

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia de Minas
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais - CEERMIN

Vitor Tiago Dias Reis

**RELAÇÃO ENTRE RECUPERAÇÃO METALÚRGICA E ÍNDICE DE
SELETIVIDADE: um estudo aplicado à flotação reversa de minério de ferro**

Belo Horizonte
Junho 2025

Vitor Tiago Dias Reis

**RELAÇÃO ENTRE RECUPERAÇÃO METALÚRGICA E ÍNDICE DE
SELETIVIDADE: um estudo aplicado à flotação reversa de minério de ferro**

Monografia de Especialização

Monografia de especialização apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientadora: Profa. Dra. Rísia Magriotis Papini

Belo Horizonte
Junho 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO MONOGRAFIA/ARTIGO

Aos vinte e oito dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, às 09h:20 , o estudante Vitor Tiago Dias Reis, matrícula 2023700897, defendeu o Trabalho intitulado “**Relação entre Recuperação Metalúrgica e Índice de Seletividade: Um estudo aplicado à Flotação Reversa de Minério de Ferro**”.

Participaram da banca examinadora os professores abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 99

Situação: Aprovado

Orientadora: Professora Risia Magriotis Papini

Examinadora: Professora Sônia Denise Ferreira Rocha

Examinador: Professor George Eduardo Sales Valadao



Documento assinado eletronicamente por **Risia Magriotis Papini, Usuária Externa**, em 27/08/2025, às 18:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sonia Denise Ferreira Rocha, Professora do Magistério Superior**, em 20/10/2025, às 09:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **George Eduardo Sales Valadao, Professor Magistério Superior - Voluntário**, em 31/10/2025, às 09:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4444991** e o código CRC **970DAE69**.

RESUMO

Este trabalho acadêmico teve como foco a análise da recuperação metalúrgica e do índice de seletividade no processo de beneficiamento de minério de ferro, um componente essencial da economia brasileira. Com base em uma revisão bibliográfica e um estudo de caso em circuitos de flotação catiônica reversa, a pesquisa buscou compreender a relação entre esses indicadores e a influência de variáveis operacionais e composicionais sobre eles. Os objetivos específicos incluíram revisar conceitos-chave, investigar a correlação entre recuperação metalúrgica e seletividade, e avaliar esses indicadores em diferentes circuitos de flotação. Os resultados revelaram que a recuperação metalúrgica média do Circuito de Flotação II foi de 80,26%, significativamente superior aos 64,25% do Circuito I, evidenciando uma diferença importante na eficiência dos processos. O índice de seletividade também apresentou valores distintos, com 15,98 para o Circuito II e 10,5 para o Circuito I, o que indica que o primeiro não apenas recupera mais ferro, mas também o faz com maior eficiência em relação às impurezas. A análise estatística sugeriu que o teor de ferro na alimentação tem uma influência direta e significativa no desempenho dos circuitos, enquanto a sílica na alimentação não apresentou impacto estatisticamente relevante no índice de seletividade. Além disso, a variabilidade dos resultados foi menor no Circuito II, refletindo uma operação mais estável e controlada. Esses achados ressaltam a importância da gestão operacional na otimização dos processos de beneficiamento e comprovam a relação entre a recuperação e o índice de seletividade na flotação.

Palavras-chave: minério de ferro; recuperação metalúrgica; índice de seletividade; flotação catiônica reversa; beneficiamento mineral.

ABSTRACT

This academic work focused on analyzing metallurgical recovery and selectivity index in the iron ore beneficiation process, an essential component of the Brazilian economy. Based on a literature review and a case study in reverse cationic flotation circuits, the research sought to understand the relationship between these indicators and the influence of operational and compositional variables on them. The specific objectives included reviewing key concepts, investigating the correlation between metallurgical recovery and selectivity, and evaluating these indicators in different flotation circuits. The results revealed that the average metallurgical recovery of Flotation Circuit II was 80.26%, significantly higher than the 64.25% of Circuit I, evidencing a significant difference in process efficiency. The selectivity index also presented distinct values, with 15.98 for Circuit II and 10.5 for Circuit I, indicating that the former not only recovers more iron but also does so with greater efficiency regarding impurities. Statistical analysis suggested that the iron content in the feed has a direct and significant influence on circuit performance, while silica in the feed did not show a statistically relevant impact on the selectivity index. Furthermore, the variability of results was lower in Circuit II, reflecting a more stable and controlled operation. These findings highlight the importance of operational management in optimizing beneficiation processes and demonstrate the relationship between recovery and selectivity index in flotation.

Keywords: iron ore; metallurgical recovery; selectivity index; reverse cationic flotation; mineral beneficiation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 – Formação de Ferro Bandada (Seção de Materiais Didáticos do IGc-USP, 2021) | 11 |
| Figura 3.2 – Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero (Dorr, 1969, modificado por Alkmin & Marshak, 1998) | 12 |
| Figura 3.3 – Processos de transferência de massa dentro de uma célula de flotação. (1) Flotação verdadeira, (2) Arraste, (3) Drenagem e (4) Deslocamento da espuma (Laplante et al., 1989) | 13 |
| Figura 3.4 – Teor de SiO ₂ no concentrado e recuperação metálica na flotação em função pH de dispersão na deslamagem (SILVA, 1994)..... | 14 |
| Figura 3.5 – Preço diário do minério de ferro 62% na China entre 2020 e 2025 (Fonte: https://br.investing.com/commodities/iron-ore-62-cfr-futures-historical-data . Acesso em: 10 fev. 2025)..... | 20 |
| Figura 4.1 – Circuito Flotação I..... | 23 |
| Figura 4.2 – Circuito Flotação II | 24 |
| Figura 4.3 – Resultados do teste t para comparação das médias de %Fe e %SiO ₂ na alimentação, concentrado e rejeito dos Circuitos de Flotação I e II. | 28 |
| Figura 4.4 – Regressão linear entre o %Fe na alimentação e o %Fe no rejeito dos Circuitos de Flotação I e II..... | 30 |
| Figura 4.5 – Regressão linear entre o %SiO ₂ na alimentação e o %Fe no rejeito dos Circuitos de Flotação I e II..... | 31 |
| Figura 4.6 – Boxplot comparando os indicadores dos Circuitos de Flotação I e II..... | 33 |
| Figura 4.7 – Correlograma das variáveis %Fe na alimentação, %SiO ₂ na alimentação, Recuperação Mássica, Recuperação Metalúrgica e Índice de Seletividade nos Circuitos de Flotação I e II..... | 34 |
| Figura 4.8 – Análise de Regressão Múltipla para o Circuito de Flotação I..... | 35 |
| Figura 4.9 – Análise de Regressão Múltipla para o Circuito de Flotação II..... | 36 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela IV.1 – Estatística descritiva das variáveis %Fe e %SiO ₂ no Circuito de Flotação I | 27 |
| Tabela IV.2 – Estatística descritiva das variáveis %Fe e %SiO ₂ no Circuito de Flotação II.... | 27 |
| Tabela IV.3 – Indicadores das circuitos Flotação I e Flotação II..... | 32 |
| Tabela IV.4 – Estatística descritiva dos indicadores de Recuperação Mássica, Recuperação Metalúrgica e Índice de Seletividade dos Circuitos de Flotação I e II | 32 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 8 |
| 2. OBJETIVOS E RELEVÂNCIA..... | 10 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 11 |
| 3.1. Geologia do minério de ferro | 11 |
| 3.2. Processo de flotação catiônica reversa aplicada ao minério de ferro..... | 12 |
| 3.3. Definição e importância da recuperação metalúrgica no beneficiamento mineral ... | 16 |
| 3.4. Definição e relevância do índice de seletividade no processo de flotação | 17 |
| 3.5. Relação entre eficiência dos processos de beneficiamento, custo e mercado | 18 |
| 3.6. Fatores influenciadores do preço do minério de ferro e sua dinâmica de mercado .. | 20 |
| 4. ESTUDO DE CASO | 23 |
| 4.1. Métodos de coleta de dados | 24 |
| 4.2. Análise dos dados | 25 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 38 |
| 6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 40 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 41 |

