma (ALBUQUERQUE, 2023). Os principais coletores aniônicos empregados nesse processo incluem ácidos graxos e seus derivados, além de reagentes anfotéricos, como sarcosinatos e sulfossuccinatos.

A flotação direta foi inicialmente a principal técnica utilizada para a concentração de minério de ferro. No entanto, com o passar do tempo, a flotação catiônica reversa se consolidou como o método predominantemente, devido à sua maior eficiência na remoção da sílica. Apesar disso, a flotação aniônica reversa foi aplicada em algumas operações, especialmente na China, onde demonstrou vantagens significativas, como a redução nos custos de reagentes e a minimização das perdas de ferro associadas à etapa de deslamagem. Esse último fator é particularmente relevante, pois a deslamagem é essencial na flotação catiônica reversa para evitar interferências dos finos no processo (FERREIRA, 2015).

Na flotação aniônica reversa, a ativação do quartzo ocorre por meio da adição de íons de cálcio, geralmente na forma de cálcio ou cal, sendo esta última a opção mais econômica e amplamente utilizada. Após essa ativação, os minerais de ganga são flotados

com o uso de ácidos graxos como coletores, enquanto os óxidos de ferro são deprimidos e permanecem na polpa. Um dos principais diferenciais dessa técnica em relação à flotação catiônica reversa é sua menor sensibilidade à presença de partículas ultrafinas, tornando uma etapa de deslamagem menos necessária. Esse comportamento está associado à formação de hidroxocomplexos de cálcio, que modificam a carga superficial das partículas, interrompendo a interação entre finos e minerais maiores. No entanto, em minerais com altos teores de lama, uma deslamagem prévia pode ser necessária, pois o excesso de partículas finas pode aumentar significativamente o consumo de reagentes e comprometer a eficiência do processo (FERREIRA, 2015).

A flotação aniônica reversa é um processo em que os minerais de ganga (impurezas) são seletivamente flotados, enquanto o minério de ferro (hematita, magnetita) permanece na polpa. Esse método é particularmente eficaz para a remoção de sílica (quartzo) e alumina, que são os principais contaminantes do minério de ferro (MA *et al.*, 2011). O uso de amido ou dextrina como depressores do minério de ferro é comum, pois esses compostos se adsorvem seletivamente nas superfícies da hematita e magnetita, inibindo sua flotação e garantindo que apenas as impurezas sejam removidas (ARAÚJO *et al.*, 2005).

A flotação catiônica reversa destaca-se como a técnica mais utilizada no beneficiamento de minérios de ferro, sendo a principal rota aplicada no Brasil para a produção de *pellet feed*. Esse método permite a remoção de impurezas, como quartzo e silicatos, por meio da espuma, enquanto os óxidos de ferro são suspensos na polpa com o uso de amido de milho como depressor. Para que o processo ocorra de forma eficiente, o pH da polpa é controlado em uma faixa específica, geralmente entre 10 e 10,5, garantindo condições ideais para a seletividade da flotação (FERREIRA, 2015).

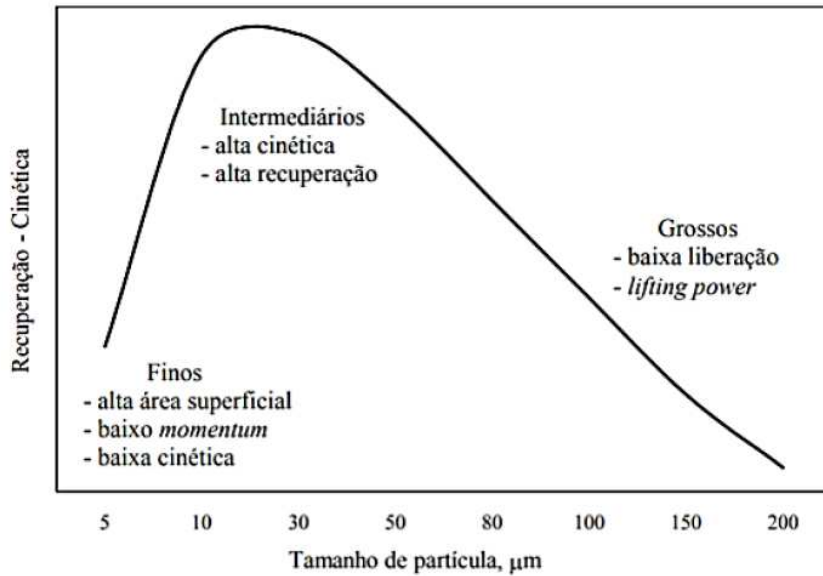
Segundo Filippov (2014), a flotação catiônica reversa apresenta vantagens significativas em relação à flotação aniônica, destacando-se pela alta seletividade e pela capacidade de operar com elevadas taxas de produção. Nesse processo, a separação dos silicatos presentes no minério ou em concentrados obtidos por métodos magnéticos e gravimétricos ocorre, predominantemente, com o uso de éteraminas ou eterdiaminas primárias, cujas cadeias carbônicas variam entre 10 e 16 átomos de carbono. Além disso, é possível empregar misturas desses reagentes, combinadas a outros coletores, para otimizar a eficiência do processo.

No início da aplicação da flotação catiônica reversa no beneficiamento de minério de ferro, as aminas graxas, como a dodecilamina, foram amplamente utilizadas como coletores. No entanto, devido à sua baixa solubilidade em água, essas substâncias foram

gradualmente substituídas pelas eteraminas, que apresentam melhor desempenho nesse tipo de processo. As aminas empregadas na flotação são derivadas de álcool e ácidos graxos, sendo que as mais utilizadas possuem cadeias carbônicas variando entre C-6 e C-20. Aminas com cadeias inferiores a C-6 não demonstram atividade superficial suficiente para se adsorverem nas partículas minerais, enquanto aquelas com cadeias superiores a C-20 apresentam solubilidade muito baixa em meio aquoso, o que dificulta sua aplicação (FERREIRA, 2015).

Matiolo (2008) afirma que a flotação de partículas finas apresenta desafios devido à baixa energia cinética dessas partículas, dificultando sua interferência e adesão às bolhas de ar. Além disso, o aumento da área superficial específica favorece a adsorção de reagentes indesejados e a estabilização da espuma, resultando em menor seletividade e eficiência do processo. Na Figura 7 pode-se observar a relação entre o tamanho das partículas e sua recuperação na flutuação, destacando-se três faixas principais (finas, intermediárias e grossas). As partículas finas ($<20 \mu\text{m}$) possuem alta área superficial, o que favorece a adsorção de reagentes, mas também dificulta a adsorção com as bolhas devido à baixa cinética de flotação, resultando em menor recuperação. Já as partículas intermediárias ($20 - 80 \mu\text{m}$) apresentam alta cinética e alta recuperação, pois possuem um equilíbrio ideal entre tamanho e área superficial, tornando-se a faixa mais eficiente para flotação. Por outro lado, as partículas grossas ($> 80 \mu\text{m}$) sofrem com baixa liberação e dificuldade de serem transportadas pelas bolhas devido ao efeito de levantamento de energia, o que reduz progressivamente sua recuperação. Assim, a eficiência da flotação depende diretamente do tamanho das partículas, sendo essencial um controle granulométrico adequado para maximizar a recuperação.

Figura 7 – Efeito do diâmetro da partícula na recuperação ou cinética de flotação.



Fonte: Matiolo

2.5 Aproveitamento de lama de minério de ferro

No Brasil, a geração de lamas provenientes da extração de minério de ferro corresponde a aproximadamente 20% – 40% em peso do total do minério processado. Para o aproveitamento dessas lamas, destacam-se técnicas como a floculação seletiva, a combinação de hidrociclones com flotação em espuma e a associação de hidrociclones com separação magnética (Matiolo *et al.*, 2020).

Matiolo *et al.* (2020) avaliaram a viabilidade da concentração de lamas de plantas do Quadrilátero Ferrífero usando a flotação em coluna sem deslamagem prévia. Os autores observaram que apesar das amostras terem similaridades mineralógicas, os resultados mostraram comportamentos diferentes. Para uma das amostras, foi possível obter um concentrado com mais de 60% de Fe e recuperação de 75% de Fe, enquanto para a segunda amostra, o teor de Fe não superou 55%, mesmo com diferentes coletores. Os resultados indicam a falta de uma solução padrão para o processamento eficiente de lamas, sugerindo que futuras pesquisas devem focar na interação entre coletores, depressores e minerais, especialmente em minérios com alto teor de alumina.

Praes (2010) realizou seu estudo em uma unidade piloto instalada na própria mineração, utilizando a técnica de flotação reversa. A amostra utilizada consistia no rejeito proveniente da separação magnética, apresentando teor médio de Fe em torno de 35% e elevado teor de sílica (acima de 40%). O material passou por um circuito de classificação,

composto por um classificador espiral e um ciclone, antes de ser alimentado na coluna de flotação. Nos testes, diversas variáveis operacionais foram analisadas, incluindo o tipo e a dosagem de coletores à base de amina, o agente depressor mais eficiente, a influência do pH da polpa e a velocidade superficial do ar. Os melhores resultados foram obtidos utilizando o coletor Flotigam EDA e o amido de milho como depressor, com o condicionamento adequado da polpa antes da flotação. A operação em circuito rougher simples, sem etapas adicionais de limpeza ou scavenger, resultou em um concentrado final com teor de Fe de 65,19%, sílica reduzida para 0,78% e uma recuperação de ferro de 82,2%. Apesar do sucesso na remoção de sílica, o teor de alumina permaneceu ligeiramente acima do especificado, sendo atribuída à presença de ultrafinos, indicando a necessidade de uma etapa de deslamagem mais eficiente.