INTRODUÇÃO

Batista, Souza e Lima (2022) argumentam que a história da humanidade sempre esteve associada à utilização de recursos naturais, com os bens minerais sendo um desses principais recursos no caminho da sobrevivência e evolução humana. Neste contexto, atualmente, a mineração de minério de ferro desempenha um papel crucial, especialmente nos aspectos socioeconômicos. Além de ser um dos pilares fundamentais da economia de muitos países, este setor é responsável pela criação de inúmeros empregos diretos e indiretos, impulsionando o desenvolvimento de infraestrutura local e atraindo investimentos, promovendo, consequentemente, o crescimento econômico e social.

Para sustentar esse desenvolvimento econômico e social, é essencial que as empresas trabalhem para atender às necessidades humanas. Nesse sentido, agregar valor é fundamental, pois o trabalho humano só é recompensado quando satisfaz as necessidades dos clientes, que pagam apenas por aquilo que percebem o seu valor (Campos, 2013). No caso da mineração de minério de ferro, esse valor está diretamente ligado à eficiência dos processos de separação e concentração dos minerais.

Levando isso em consideração, Chaves et al. (2012) reforçam que raramente as espécies minerais encontram-se puras na natureza; na maioria dos casos, encontram-se misturadas. Para o aproveitamento industrial de algumas delas, é necessário separá-las das demais, o que consiste na concentração da espécie útil. Além disso, Santos (2007) destaca que o Brasil possui uma das maiores reservas de minério de ferro do mundo, com os depósitos ferríticos do Quadrilátero Ferrífero contendo minérios hematíticos como o itabirito, que possui teor de ferro entre 20% e 55%, tendo como impureza principal a sílica (SiO_2).

Considerando esses aspectos, para concentrar essa espécie útil, a indústria utiliza como um dos recursos o processo de flotação catiônica reversa, consagrado no Brasil desde 1977. Nesse processo, deprime-se os minerais de minério de ferro e flota-se a ganga silicática (Aguiar, Furtado e Peres, 2017). A flotação é o método mais importante não só no Brasil, mas em todo o mundo.

Ainda mais significativo é o fato de que a eficiência desse processo é fundamental, uma vez que a qualidade do produto afeta a economia da empresa de duas maneiras principais: impactando tanto o custo quanto a receita de venda (Juran, 2009). Portanto, para assegurar que

os interesses dos *stakeholders* (clientes, acionistas, - entre outros) sejam satisfeitos, é essencial gerenciar o processo. Neste contexto, o monitoramento dos itens de controle e verificação se apresenta como um recurso importante para a garantia da qualidade (Campos, 2013).

Para consolidar essa ideia, este trabalho remete a dois importantes indicadores como recurso para medição da efetividade do processo de concentração de minério de ferro aplicado à flotação: a Recuperação Metalúrgica e o Índice de Seletividade. A eficiência desses indicadores é crucial para determinar a recuperação do mineral-minério e a separação eficaz da sílica (principal mineral de ganga), garantindo a qualidade e rentabilidade do processo de beneficiamento.

2. OBJETIVOS E RELEVÂNCIA

Este trabalho tem por objetivo geral analisar a recuperação metalúrgica e o índice de seletividade no processo de beneficiamento de minério de ferro, identificando os impactos dessa relação e avaliando a influência de variáveis operacionais e composicionais sobre esses indicadores.

Para tanto, são definidos como objetivos específicos:

- Revisar a literatura sobre os conceitos de recuperação metalúrgica e índice de seletividade no contexto da flotação reversa de minério de ferro, considerando sua aplicação prática;
- Investigar a correlação entre recuperação metalúrgica, índice de seletividade e variáveis operacionais/composicionais, a partir de uma abordagem estatística;
- Avaliar a recuperação metalúrgica e o índice de seletividade em circuitos distintos de flotação reversa, identificando padrões e possíveis otimizações no processo.

A relevância deste trabalho reside na sua capacidade de promover eficiência e sustentabilidade no setor de beneficiamento de minério de ferro, através da gestão de dois importantes indicadores. Ao entender melhor a relação entre recuperação metalúrgica e índice de seletividade, a pesquisa pode oferecer soluções que beneficiam tanto a indústria quanto a comunidade científica. A aplicação dos resultados pode levar a operações mais rentáveis e ambientalmente responsáveis, respondendo às demandas atuais por práticas de mineração mais eficientes e sustentável.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Geologia do minério de ferro

O conhecimento das características dos minerais ferríferos é fundamental para a adequada condução de sua extração e aproveitamento econômico. Santana (2012) destaca que as formações ferríferas bandadas (BIFs – *Banded Iron Formations*) – Figura 3.1 – representam intercalações de camadas centimétricas de minerais de ferro e sílica, na forma de “*chert*” ou sílica recristalizada, como o quartzo. Essas formações possuem ampla distribuição e potencial econômico superior em comparação às *Ironstones*, recebendo diferentes denominações em várias regiões do mundo, como itabirito no Brasil e jaspelito na Austrália.