Em seu estudo, Monteiro (2023) avaliou, em escala piloto, a concentração de lamas de minério de ferro por flotação catiônica reversa em coluna, utilizando dois coletores do tipo amida-amina. A amostra utilizada foi proveniente do rejeito da separação magnética e apresentava teor inicial de 31% de Fe, 50% de SiO₂ e 3,9% de Al₂O₃. Antes da flotação, a amostra passou por caracterização química, mineralógica e granulométrica, identificando-se que a fração ultrafina era composta majoritariamente por quartzo (49%), hematita (37%) e goethita (6%). Os ensaios foram conduzidos em uma coluna de 2” de diâmetro e 6 m de altura, operando em circuito rougher, com controle de pH ajustado para 10,5 e tempo médio de residência de 10 a 18 minutos. Os resultados mostraram que o coletor AA1 apresentou melhor desempenho, permitindo a obtenção de um concentrado com teor de Fe de até 50% e recuperação de 78%, com redução dos teores de SiO₂ e Al₂O₃ para 19% e 4%, respectivamente. Em contrapartida, o coletor AA2 não demonstrou seletividade suficiente para a separação eficiente entre os minerais de ferro e de ganga, resultando em baixas elevações no teor de Fe do concentrado, apesar das altas recuperações metalúrgicas obtidas. Na Tabela 3, são mostrados outros trabalhos e suas principais informações.

Tabela 3 – Parâmetros experimentais

Autores	Escala de operação	Tipo de tratamento - Descrição
Khangaonkar e Bala Subramani 1993	Laboratorial	Floculação seletiva da hematita utilizando polímeros aniônicos (Magnafloc 155, Magnafloc 1011 e Magnafloc LT 27, produzidos pela Allied Colloids). Os três polímeros estudados foram efetivos na floculação deste tipo de minério, em condições ácidas e para

		dosagens acima de 0,2 kg.ton ⁻¹ .
Weissenborn <i>et al.</i> , 1994	Laboratorial	Floculação seletiva de ultrafinos de ferro utilizando amidos de diferentes tipos (fornecidos pela N.B. Love Starches), Poliacrilamidas de vários pesos moleculares, fornecidos pela Allied Colloids (Magnafloc), Maxwell Chemicals (Maxfloc) e Cyanamid (Superfloc). Foi confirmado que a floculação seletiva é capaz de flocular a hematita. O amido de trigo (50 mg.L ⁻¹) apresentou a melhor eficiência, elevando o teor de ferro de 46,6% (alimentação) para 56-57%, com 65-75% de recuperação metalúrgica.
Tripathy <i>et al.</i> , 2001	Laboratorial	Floculação seletiva da hematita presente em duas lamas de minérios de ferro, utilizando polímeros desenvolvidos pelos autores à base de alginato de sódio (SAG I, II, III, IV, V e VI) e polímeros flocculantes comerciais, fornecidos pela Suyog Chemicals (Sufloc), Richav Chemicals (Richfloc 225) e Allied Colloids (Magnafloc 351). Entre os polímeros flocculantes utilizados, o SAG VI apresentou melhor desempenho na floculação. As lamas com menor tamanho de partículas foram melhores flocculadas por flocculantes neutros, quando comparadas com as lamas com maior tamanho de partículas.
Oliveira, 2006	Laboratorial e Piloto	Deslamagem, concentração magnética e flotação catiônica reversa (célula mecânica) utilizando griz de mandioca gelatinizado e amina (EDA-B da Clariant). A deslamagem foi eficiente, eliminando os elementos deletérios como Al ₂ O ₃ , P e em alguns casos com redução da SiO ₂ . Melhores resultados foram obtidos com circuitos de deslamagem em hidrociclones, seguido de flotação. O concentrado produzido apresentou um elevado teor de hematita granular e um baixo teor de fósforo.

Rocha, 2008	Laboratorial e Piloto	Deslamagem, flotação catiônica reversa (célula mecânica e coluna) utilizando reagentes convencionais. A coluna de flotação com água de lavagem se mostrou a condição ideal para se concentrar ultrafinos de minério de ferro, condizendo com o exposto pela literatura. Os melhores resultados foram obtidos utilizando 1000 g/t de amido e 30 g/t de amina. O concentrado apresentou teores de sílica inferiores a 1%, teores de sílica + alumina abaixo de 2%, qualificando-o como <i>pellet feed fines</i> , e recuperação global (deslamagem + flotação) inferior a 40%.
-------------	-----------------------	--

Fonte: Adaptado de Santos (2010).

3 METODOLOGIA

Todas as etapas experimentais deste estudo foram conduzidas no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), localizado no Rio de Janeiro (RJ).

3.1 Materiais

A amostra utilizada nesta pesquisa foi recebida no CETEM em forma de polpa com porcentagem de sólidos de 28%, totalizando 15 bombonas (Figura 8). A lama é oriunda de uma usina de beneficiamento de minério de ferro localizada em uma mina no Quadrilátero Ferrífero.

Figura 8 – Bombonas de amostras recebidas no CETEM.



Fonte: CETEM (2024).

3.2 Reagentes

Durante os ensaios de flotação em escala de bancada, foram utilizados quatro tipos distintos de reagentes coletores, bem como um agente modulador de pH, conforme especificado na Tabela 4.

Tabela 4 – Reagentes utilizados nos ensaios de bancada, função e fabricante.

Função	Reagente	Fabricante
Coletor	Flotisor 16939	Clariant
Coletor	Flotisor 5530	Clariant
Coletor	CADM 22-381	Clariant
Coletor	CADM 22-382	Clariant
Modulador de pH	Hidróxido de sódio (NaOH)	Neon

Fonte: Autora (2025).

3.3 Caracterização físico-química

A caracterização física da amostra foi realizada por meio de difração a laser, utilizando o equipamento Mastersizer 2000 SM, da marca Malvern, com faixa de detecção de diâmetros particulados entre 0,1 e 1000 μm . Essa técnica permitiu determinar a distribuição granulométrica do material, fornecendo informações fundamentais sobre a presença e o comportamento da fração ultrafina. Previamente à análise, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 100 °C, a fim de garantir a remoção da umidade e viabilizar a obtenção precisa da curva de distribuição granulométrica.

A determinação da densidade da amostra foi realizada por meio da técnica de picnometria a gás hélio, utilizando o picnômetro modelo AccuPyc II 1340, da marca Micromeritics. Antes da análise, o material foi quarteado e submetido à secagem em estufa a 60 °C por um período de 24 horas. A escolha da picnometria a gás hélio justifica-se por sua elevada acurácia na medição da densidade real, especialmente em materiais com elevada porosidade ou estrutura particulada complexa.

As análises químicas foram realizadas por Fluorescência de Raios X (FRX), permitindo a quantificação dos óxidos Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , MnO , TiO_2 , P_2O_5 , CaO , MgO e K_2O .

3.4 Flotação em célula mecânica - Escala de bancada

A etapa de flotação em bancada foi conduzida em células convencionais do modelo D12, da marca Denver, equipadas com inversor de frequência, conforme ilustrado na Figura 10. A rota adotada foi a flotação reversa, na qual o mineral de interesse foi concentrado na fração afundada, enquanto a ganga foi obtida na fração flotada. Foram

avaliados diversos parâmetros operacionais, incluindo o efeito do pH, o tipo e a dosagem do coletor, bem como a porcentagem de sólidos nas etapas de condicionamento e flotação. Os testes foram realizados exclusivamente na etapa rougher (RG), utilizando células com volumes de 3 e 5 litros.

Figura 10 – Célula mecânica DENVER, modelo D12.



Fonte: CETEM (2025).

Na primeira campanha realizada em célula mecânica, foram conduzidos quinze ensaios, todos na etapa rougher. A porcentagem de sólidos foi 35% no condicionamento, e 27% durante a flotação. A vazão de ar foi mantida constante em 9,0 L/min, enquanto a rotação do sistema foi ajustada, em média, para 1050 rpm nas duas etapas.

Nos doze primeiros testes, foi avaliado o desempenho do coletor Flotisor 16939 em diferentes faixas de pH (9,0; 10,0 e 10,5), com variação na dosagem entre 150, 200, 300 e 450 g/t. Na etapa seguinte, para a avaliação dos demais coletores, adotaram-se condições fixas de pH 10,5 e dosagem de 300 g/t. As condições experimentais estão detalhadas na Tabela 5. Todos os ensaios foram realizados em etapa rougher, conduzidos até a exaustão da espuma. Após cada teste, os produtos (concentrado e rejeito) foram filtrados, secos, pesados e enviados para análise química.

Tabela 5 – Coletor, pH e dosagem utilizados nos testes em bancada.