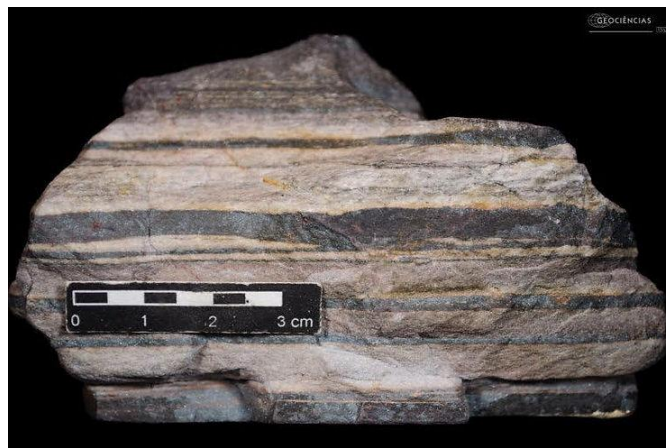


Figura 3.1 – Formação de Ferro Bandada (Seção de Materiais Didáticos do IGc-USP, 2021)

Neste contexto, é relevante ressaltar que o quartzo é o mineral de ganga predominante nos minérios de ferro (Chaves, 2013). Além disso, Rosier e Chemale Jr. (2013) citam também nas formações de itabirito, a presença de dolomita e anfibólios, como grunerita, tremolita, actinolita, cummingtonita e antofilita. Essa diversidade mineral permite a definição de três tipos composicionais principais: quartzo-itabirito, itabirito dolomítico e itabirito anfibolítico.

Além disso, as reservas brasileiras de minério de ferro estão concentradas em sua maioria nos estados de Minas Gerais e Pará, com mais de 90% das reservas medidas e indicadas (Quaresma, 2001).

O Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais (Figura 3.2), é uma das regiões mais ricas em depósitos de minério de ferro, abrangendo uma área de aproximadamente 7.000 km², na porção

amido gelatinizado assegura a manutenção da hidrofobicidade da hematita, impedindo que este mineral se torne hidrofóbico em contato direto com a eteramina.

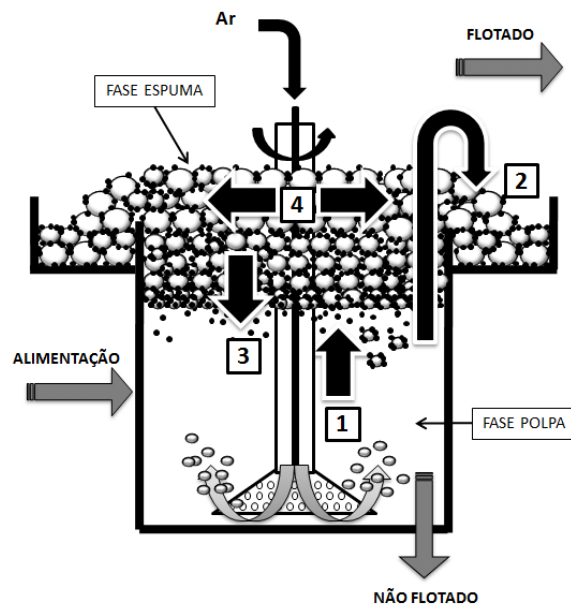


Figura 3.3 – Processos de transferência de massa dentro de uma célula de flotação. (1) Flotação verdadeira, (2) Arraste, (3) Drenagem e (4) Deslocamento da espuma (Laplante et al., 1989)

A evolução do processo de flotação catiônica reversa remonta à década de 1960, com a adoção inicial de aminas como coletores de ganga silicatada (Santana, 2012). Desde então, esse método tornou-se predominantemente aplicado em usinas de pelotização, destacando-se por três razões principais: permite a redução de teores de sílica em concentrados magnéticos, a concentração de minérios oxidados de baixos teores e a produção de superconcentrados para processos metalúrgicos de redução direta. Rabelo (1994) ainda enfatiza a relevância ambiental da flotação, possibilitando a recuperação de frações finas de minérios frequentemente rejeitadas.

O desenvolvimento e a implementação da flotação em coluna representaram um marco significativo na industrialização desse método no Brasil, com sua primeira aplicação pela Samarco Mineração S/A em 1991, seguida por outras mineradoras ao longo da década de 1990 (Costa, 2009). Esta inovação não apenas modernizou as operações de flotação, mas também ampliou suas capacidades, permitindo a recuperação eficiente de minérios de ferro em condições cada vez mais desafiadoras.

Neste contexto, embora a flotação seja um processo de princípios simples, os fenômenos envolvidos são complexos, englobando a interação entre partículas e bolhas de ar, além de fatores relacionados à química de superfície e hidrodinâmica (Chaves 2013). A distribuição de tamanhos de partículas é um aspecto decisivo na eficiência do processo de flotação (Santana, 2012). A presença de partículas muito finas e lamas pode deteriorar a seletividade e a recuperação de minerais, exigindo frequentemente uma etapa prévia de deslamagem para otimizar os resultados da flotação (Chaves, 2013).

De acordo com Chaves (2013, p. 11), “a seletividade do processo de flotação baseia-se no fato de que a superfície de diferentes espécies minerais pode apresentar distintos graus de hidrofobicidade”. Desse modo é importante considerar que quanto mais hidrofóbica for uma partícula, menos ávida ela será por água.

Portanto, a flotabilidade de minerais como o quartzo pode variar com o pH da solução, uma vez que a ionização da superfície mineral modifica suas propriedades de hidrofobicidade, conforme figura 3.4. Em condições de pH específicas, o quartzo pode tornar-se mais ou menos hidrofóbico, influenciando sua recuperação no processo de flotação. Portanto, a inclusão de uma ilustração que mostre a relação entre diferentes níveis de pH, a flotabilidade do quartzo e a recuperação metalúrgica é fundamental para compreender como essas variáveis se interconectam. Essa representação pode ajudar a visualizar como ajustes no pH podem otimizar a seletividade e a eficiência do processo de flotação.

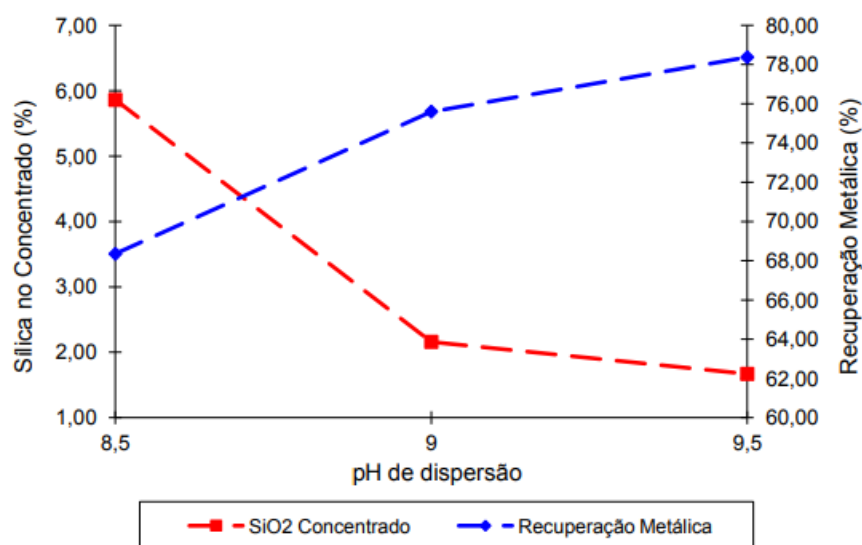


Figura 3.4 – Teor de SiO₂ no concentrado e recuperação metálica na flotação em função pH de dispersão na deslamagem (SILVA, 1994)

Ademais, a formação de agregados e o fenômeno de "*slimes coating*" são desafiadores, pois promovem a aderência de partículas de lamas a outras partículas, alterando suas propriedades superficiais e aumentando o consumo de coletores (Peres e Salum, 2004).

O processo de flotação envolve várias etapas fundamentais:

- **Aeração:** A introdução de bolhas de ar em uma suspensão líquida, criando um ambiente onde as partículas podem interagir com as bolhas.
- **Coagulação e Flocculação:** Agregação de partículas, facilitando sua adesão às bolhas.
- **Separação:** As partículas aderidas às bolhas são levadas à superfície, formando uma espuma, enquanto as demais permanecem na parte inferior.

Ainda é importante destacar que alguns fatores têm impactos significativos na eficiência do processo de flotação, onde a otimização dessas variáveis é crucial para minimizar os impactos negativos das lamas, dentre as quais destaca-se:

- **pH:** O pH da polpa mineral pode afetar a carga superficial das partículas e a solubilidade dos reagentes. Aguiar, Furtado e Peres (2017), ao analisarem a seletividade na flotação catiônica de minério de ferro, concluem que níveis mais altos de pH diminuíram a flotabilidade do quartzo.
- **Reagentes:** Coletor, espumante e modificadores são adicionados para controlar a hidrofobicidade das partículas.
- **Tamanho das Partículas:** O dimensionamento das partículas impacta a eficiência da separação. Segundo Costa (2009), a distribuição de tamanho de partículas é considerada uma das variáveis mais relevantes no tratamento de minérios, pois a liberação dos minerais de interesse econômico em relação à ganga depende desse fator. Além disso, a classificação dos minérios de ferro pode gerar um efeito de concentração devido às notáveis diferenças entre o mineral e a ganga, tanto em granulação quanto em massa específica, o que pode impactar positivamente a eficiência de processos de concentração, como a flotação catiônica reversa.
- **Taxa de Ar:** A quantidade de ar introduzida no sistema também deve ser controlada, pois influenciará a formação de bolhas e, conseqüentemente, a capacidade de captura das partículas.

Dessa forma, a flotação catiônica reversa se revela um processo vital para a indústria mineral no Brasil, oferecendo soluções inovadoras para a recuperação de minérios de ferro, especialmente em um cenário de escassez de depósitos de alta qualidade e a crescente demanda por ferro no mercado global. A continuidade de estudos e inovações no processo é essencial para enfrentar os desafios impostos pelas características das variações dos minérios brasileiros e pelas exigências ambientais do setor.

3.3. Definição e importância da recuperação metalúrgica no beneficiamento mineral

Segundo Chaves et al. (2012), o objetivo de qualquer operação de concentração é obter a máxima recuperação e o máximo enriquecimento, embora, na prática, seja impossível alcançar esses dois objetivos simultaneamente, uma vez que a alimentação é composta por partículas com composições químicas distintas que permanecem inalteradas, independentemente de serem direcionadas ao concentrado ou ao rejeito.

Neste contexto Chaves (1992) explica que é fundamental compreender que a recuperação é definida como a razão entre a tonelagem de concentrado e a tonelagem de alimentação, sendo também referida como rendimento ou recuperação em massa, dependendo do contexto. Essa métrica é crucial para operações de concentração e usinas de beneficiamento, enquanto o termo "partição" é utilizado em operações de classificação ou separação densitária, abrangendo um significado mais amplo. Utiliza-se, então, a seguinte fórmula para cálculo da recuperação mássica:

$$\text{Recuperação Mássica} = \frac{t/h \text{ de concentrado}}{t/h \text{ de alimentação}}$$

O segundo conceito fundamental é a recuperação metalúrgica, refletindo a eficiência com que os minerais valiosos são extraídos de suas matrizes. Este indicador é fundamental para avaliar a eficácia dos processos de beneficiamento, que incluem etapas como britagem, moagem e concentração.

A recuperação metalúrgica pode ser calculada pela relação entre a quantidade de elemento útil no concentrado produzido e a quantidade de elemento útil na alimentação processada, utiliza-se então a seguinte fórmula:

$$\text{Recuperação Metalúrgica} = \frac{t/h \text{ de elemento útil no concentrado}}{t/h \text{ de elemento útil na alimentação}}$$

A importância da recuperação metalúrgica no beneficiamento mineral pode ser analisada sob diferentes perspectivas. Em primeiro lugar, a recuperação metalúrgica impacta diretamente a viabilidade econômica de uma operação mineral. Quanto maior a recuperação, menor será a quantidade de minério que precisa ser processada para obter a mesma quantidade de produto final, resultando em menores custos operacionais e, conseqüentemente, em uma maior margem de lucro para as empresas. Além disso, uma recuperação eficiente minimiza o desperdício de recursos naturais, contribuindo para a sustentabilidade econômica da mineração.