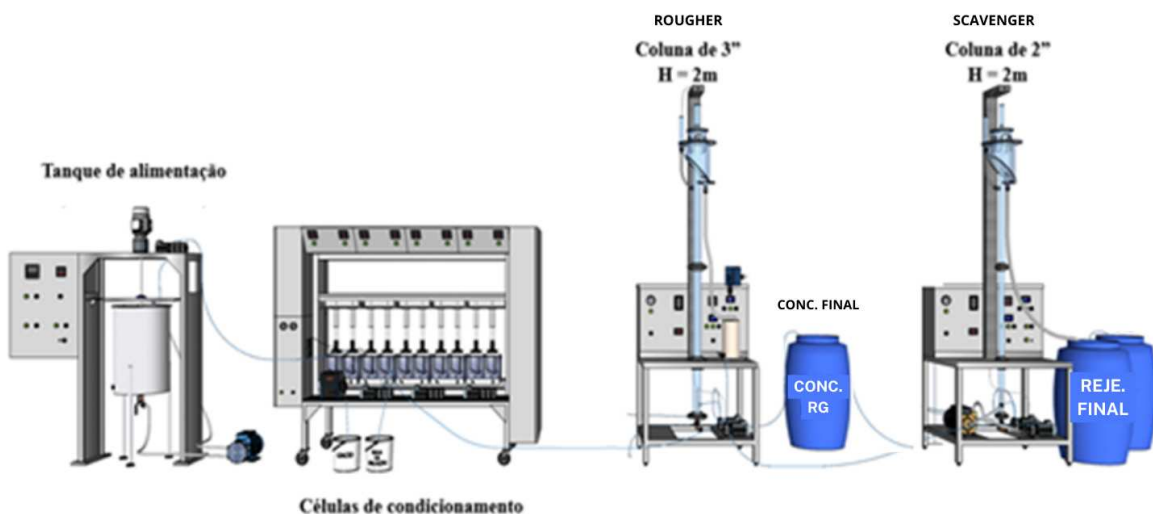
Teste	Coletor	pH	Dosagem (g/t)
1	Flotisor 16939	9,0	150
2			200
3			300
4			450
5		10,0	150
6			200
7			300
8			450
9		10,5	150
10			200
11			300
12			450
13	Flotisor 5530	10,5	300
14	CADM 22-381		
15	CADM 22-382		

Fonte: Autora (2025).

3.5 Flotação em coluna - Escala mini planta piloto

O diagrama do circuito empregado nesta etapa encontra-se apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Circuito da flotação em coluna.



Fonte: Autora (2025).

Os ensaios de flotação em coluna foram realizados na Mini Planta Piloto, utilizando colunas de 3” para a etapa rougher e de 2” para a etapa scavenger, ambas com 2 metros de altura, conforme ilustrado na Figura 11. O controle da injeção de ar e da água de lavagem foi efetuado por meio de rotômetros. A polpa foi armazenada em um tanque com capacidade de 50 litros, e o condicionamento foi realizado em três células mecânicas, conforme apresentado na Figura 12.

Considerando os resultados obtidos nos testes de flotação em bancada, que indicaram os melhores parâmetros operacionais e desempenho entre os reagentes avaliados, a etapa de flotação em coluna foi conduzida utilizando exclusivamente o coletor Flotinor 16939.

Figura 12 – Coluna de flotação.



Fonte: CETEM (2025).

Figura 13 – Células mecânicas da mini planta piloto.



Fonte: CETEM (2025).

A velocidade superficial do ar (J_g) e da água (J_w) na etapa rougher variou entre 0,9 e 1,5 cm/s, e entre 0,1 e 0,2 cm/s, respectivamente. Na etapa scavenger, esses parâmetros foram fixados em 0,6 cm/s para o ar e 0,1 cm/s para a água. O tempo de residência médio, em ambas as etapas, foi de aproximadamente 5 minutos. A espessura da camada de espuma foi mantida, em média, em 28 cm ao longo de todos os testes. Os ensaios foram conduzidos com taxa de alimentação de 10 kg/h, dosagem do coletor Flotisor 16939 de 300 g/t e pH controlado em 10,5. Os parâmetros operacionais encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros utilizados na flotação em coluna.

Testes Coluna	Rougher 3"		Scavenger 2"		%Sólidos flotação
	Jg (cm/s)	Jw (cm/s)	Jg (cm/s)	Jw (cm/s)	
1	0,9	0,1	0,6	0,1	20
2	0,9	0,2	0,6	0,1	20
3	0,9	0,2	0,6	0,1	15
4	0,9	0,1	0,6	0,1	15
5	1,5	0,1	0,6	0,1	15
6	1,5	0,2	0,6	0,1	15
7	1,5	0,2	0,6	0,1	20
8	1,5	0,1	0,6	0,1	20

Fonte: Autora (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização físico-química

Inicialmente, foi feita a análise química da amostra de alimentação da flotação. Observou-se que o ferro (Fe) apresentou o maior teor entre os elementos analisados, com valor de 47,8%. Além disso, a amostra apresentou densidade de 3,77 g/cm³. Os resultados completos estão apresentados na Tabela 7.

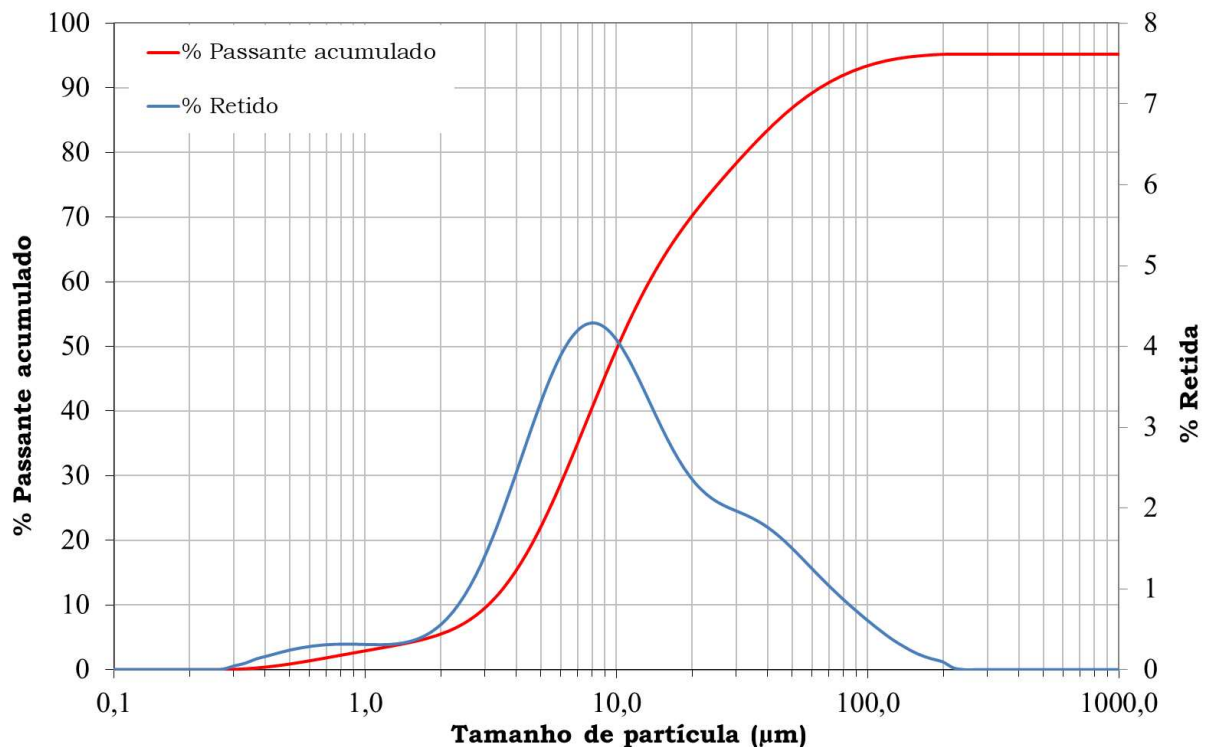
Tabela 7 – Resultado da análise química da alimentação.

Teor (%)				
Fe	SiO ₂	P	Al ₂ O ₃	MnO
47,8	17	0,1	5,7	0,1

Fonte: Autora (2025).

A Figura 13 apresenta o gráfico de distribuição granulométrica da alimentação. Observa-se que o P₈₀ da amostra é de 33 µm e 50 % das partículas é menor que 10 µm.

Figura 14 – Distribuição granulométrica da alimentação.



Fonte: Autora (2025).

4.2 Flotação em escala bancada

A Tabela 8 reúne os resultados dos testes de flotação em bancada, com os valores de recuperação mássica e metalúrgica obtidos em diferentes condições operacionais, permitindo a análise dos efeitos das variáveis testadas no desempenho do processo.

Tabela 8 – Resultados obtidos nos testes.