Em segundo lugar, a recuperação metalúrgica está intimamente ligada à qualidade do produto final. Processos que garantem uma alta recuperação tendem a produzir concentrados com maior teor de mineral valioso e menor quantidade de impurezas. Isso é especialmente relevante em mercados competitivos, onde a qualidade do produto pode determinar o sucesso comercial.

Por fim, é evidente que o setor mineral enfrenta desafios significativos dado que o mundo apresenta uma tendência de esgotamento das melhores jazidas de minérios para diversos metais, o que ressalta a necessidade urgente de desenvolver métodos mais sustentáveis e eficientes para o processamento do ferro. Essa busca por eficiência é crucial para garantir que possamos maximizar o aproveitamento dos recursos minerais disponíveis, assegurando um futuro mais sustentável para a indústria (CUNHA et al., 2023).

3.4. Definição e relevância do índice de seletividade no processo de flotação

O índice de seletividade é uma ferramenta fundamental, especialmente em operações de concentração mineral. Este índice, introduzido por Gaudin em 1957, permite mensurar a capacidade de um sistema de separação em distinguir entre partículas valiosas e não valiosas durante o processo de beneficiamento.

Segundo Costa (2009) o cálculo do índice de seletividade (IS), conforme proposto por Gaudin, é expresso pela raiz da razão entre a recuperação do elemento útil no concentrado multiplicada pela fração não recuperada de ganga, e a ganga recuperada no concentrado multiplicada pela fração do elemento útil não recuperada, conforme a fórmula a seguir:

$$IS = \sqrt{\frac{R_{\text{útil}}}{R_{\text{ganga}}} \times \frac{(1 - R_{\text{ganga}})}{(1 - R_{\text{útil}})}}$$

- $R_{\text{útil}}$: corresponde à recuperação de elemento útil no concentrado;
- R_{ganga} : corresponde à recuperação de ganga no concentrado.

Essa definição matemática reflete a eficiência do processo em maximizar a recuperação do mineral desejado, ao mesmo tempo em que minimiza a quantidade de impurezas que acompanham o produto final (Costa, 2009). Considerando que o numerador é composto pelos fatores relevantes em um processo eficiente de concentração (mineral útil no concentrado e de ganga no rejeito), enquanto o denominador é constituído por fatores que não são de interesse (mineral de ganga no concentrado e útil no rejeito), compreende-se que quanto maior o índice de seletividade, mais eficaz foi o processo de separação entre as partículas úteis e a ganga.

Assim, ao aplicar esse conceito no contexto da flotação catiônica reversa do minério de ferro, cuja ganga silicatada (SiO_2) é predominante, Santana (2012) expressa a fórmula da seguinte maneira:

$$IS = \sqrt{\frac{\%Fe_{\text{Concentrado}} \times \%SiO_{2\text{Rejeito}}}{\%SiO_{2\text{Concentrado}} \times \%Fe_{\text{Rejeito}}}}$$

A relevância desse índice torna-se evidente ao considerarmos que uma alta seletividade indica um processo mais eficiente, resultando em um concentrado com maior teor do mineral desejado e menor quantidade de contaminantes. Essa situação não apenas melhora a qualidade do produto final, mas também pode impactar significativamente os custos operacionais e a viabilidade econômica da operação mineral.

Além disso, o índice de seletividade é essencial para otimizações contínuas nos processos de flotação, permitindo ajustes nas condições operacionais e na formulação dos reagentes utilizados. Portanto, compreender e monitorar o índice de seletividade é imprescindível para garantir que as operações de flotação alcancem seus objetivos de eficiência e rentabilidade.

3.5. Relação entre eficiência dos processos de beneficiamento, custo e mercado

A produção de minério de ferro é um processo que envolve diversas etapas, desde a extração até a comercialização do produto final. E neste contexto Luz, França e Braga (2018) destacam

que um fator crucial que determina a viabilidade econômica dessa operação é a eficiência do processo mineral, considerada desde o desenvolvimento do projeto e diretamente impactado pela seleção dos processos de produção, especificação dos equipamentos, dentre outros.

Santana (2012) destaca que a ineficiência na recuperação metalúrgica, bem como na seletividade do processo, pode resultar em custos operacionais significativamente elevados, impactando não apenas a lucratividade da empresa, mas também sua competitividade no mercado de *commodities*, vida útil da reserva e bacias de descarte de rejeitos.

Como já destacado anteriormente, a recuperação metalúrgica refere-se à quantidade de mineral valioso que é efetivamente extraída e concentrada em relação à quantidade total presente no minério. Quando esse processo é inadequado, uma parte substancial do material valioso pode ser desperdiçada, resultando em perdas financeiras diretas. Por exemplo, se uma operação que deveria ter uma recuperação de 90% atingir apenas 70%, a diferença de 20% representa uma perda significativa de receita, que poderia, de outra forma, ser reinvestida em melhorias operacionais ou tecnologia. Além disso, a alta seletividade permite a separação eficaz entre os minerais de interesse e os rejeitos, minimizando o volume de material que precisa ser processado e, conseqüentemente, os custos associados ao transporte e ao processamento.

Segundo Luz, França e Braga (2018), a análise econômica de um empreendimento minerário deve garantir que as receitas geradas pelo minério extraído ao longo da vida útil da mina sejam suficientes para cobrir, dentre outros, os custos operacionais, que incluem despesas com suprimentos, materiais para a lavra, tratamento do minério, salários, benefícios, além de gastos administrativos e tributos. Os custos operacionais em um processo de concentração são influenciados por vários fatores, entre eles, os custos de energia, mão de obra, insumos químicos e manutenção de equipamentos. Um processo ineficiente tende a demandar mais recursos, elevando os custos e reduzindo as margens de lucro das empresas. Essa situação torna-se ainda mais crítica em um mercado de *commodities*, onde os preços do minério de ferro podem flutuar drasticamente.

A variação nos preços das *commodities*, que é amplamente influenciada pela oferta e demanda globais, pode exacerbar ainda mais esse cenário. Em períodos de alta demanda, um aumento nos custos operacionais pode significar a perda de uma oportunidade valiosa de maximizar lucros. Em contraste, durante períodos de baixa, empresas que operam com margens apertadas

devido a ineficiências podem enfrentar dificuldades financeiras maiores, resultantes de uma combinação de preços baixos e altos custos de operação.

Portanto, conforme Caldeira (2012), a medição do desempenho é fundamental para que as empresas de mineração possam acompanhar suas metas e identificar desvios. Em um mercado caracterizado pela instabilidade, essa prática torna-se ainda mais crucial. Por conseguinte, garantir a eficiência nos processos de recuperação e seletividade não se trata apenas de uma questão técnica, mas sim de uma decisão estratégica, essencial para determinar o sucesso ou o fracasso da operação.

3.6. Fatores influenciadores do preço do minério de ferro e sua dinâmica de mercado

De acordo com Wang et al. (2023), a variação do preço do minério de ferro é influenciada por uma combinação de fatores, incluindo a renda nacional bruta, o produto interno bruto, tarifas, investimentos em ativos fixos, produção de aço, consumo de aço reciclado, produção de minério de ferro bruto e custos de produção de concentrado de ferro. Essa variação diária pode ser observada na figura 3.5. Esses fatores estão altamente correlacionados com os preços do minério de ferro. Os autores destacam que o preço do minério de ferro resulta de múltiplos fatores, tanto fundamentais quanto não fundamentais, e que a compreensão desses elementos é crucial para prever o preço do minério de ferro com precisão.



Figura 3.5 – Preço diário do minério de ferro 62% na China entre 2020 e 2025 (Fonte: <https://br.investing.com/commodities/iron-ore-62-cfr-futures-historical-data>. Acesso em: 10 fev. 2025).

Nesse contexto, o mercado de minério de ferro começou a se desenvolver com a criação de contratos futuros, inicialmente baseados no índice de 62% de ferro (Fe), mas logo se tornou evidente que essa abordagem era limitada. O minério de ferro é uma commodity não fungível, e sua qualidade varia consideravelmente. Para facilitar o ajuste de preços em relação às diferenças entre as especificações de produtos esperadas e entregues, as Agências de Preço de Referência (PRAs) desenvolveram índices de Valor em Uso (VIU) para os principais componentes químicos do minério de ferro que afetam o preço, como ferro, sílica, alumina e fósforo. Em geral, minérios de maior pureza ajudam a aumentar os rendimentos de metal quente no alto-forno e reduzem o custo de produção ao diminuir a quantidade de coque necessária. Por essas razões, a regra geral é: maior grau de Fe, maior preço (Fastmarkets, 2018).

Conforme S&P Global (2024), os VIUs são avaliações que ajudam a determinar penalidades e prêmios para o teor de ferro (Fe) e o conteúdo de várias impurezas, como alumina, sílica e fósforo em finos de minério de ferro. A Platts publica VIUs para duas faixas diferentes de minérios de ferro: com teor de Fe de 60-63,5% e de 55-60%. Para minérios de faixa média com teor de Fe de 60-63,5%, as penalidades por impurezas não são lineares, e a Platts publica avaliações para bandas específicas. Os valores dentro de cada banda são considerados lineares.

Além disso, o minério de ferro difere em sua forma física. Os finos exigem sinterização (aglomeração em pelotas brutas) antes do uso no alto-forno, enquanto o minério granulado pode ser carregado diretamente no forno, assim como as pelotas, ambas as formas comandando um prêmio de preço associado. De acordo com Fastmarkets (2018), as usinas siderúrgicas ajustam suas estratégias de compra de minério de ferro com base nas margens de lucro, preferindo minérios de alta pureza em períodos de alta margem e minérios de baixo grau em períodos de baixa margem.

Em resumo, o índice de 62% de Fe se mostrou insuficiente para capturar a diversidade de produtos de minério de ferro, tornando necessário um sistema mais complexo e flexível para refletir a realidade do mercado. A eficácia do processo de concentração mineral do minério de ferro é fundamental em termos financeiros, pois impacta diretamente a recuperação mássica, a recuperação metalúrgica e o índice de seletividade. Uma alta recuperação mássica e metalúrgica implica que uma maior quantidade de minério valioso é extraída e convertida em produtos utilizáveis, maximizando a rentabilidade das operações e reduzindo os custos de produção ao minimizar o desperdício de recursos.

Adicionalmente, um índice de seletividade elevado garante a separação efetiva das impurezas do minério de ferro, resultando em produtos de maior pureza, que são mais valorizados no mercado. A correlação entre a qualidade do minério e os preços evidencia que a eficiência na concentração mineral pode levar a um aumento significativo nos preços recebidos, especialmente em um ambiente de mercado onde a demanda por minérios de alta qualidade cresce continuamente.

Portanto, uma gestão efetiva desses indicadores será primordial para se investir de forma assertiva em processos de concentração que otimizem esses parâmetros não apenas melhorando a competitividade da empresa, mas também contribuindo para a sustentabilidade financeira a longo prazo, em um setor onde as margens podem ser voláteis e a qualidade do produto é um diferencial crucial.

4. ESTUDO DE CASO

O processo de beneficiamento de minério de ferro é uma etapa crucial na cadeia produtiva da indústria de mineração, pois permite a obtenção de um produto de alta qualidade e valor econômico. Nesse contexto, a recuperação metalúrgica e o índice de seletividade são parâmetros fundamentais que impactam diretamente na eficiência e rentabilidade do processo.

A recuperação mássica e recuperação metalúrgica são medidas da eficiência do processo de beneficiamento, enquanto o índice de seletividade é uma medida da capacidade do processo de separar o minério de ferro dos contaminantes. A importância desses parâmetros é evidente quando se considera que a receita da mineração é afetada em dois modos: em massa e qualidade. Em outras palavras, a quantidade de minério de ferro recuperada e a qualidade do produto final, considerando a presença de contaminantes, têm um impacto direto na receita da empresa.

Este estudo de caso visa analisar a recuperação mássica, recuperação metalúrgica e o índice de seletividade em dois circuitos de flotação de minério de ferro, localizados no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais. Os circuitos em questão são aqui chamados de Flotação I e Flotação II são projetados para produzir um concentrado de alta qualidade.

O circuito Flotação I é composto por 4 células *Rougher*, 2 células *Cleaner I*, 2 células *Cleaner II*, 2 células *Scavenger I* e 2 células *Scavenger II*. O concentrado *Rougher* alimenta a *Cleaner I* e o concentrado *Cleaner I* alimenta a *Cleaner II*, sendo que o concentrado *Cleaner II* é o concentrado final. O rejeito *Rougher* alimenta, por gravidade, o *Scavenger I* e o rejeito do *Scavenger I* alimenta, por gravidade, o *Scavenger II*, sendo que o rejeito do *Scavenger II* é denominado rejeito final. Os concentrados da *Scavenger I* e da *Scavenger II* unem-se à alimentação nova que alimenta a *Rougher* (figura 4.1).