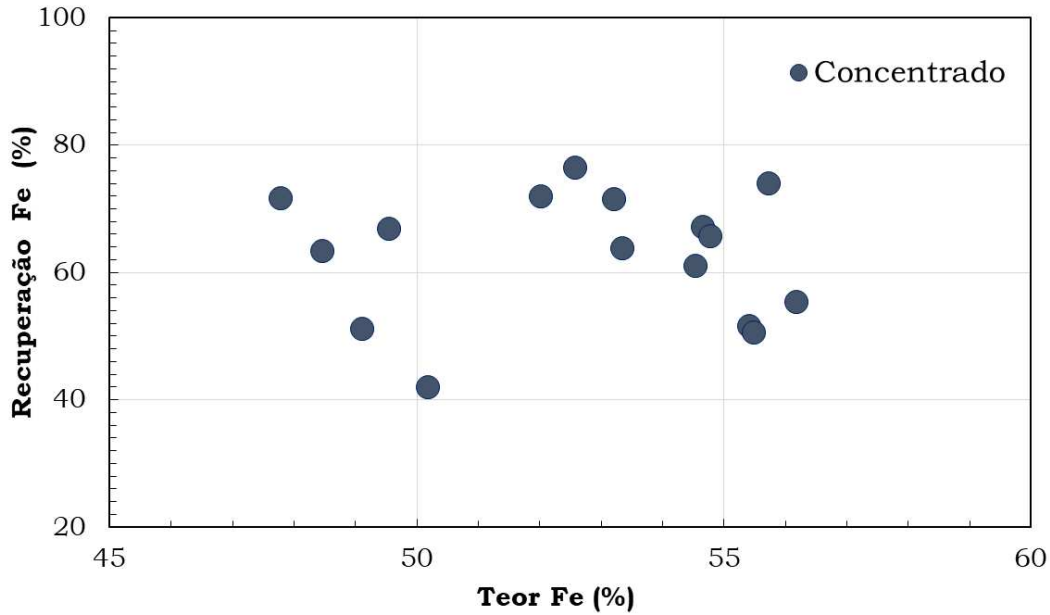
Testes célula	Reagente		pH	Rec. Mas. (%)	Concentrado Final						Rejeito Final		
	Coletor				Teor (%)			Rec. Met. (%)			Teor (%)		
	Nome	Dosagem			Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃
1	Flotisor 16939	150	9	35,4	46,4	17,4	6,1	35,7	37,3	32,8	45,7	15,9	6,8
2	Flotisor 16939	200	9	23	46,2	17,5	5,7	23,2	23	18,4	41,3	25,8	6,3
3	Flotisor 16939	300	9	15,2	46,4	17,5	5,7	15,2	16,2	13,2	46,3	16,3	6,7
4	Flotisor 16939	450	9	9,5	47	17,8	5,5	9,8	10,3	8,0	45,7	16,3	6,6
5	Flotisor 16939	150	10	32,3	46,9	16,7	5,8	33	32,4	28,7	45,6	16,7	6,9
6	Flotisor 16939	200	10	24,3	47	16,1	5,7	24,7	23,9	21,0	46,0	16,5	6,9
7	Flotisor 16939	300	10	19,7	47	17,1	5,7	20,3	20,4	17,1	45,3	16,4	6,7
8	Flotisor 16939	450	10	12,3	47,2	16,6	5,5	12,6	12,2	10,2	45,8	16,7	6,8
9	Flotisor 16939	150	10,5	36,3	47,1	16,3	5,9	37,2	35,3	32,7	45,4	17,1	7,0

10	Flotisor 16939	200	10,5	34,7	46,5	16,9	6	35,3	35,5	32,0	45,2	16,3	6,8
11	Flotisor 16939	300	10,5	27,6	46,9	16,6	6	28,1	27,5	25,1	45,7	16,6	6,8
12	Flotisor 16939	450	10,5	25	46,6	16,4	5,9	25,3	24,7	22,7	45,8	16,7	6,7
13	Flotisor 5530	300	10,5	39,3	46,4	17,2	6,1	39,8	40,7	36,4	45,4	16,2	6,9
14	CADM 22-381	300	10,5	14,8	47,5	16,5	5,5	15,2	14,7	12,3	45,8	16,6	6,8
15	CADM 22-382	300	10,5	73,2	46,4	16,6	6,0	74,0	73,2	67,4	44,4	16,6	8,0

Fonte: Autora (2025).

A Figura 14 apresenta os resultados de recuperação metalúrgica, que variaram entre 41,9% e 76,4%, e os teores de ferro nos concentrados, que oscilaram de 47,8% a 56,2%. Pode-se observar uma alta dispersão dos dados para as diferentes condições operacionais.

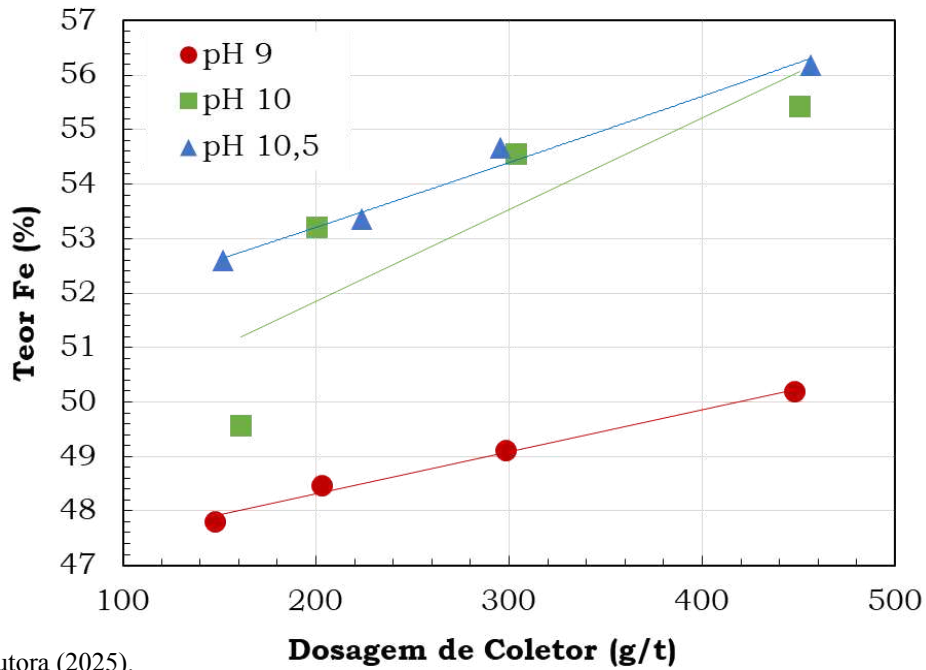
Figura 15 – Teor *versus* Recuperação metalúrgica no concentrado rougher.



Fonte: Autora (2025).

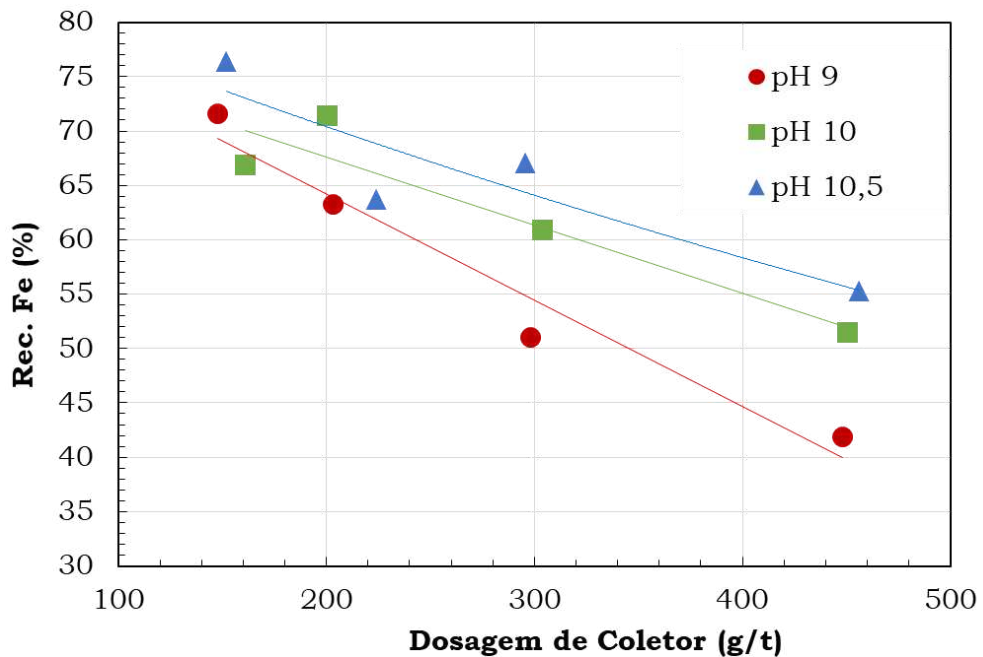
As Figuras 15 e 16 apresentam, respectivamente, a variação do teor de ferro e da recuperação metalúrgica nos concentrados em função das diferentes dosagens do coletor Flotisor 16939. A análise permitiu avaliar a influência da dosagem do reagente sobre o desempenho da flotação. Observa-se que a dosagem de 300 g/t, em pH 10,5, foi a que apresentou os melhores resultados, proporcionando simultaneamente um teor de 54,7% e recuperação 67,1% no concentrado.

Figura 16 – Dosagem do coletor *versus* Teor no concentrado rougher.



Fonte: Autora (2025).

Figura 17 – Dosagem do coletor *versus* Recuperação metalúrgica no concentrado rougher.