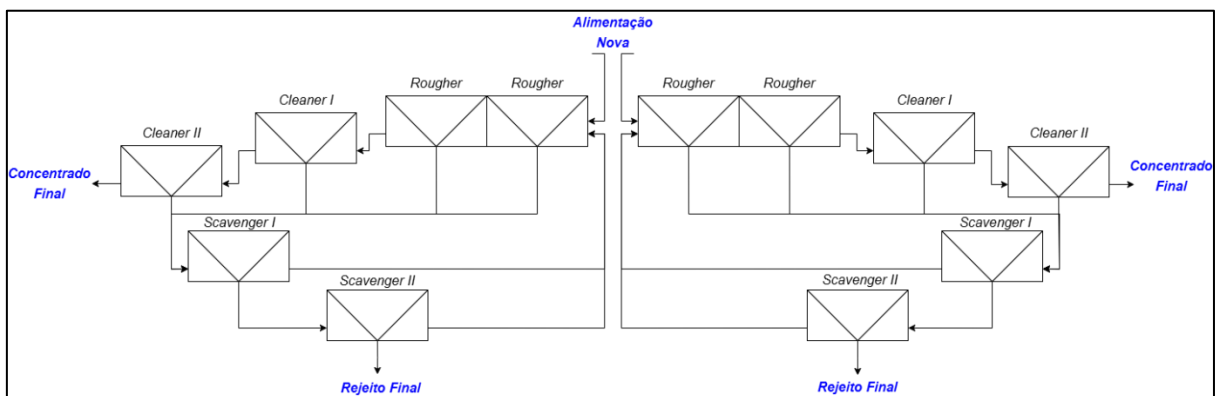


Figura 4.1 – Circuito Flotação I

Já a Flotação II é composta por 8 células *Rougher*, 4 células *Cleaner I*, 4 células *Cleaner II*, 4 células *Scavenger I* e 4 células *Scavenger II*. O circuito segue a mesma lógica da Flotação I (figura 4.2).

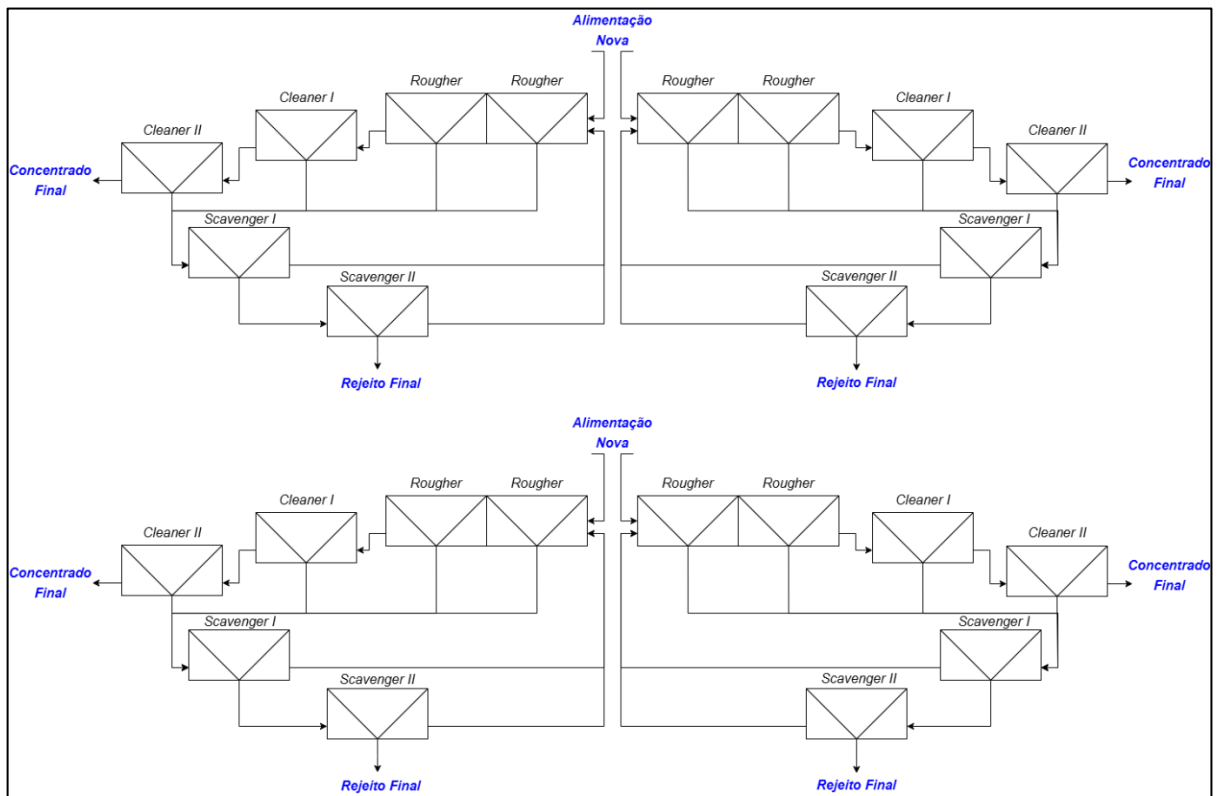


Figura 4.2 – Circuito Flotação II

4.1. Métodos de coleta de dados

Os dados utilizados neste estudo de caso foram coletados diretamente do sistema informatizado local, que é o sistema oficial de gestão da produção de cada uma das respectivas minas, utilizadas como exemplo. Os dados coletados incluem informações sobre a massa calculada em medidores de vazão dos circuitos e dados de análise físico-química disponibilizados pelos respectivos laboratórios.