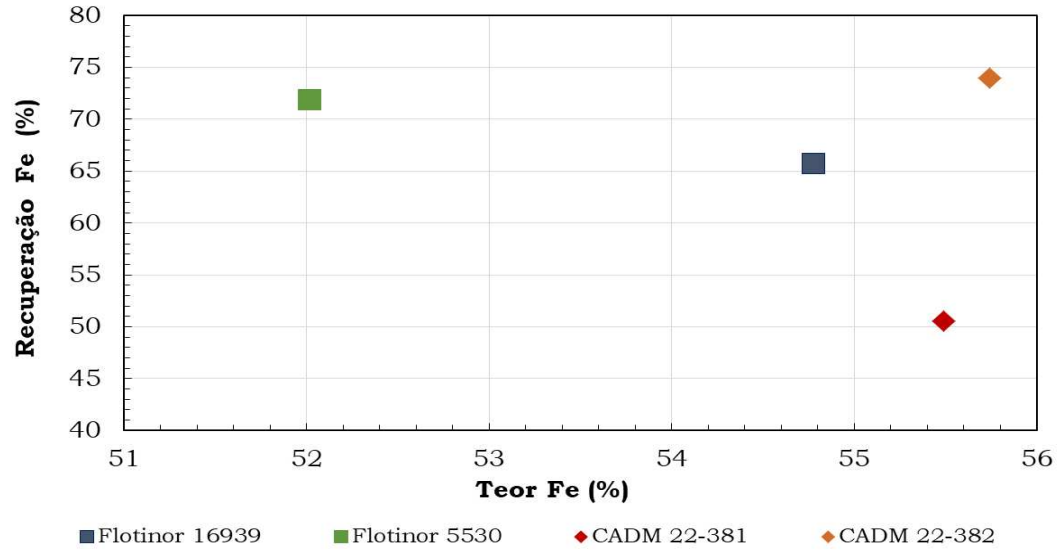


Fonte: Autora (2025).

A Figura 17 apresenta a comparação entre os diferentes coletores avaliados (Flotisor 16939, Flotisor 5530, CADM 22-381 e CADM 22-382), com base nos resultados de teor de ferro e recuperação metalúrgica dos concentrados obtidos. Embora o coletor CADM 22-382 tenha apresentado o melhor desempenho, com recuperação em torno de 74% e teor superior a 55% de ferro, os testes subsequentes foram conduzidos

com o coletor Flotinor 16939, conforme orientações técnicas previamente definidas pelo corpo técnico responsável da empresa.

Figura 18 – Relação entre teor de ferro e recuperação metalúrgica para cada coletor.



Fonte: Autora (2025).

4.3 Flotação em coluna

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos nos testes realizados em flotação em coluna, apresentando os valores de recuperação mássica e recuperação metalúrgica para cada condição avaliada, servindo como base para a interpretação dos efeitos das variáveis no desempenho do processo.

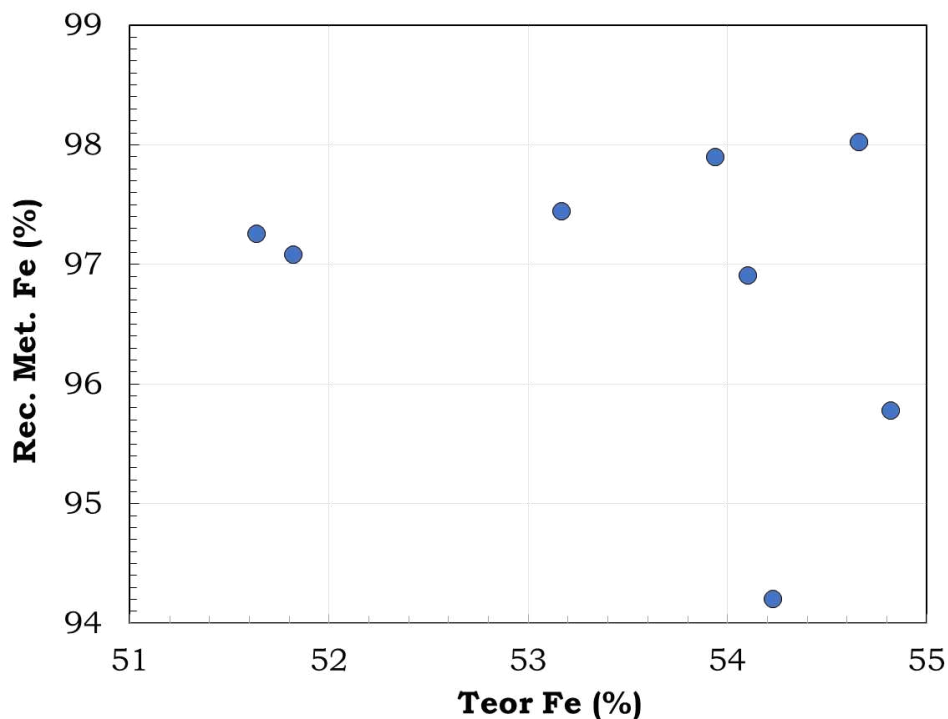
Tabela 9 – Resultados obtidos nos testes.

Testes coluna	RG		% Sól. flot.	Rec. Mas. (%)	Concentrado Final						Rejeito Final		
	3"				Teor (%)			Rec. Met. (%)			Teor (%)		
	Jg (cm/s)	Jw (cm/s)			Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃
1	0,9	0,1	20,0	85,7	54,1	6,9	5,4	96,91	35,57	82,48	10,3	74,6	6,9
2	0,9	0,2	20,0	85,7	54,7	7,1	4,9	98,03	35,88	74,49	6,6	76,1	10,1
3	0,9	0,2	15,0	85,4	53,9	7,5	5,0	97,90	36,28	75,05	6,8	76,6	9,7
4	0,9	0,1	15,0	86,3	53,2	8,2	5,1	97,45	40,63	80,86	8,8	75,2	7,6
5	1,5	0,1	15,0	83,9	54,8	6,3	5,0	95,78	32,41	75,40	12,6	68,7	8,5
6	1,5	0,2	15,0	89,7	51,6	11,5	4,9	97,26	60,62	80,42	12,7	65,5	10,5
7	1,5	0,2	20,0	89,3	51,8	10,9	5,0	97,09	58,49	80,29	13,0	64,9	10,3
8	1,5	0,1	20,0	83,0	54,2	6,8	5,2	94,20	34,36	75,28	16,3	63,3	8,3

Fonte: Autora (2025)

Os resultados da flotação em coluna demonstram melhor desempenho de processo quando comparados com a célula, conforme ilustrado na Figura 18. Apesar da dispersão dos dados, observa-se que todos os ensaios resultaram em teores de ferro acima de 51,6% e recuperação metalúrgica superior a 94%, o que indica alta eficiência da etapa. Esse comportamento evidencia a capacidade da coluna de flotação em promover uma boa concentração do minério, mesmo sob variações operacionais, mantendo os indicadores de qualidade dentro de uma faixa satisfatória. Para fins de comparação, trabalhos como os de Mاتيolo et al. (2021) e Santos et al. (2023) obtiveram recuperações em torno de 91% com teores variando entre 50% e 55%, enquanto Monteiro et al. (2023) alcançaram recuperação máxima de 99% com teor inferior a 40%. Assim, os valores obtidos neste estudo se encontram dentro ou acima dos intervalos esperados para o processo.

Figura 19 – Teor *versus* Recuperação metalúrgica no concentrado final.

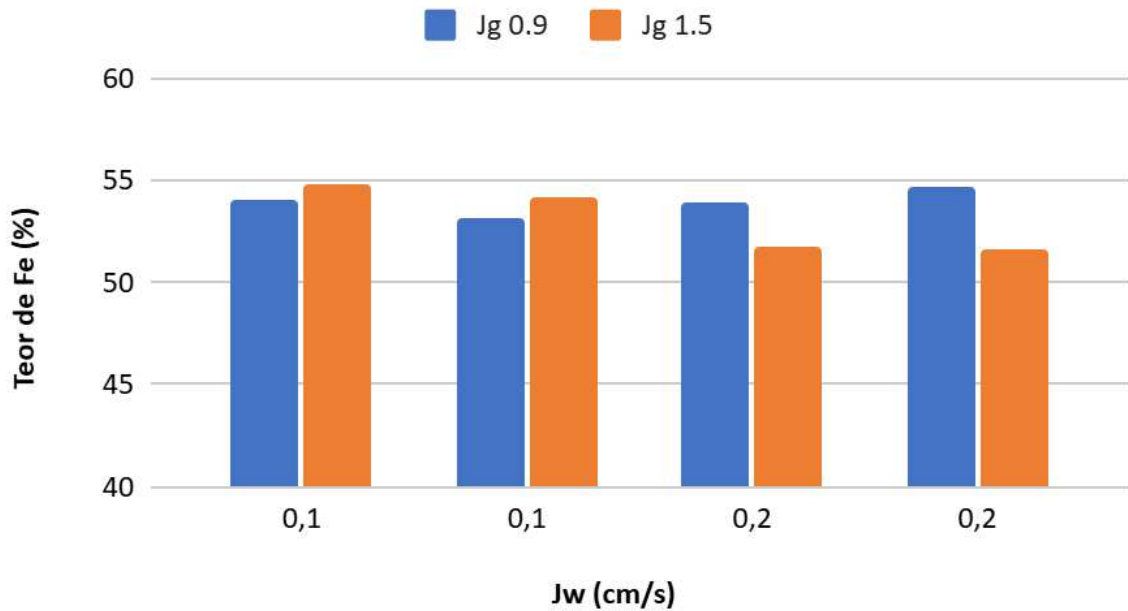


Fonte: Autora (2025).

A análise das Figuras 19 e 20 apresenta os resultados do teor e recuperação em função dos parâmetros J_g e J_w , respectivamente. Observa-se que os maiores teores de ferro foram obtidos nas condições em que se aplicou um J_g mais alto (1,5 cm/s) atrelado a um J_w mais baixo (0,1 cm/s). Nessa configuração, o teor de ferro alcançado foi 54,8%, com recuperação metalúrgica de 96%, evidenciando uma performance satisfatória do processo.

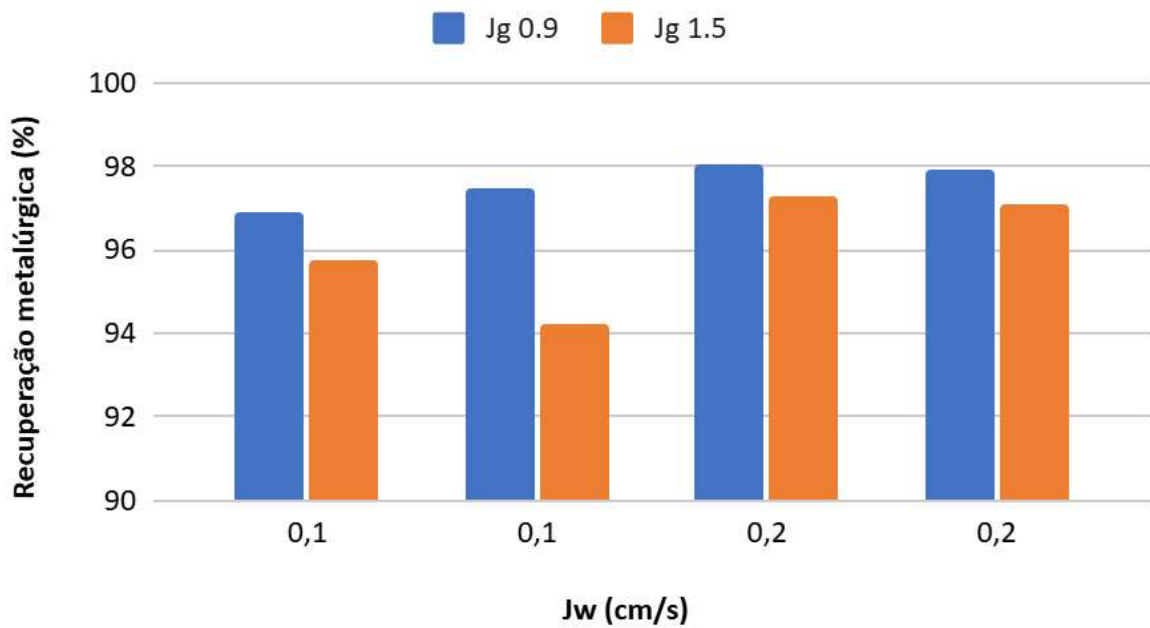
Esses dados sugerem que a combinação entre menor fluxo de ar e maior fluxo de água favoreceram a seletividade do processo.

Figura 20 – Teor em função dos parâmetros J_g e J_w .



Fonte: Autora (2025).

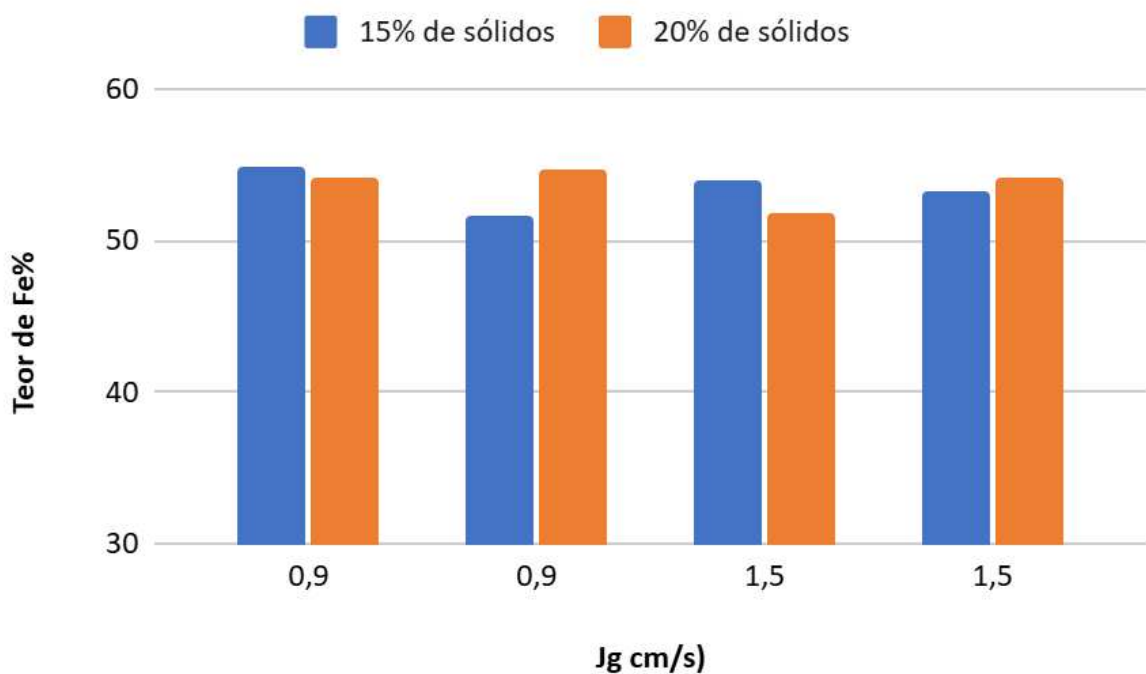
Figura 21 – Recuperação metalúrgica em função dos parâmetros J_g e J_w .



Fonte: Autora (2025).

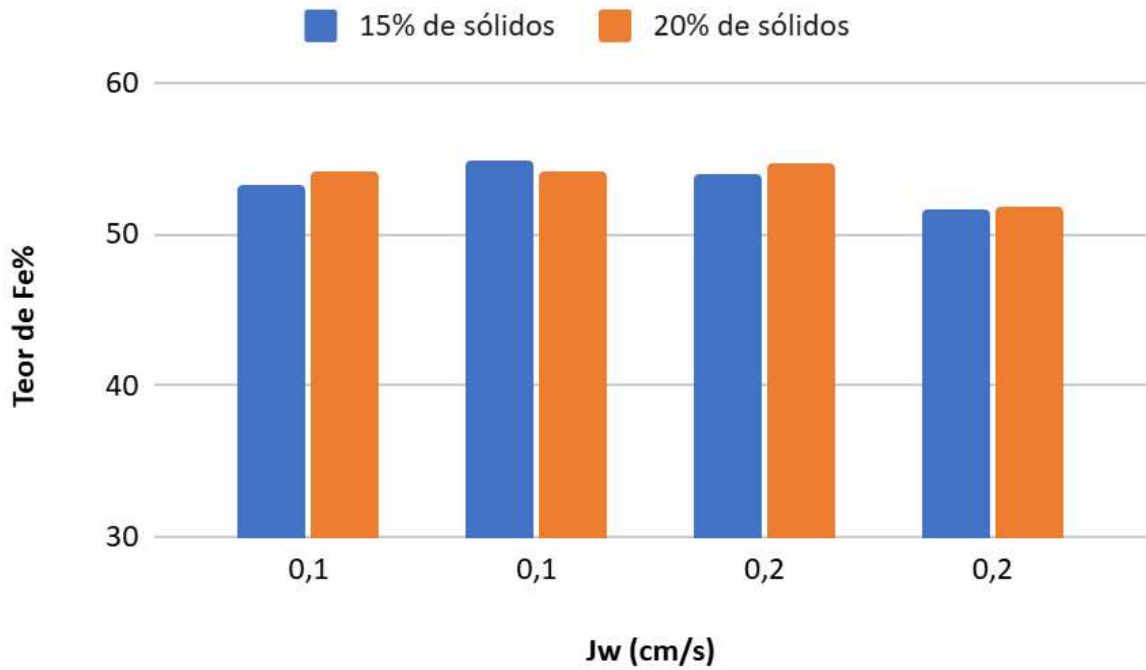
Com base nas Figuras apresentadas, observa-se que a alteração da porcentagem de sólidos na etapa de flotação, de 15% para 20%, não demonstrou uma tendência clara de influência sobre os resultados obtidos em termos de teor de ferro e recuperação metalúrgica. Embora variações pontuais tenham sido registradas entre os testes, os dados não evidenciam uma correlação direta entre a %sólidos na polpa e o desempenho final do processo. Assim, é possível afirmar que, dentro do intervalo avaliado, a porcentagem de sólidos não se configurou como um fator determinante para a qualidade do concentrado produzido.

Figura 22 – Teor em função do parâmetro Jg.



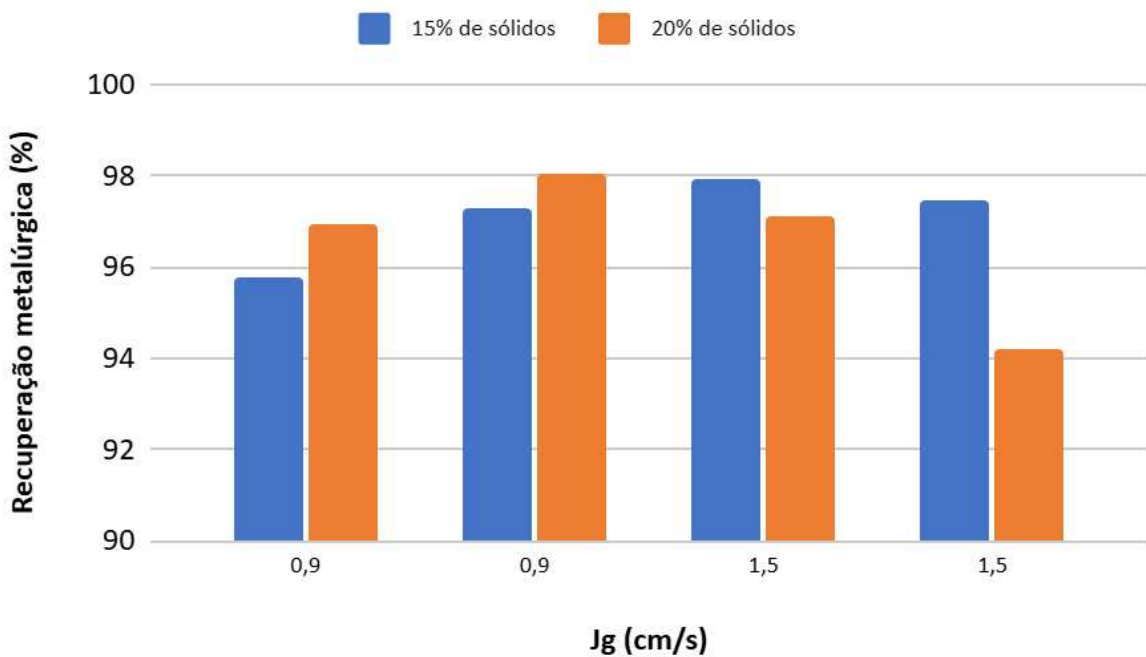
Fonte: Autora (2025).

Figura 23 – Teor em função do parâmetro J_w .



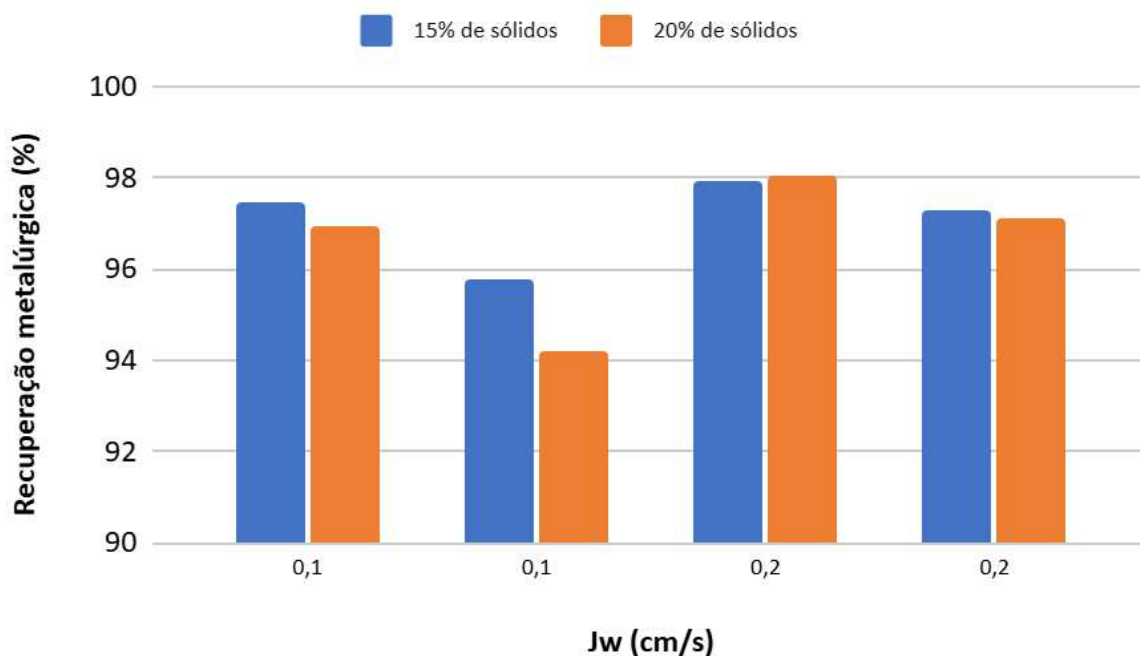
Fonte: Autora (2025).

Figura 24 – Recuperação metalúrgica em função do parâmetro J_g .



Fonte: Autora (2025).

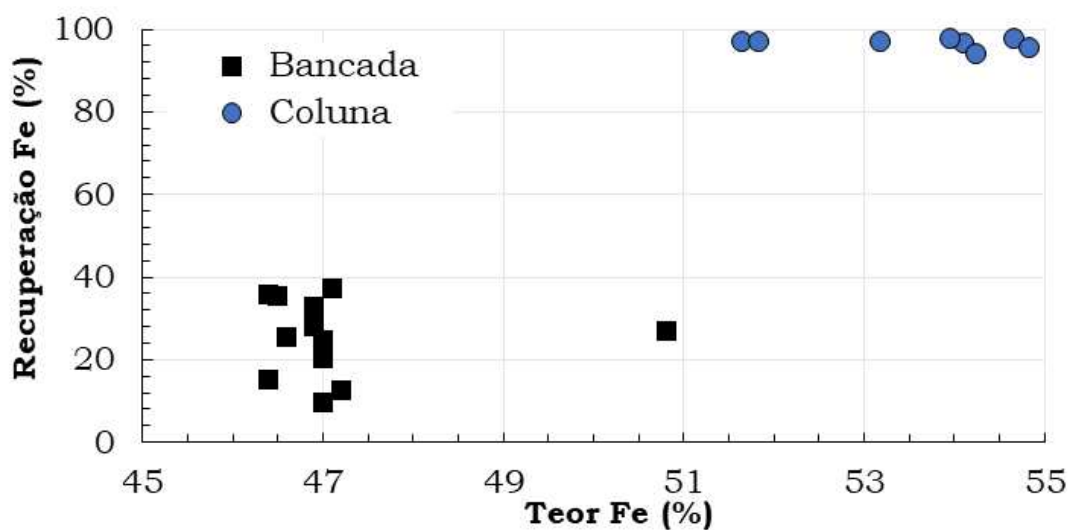
Figura 25 – Recuperação metalúrgica em função do parâmetro Jw .



Fonte: Autora (2025).

A comparação entre os resultados obtidos nas flotação em bancada e em coluna, com uso do coletor Flotisor 16939, apresentada na Figura 25, evidencia um desempenho significativamente superior da flotação em coluna. Os dados mostram que, enquanto os ensaios em bancada apresentaram teores de ferro no concentrado entre aproximadamente 46,5% e 51%, com recuperação metalúrgica variando amplamente de cerca de 10% a 36%, os testes realizados em coluna atingiram recuperações consistentemente elevadas, todas acima de 94%, com teores de ferro no concentrado variando entre 51,5% e 55%. Essa diferença de desempenho reforça a maior eficiência da flotação em coluna para as condições estudadas.

Figura 26 – Teor *versus* Recuperação metalúrgica em função do tipo de flotação.



Fonte: Autora (2025).

A comparação com estudos da literatura reforça a eficiência da flotação em coluna aplicada à lama de minério de ferro neste trabalho. Monteiro et al. (2023) obtiveram recuperação de até 99% com coletor AA2, porém com baixo teor no concentrado (até 36%). Santos et al. (2023), utilizando Flotigam EDA-C com amido e etapa scavenger, alcançaram até 55% de teor e 91% de recuperação. Já Matiolo et al. (2021), em escala piloto industrial, atingiram 53% de teor e 91,5% de recuperação com amida-amina. Em comparação, este estudo obteve teores entre 51,6% e 55,2% e recuperação superior a 94%, sem uso de depressores ou etapas de limpeza, demonstrando desempenho superior ou equivalente, com maior seletividade e simplicidade operacional.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar a eficiência da flotação em coluna na concentração de lama de minério de ferro, utilizando os melhores parâmetros definidos previamente por meio de ensaios em bancada. Os testes em célula mecânica foram fundamentais para a seleção das condições operacionais mais adequadas, servindo como base para a condução dos experimentos em escala de coluna.

Na etapa em bancada, foi avaliado o desempenho de diferentes coletores, com destaque para o Flotisor 16939, que apresentou os melhores resultados na dosagem de 300 g/t e pH 10,5. Embora outros coletores tenham apresentado desempenho promissor, optou-se por seguir com o Flotisor 16939 conforme diretrizes do corpo técnico da empresa parceira.

Os ensaios em coluna apresentaram desempenho superior em relação à bancada, com recuperação metalúrgica superior a 94% e teores de ferro variando entre 51,6% e 55,2%, mesmo sob diferentes combinações dos parâmetros operacionais, como fluxo de ar (J_g), água de lavagem (J_w) e porcentagem de sólidos. Destaca-se que as melhores condições foram observadas com valor mais alto de J_g (1,5 cm/s) e mais baixo de J_w (0,1 cm/s), favorecendo a seletividade do processo. Além disso, a variação da porcentagem de sólidos na polpa não apresentou influência significativa sobre os resultados, dentro da faixa estudada.

A comparação entre os dois circuitos demonstrou maior estabilidade e eficiência na flotação em coluna, indicando sua viabilidade para o processamento de lamas de ferro. Os resultados obtidos reforçam o potencial desse tipo de tecnologia na busca por maior aproveitamento de recursos minerais e recuperação metalúrgica, especialmente em contextos que exigem seletividade elevada e controle mais refinado do processo.

Portanto, conclui-se que a flotação em coluna, aplicada sob condições operacionais otimizadas, representa uma alternativa eficiente e tecnicamente viável para a concentração de minérios de ferro de baixo teor, contribuindo para a sustentabilidade e o aumento da eficiência em operações de beneficiamento mineral.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Caio Henrique Santos de. Estudos de **flotação direta em amostras de minério de ferro**. In: XXXI Jornada de Iniciação Científica e VII Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação , 2023, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: CETEM, 2023.

ARAÚJO, A.C. *et al.* Reagents in iron ores flotation. **Minerals Engineering**, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 219-224, fev. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2004.08.023>.

BASTOS, Ana Carolina Lisboa *et al.* **Engenharias: Desenvolvimento de processos e produtos 2**: desafios tecnológicos do aproveitamento do minério de ferro de grão mogol/mg. Minas Gerais: Engenharias: Desenvolvimento de Processos e Produtos 2, 2023. 19 p. Cap. 3.

BRASIL. Anm. Agência Nacional de Mineração (org.). **INFORME MINERAL 01TRI2024**. 2024. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gov.br/anm/pt-br/assunto/s/economia-mineral/publicacoes/informe-mineral/publicacoes-nacionais/informe-mineral-2024-1o-trimestre>. Acesso em: 08 mar. 2025.

CARVALHAIS, André Lopes. **Avaliação da produção de rochas artificiais utilizando como carga mineral rejeito de minério de ferro**. 2018. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

CARVALHO, Pedro Sergio Landim de; SILVA, Marcelo Machado da; ROCIO, Marco Aurélio Ramalho; MOSZKOWICZ*, Jacques. **Minério de Ferro**. O Departamento de Insumos Básicos da Área de Insumos Básicos do BNDES. Disponível em: file:///C:/Users/elois/Downloads/Minerio_de_ferro.pdf. Acesso em: 28 jan. 2025.

CAXITO, F., DIAS, T. G. **Recursos Minerais de Minas Gerais Ferro On Line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração de Minas gerais** / Pedrosa Soares, Antônio Carlos; VOLL, Eliane; Cunha, Edson Campos (coordenadores). Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE) 2018. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias/minerais/ferro/#ferro/#>. Acesso em: 23 de jan. 2025

CHAVES, Arthur Pinto *et al.* **Flotação**. 5. ed. Rio de Janeiro: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França., 2010. 52 p.

CHAVES, Arthur Pinto; PERES, Antônio Eduardo Clark. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**: britagem, peneiramento e moagem. 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 324 p.

COMUNICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO. Ceará: Secretaria de Educação do Estado do Ceará, 2012. 145 p. Curso Técnico em Mineração. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2012/06/mineracao_comunicacao_e_classificacao.pdf. Acesso em: 8 mar. 2025.

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

DUARTE, Anderson Pires. **CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO E DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS NO ESTADO DE MINAS GERAIS EM RELAÇÃO AO POTENCIAL DE RISCO**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

FERREIRA, Cássio Roberto Nunes. **Métodos de flotação de minérios de ferro**. 2015. 52 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FERREIRA, Diego Henrique Oliveira. **Principais Etapas do Tratamento de Minérios Itabiríticos do Quadrilátero Ferrífero**. 2011. 50 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Recursos Minerais., Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.

FERREIRA, Hiago Rodrigues. **ANÁLISE SISTEMÁTICA DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ACERCA DA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO**. 2018. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Goiás – Ufg, Catalão, 2018.

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. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301751614000155>.

FORMOSO, M. L. L. (2020). **Some topics on geochemistry of weathering: a review**. Anais da Academia Brasileira de Ciências. UFRGS.

FURTADO, Renata Monteiro. **ESTUDO ACERCA DOS REAGENTES NA FLOTAÇÃO CATIONICA REVERSA DE MINÉRIO DE FERRO: RECIRCULAÇÃO DE AMINA E DEGRADAÇÃO DO AMIDO**. 2017. 54 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Cefet/Mg, Araxá, 2017.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais**. 23a ed., Porto Alegre, Artmed. Editora S.A. 2012. cap. 16, p. 404-419.

LINS, Fernando Antonio Freitas. **Concentração Gravítica**. 5. ed. Rio de Janeiro: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Sílvia Cristina A. França., 2010. 29 p.

LINS, Fernando Antonio Freitas. **Tratamento de Minérios: concentração gravítica**. 6. ed. Rio de Janeiro: Cetem/McTic, 2018. 959 p.

LOPES, Gilmara Mendonça et al. **Flotação direta de minério de ferro com oleato de sódio**. REM - Revista Escola de Minas, v. 62, n. 3, p. 323-329, jul./set. 2009.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antonio Freitas. **Tratamento de Minérios: introdução ao tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: Cetem, 2010. 21 p.

MA, X.; MARQUES, M.; GONTIJO, C. **Flotation of iron ores: A review**. *Minerals & Metallurgical Processing*, v. 28, n. 4, p. 177-184, 2011.

MATIOLO, Elves *et al.* **Improving recovery of iron using column flotation of iron ore slimes**. *Minerals Engineering*, Rio de Janeiro, v. 158, p. 106608, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106608>.

MATIOLO, Elves. **Avanços no desenvolvimento da coluna de três produtos - C3P Fundamentos e Aplicações**. 2008. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MATIOLO, L. F. M. *et al.* **Pilot Column Flotation Test of Iron Ore Slimes at Vargem Grande II** – Vale S.A. *Minerals*, v. 11, n. 7, p. 699, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/7/699>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MATOS, Vanderson Eney de. **Seletividade de reagentes na flotação reversa de minério de ferro**. 2017. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, A Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MONTEIRO, R. S.; MATIOLO, E. **Flotação em coluna de lama de ferro utilizando coletores amida-amina**. In: XII JORNADA DO PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO INSTITUCIONAL – PCI/CETEM, 12., 2023, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2023. p. 1-5.

NASCIMENTO, Herynson Nunes. **Caracterização tecnológica de materiais estéreis com elevado teor de PPC e P da Mina de Alegria da SAMARCO MINERAÇÃO S.A.** 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

National Minerals Information Center (org.). **Global iron Ore Production Data;** clarification of reporting from usgs. United States: Usgs Science For A Changing World, 2017. 4 p. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/files/global-iron-ore-production-data-clarification-reporting-usgs> . Acesso em: 03 fev. 2025.

NEVES, P. C. P. D; SCHENATO, Flávio Antônio; **Introdução à Mineralogia Prática**: subtítulo do livro. 4. ed. Canoas: ULBRA, 2018. p. 72-77.

PRAES, P. E.; AQUINO, J. A.; ALBUQUERQUE, R. O.; LUZ, A. F. O. Recuperação das lamas de minério de ferro em pequenas minerações por flotação em coluna. In: 40º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 11º SEMINÁRIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 2010, Belo Horizonte. Belo Horizonte - MG, 2010.

PEREIRA, Luiz Henrique Côrtes Santana. **Considerações sobre o processo de beneficiamento de minério de ferro**: beneficiamento, pelotização e análise online de teores. 2013. 44 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Recursos Minerais,

Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

POPP, José Henrique. **Geologia Geral**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2017. 332 p. 103.

ROCHA, Luciano; PERES, Antônio Eduardo Clark. **Aproveitamento econômico das lamas de ferro**. REM – Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 62, n. 3, p. 291–295, set. 2009.

SAMPAIO, José Alves; DELBONI JÚNIOR, Homero. **Tratamento de Minérios: cominuição**. 6. ed. Rio de Janeiro: Cetem/McTic, 2018. 959 p.

SANTOS, Adriele Mércia Alves. **AVALIAÇÃO DE REAGENTES NA FLOTAÇÃO DIRETA DE MINÉRIO FOSFÁTICO, UTILIZANDO PLANEJAMENTO FATORIAL COMPLETO**. 2021. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas., Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais Unidade Araxá, Araxá, 2021.

SANTOS, Bianca de Castro. **AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA DESLAMAGEM DE MINÉRIO DE FERRO VIA DECANTAÇÃO E HIDROCICLONAGEM**. 2018. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2018.

SANTOS, Everton Pedroza dos. **ALTERNATIVAS PARA O TRATAMENTO DE ULTRAFINOS DE MINÉRIO DE FERRO DA MINA DO PICO/MG POR FLOTAÇÃO EM COLUNA**. 2010. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SANTOS, Rodrigo César de Vasconcelos dos Santos. **CONTRIBUIÇÃO DO SETOR MINERAL NO PRODUTO INTERNO BRUTO BRASILEIRO. Radar: tecnologia, produção e comércio exterior**, [S.L.], n. 65, p. 33-36, 30 abr. 2021. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA. <http://dx.doi.org/10.38116/radar65art6>.

SANTOS, E. P.; RODRIGUES, R. T.; RUBIO, J. **Caracterização e tratamento de lamas de minério de ferro por flotação em coluna**. Jornada de Iniciação Científica – Escola de Engenharia da UFMG, 2023. 5 p.

SOMASUNDARAN, P. (1980). **Principles of flocculation, dispersion and selective flocculation**. Em P. SOMASUNDARAN, Fine particles processing. Vol. II (pp. 947-976). New York.

SOUSA, Thalia Lopes de. **FLOTAÇÃO ANIÔNICA DIRETA DE MINERAIS PORTADORES DE FERRO COM ÁCIDO GRAXO SAPONIFICADO COMO COLETOR**. 2022. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2022.

SUMÁRIO Mineral Brasileiro 2023 - Ferro: Ferro. Ferro. 2023. Agência Nacional de Mineração. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2023-#:~:text=Sum%C3%A1rio%20Mineral%20Brasileiro%202023%20%2D%20Ferro>. Acesso em: 29 jan. 2025.