O banco de dados é composto por variáveis que incluem:

- Massa alimentada (kt)
- % Fe na Alimentação
- % de SiO₂ na Alimentação
- Massa Concentrada (kt)

- % Fe no Concentrado
- % de SiO₂ no Concentrado
- Massa de Rejeito (kt)
- % de Fe no Rejeito
- % SiO₂ no Rejeito

A partir desses dados, foram calculados os indicadores Recuperação em Massa, Recuperação Metalúrgica e Índice de Seletividade, que são fundamentais para avaliar a eficiência do processo de beneficiamento de minério de ferro. As fórmulas utilizadas para esses cálculos são as seguintes:

- Recuperação Mássica (RM) $RM = \frac{Massa_{Concentrado}}{Massa_{Alimentação}}$
- Recuperação Metalúrgica (RMet) $RMet = \frac{\%Fe_{Concentrado} \times Massa_{Concentrado}}{\%Fe_{Alimentação} \times Massa_{Alimentação}}$
- Índice de Seletividade (IS) $IS = \sqrt{\frac{\%Fe_{Concentrado} \times \%SiO_2_{Rejeito}}{\%SiO_2_{Concentrado} \times \%Fe_{Rejeito}}}$

Os dados coletados referem-se à produção mensal ao longo de um período de 21 meses, totalizando 504 registros. Essa amostra abrange tanto os dados extraídos do banco de dados quanto os indicadores de desempenho calculados, proporcionando uma visão abrangente da produção e dos indicadores de desempenho ao longo do tempo. A utilização de dados coletados diretamente do sistema oficial de gestão da produção garante a precisão e a confiabilidade dos dados, além de permitir uma análise mais precisa dos indicadores de desempenho.

Esses dados serão utilizados para analisar a recuperação metalúrgica e o índice de seletividade nos circuitos de flotação de minério de ferro, identificando os principais impactos dessa relação e contribuindo para a otimização do processo de beneficiamento de minério de ferro.

4.2. Análise dos dados

A análise dos dados coletados foi realizada com o objetivo de compreender as características das variáveis, além de identificar padrões e tendências presentes nos dados. Para isso, utilizou-se a estatística descritiva, que é uma abordagem que permite resumir, organizar e apresentar as

informações de maneira clara e concisa. A estatística descritiva envolve o cálculo de medidas como média, mediana, quartil 1, quartil 3, desvio padrão e coeficiente de variação, que ajudam a capturar as principais características dos dados analisados. Por meio dessa análise, é possível obter um panorama geral das variáveis individualmente, facilitando a identificação de características como a centralidade e a dispersão dos dados. Além disso, essa abordagem é fundamental para a interpretação inicial dos dados, pois fornece uma base sólida para análises mais complexas que podem ser realizadas posteriormente.

Os resultados dessa análise para as variáveis Ferro (%Fe) e Sílica (%SiO₂) na alimentação, no concentrado e no rejeito estão apresentados nas Tabelas IV.1 e IV.2, onde constam as seguintes informações:

- Variável: Refere-se à característica ou atributo que está sendo analisado nos dados.
- N: Número total de observações para a variável. Representa a quantidade de dados coletados.
- Média: Valor médio dos dados, calculado somando todos os valores da variável e dividindo pelo número total de observações (N). Indica a tendência central dos dados.
- EP Média (Erro Padrão da Média): Medida da precisão da média amostral, calculada como o desvio padrão da amostra dividido pela raiz quadrada do número de observações (N). Um valor menor indica maior precisão da média estimada.
- DesvPad (Desvio Padrão): Medida da dispersão dos dados em relação à média. Indica o quanto os valores individuais se afastam da média.
- CoefVar (Coeficiente de Variação): Medida relativa de dispersão, calculada como o desvio padrão dividido pela média, expressa em porcentagem. Permite comparar a variabilidade entre diferentes conjuntos de dados, independentemente da unidade de medida.
- Mínimo: O menor valor observado na variável.
- Q1 (Primeiro Quartil): Valor que divide os 25% menores dos dados dos 75% restantes. É um indicador da dispersão e distribuição dos dados.
- Mediana: Valor central dos dados, que divide a amostra em duas partes iguais. É menos sensível a valores extremos do que a média.
- Q3 (Terceiro Quartil): Valor que divide os 75% menores dos dados dos 25% maiores. Ajuda a entender a distribuição dos dados em relação ao topo da amostra.
- Máximo: O maior valor observado na variável.

Tabela IV.1 – Estatística descritiva das variáveis %Fe e %SiO₂ no Circuito de Flotação I

| Variável | N | N* | Média | EP Média | DesvPad | CoefVar | Mínimo | Q1 | Mediana | Q3 | Máximo |
|-------------------------------------|----|----|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Fe Alimentação_Flot I | 21 | 0 | 0,35374 | 0,00764 | 0,03503 | 9,90 | 0,29530 | 0,32735 | 0,35340 | 0,38290 | 0,42300 |
| Fe Concentrado_Flot I | 21 | 0 | 0,64983 | 0,00155 | 0,00711 | 1,09 | 0,63240 | 0,64515 | 0,64890 | 0,65600 | 0,65980 |
| Fe rejeito_Flot I | 21 | 0 | 0,1899 | 0,0157 | 0,0718 | 37,83 | 0,0702 | 0,1340 | 0,1827 | 0,2496 | 0,3241 |
| SiO ₂ Alimentação_Flot I | 21 | 0 | 0,4452 | 0,0104 | 0,0478 | 10,74 | 0,3842 | 0,4019 | 0,4323 | 0,4798 | 0,5595 |
| SiO ₂ Concentrado_Flot I | 21 | 0 | 0,02517 | 0,00132 | 0,00607 | 24,10 | 0,01640 | 0,01985 | 0,02440 | 0,02955 | 0,03760 |
| SiO ₂ rejeito_Flot I | 21 | 0 | 0,6775 | 0,0220 | 0,1009 | 14,89 | 0,5213 | 0,5812 | 0,6529 | 0,7829 | 0,8562 |

Tabela IV.2 – Estatística descritiva das variáveis %Fe e %SiO₂ no Circuito de Flotação II

| Variável | N | N* | Média | EP Média | DesvPad | CoefVar | Mínimo | Q1 | Mediana | Q3 | Máximo |
|--------------------------------------|----|----|----------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Fe Alimentação_Flot II | 21 | 0 | 0,35652 | 0,00791 | 0,03627 | 10,17 | 0,28696 | 0,32856 | 0,36629 | 0,38786 | 0,40229 |
| Fe Concentrado_Flot II | 21 | 0 | 0,67070 | 0,00101 | 0,00462 | 0,69 | 0,66130 | 0,66670 | 0,67140 | 0,67355 | 0,67870 |
| Fe rejeito_Flot II | 21 | 0 | 0,12294 | 0,00718 | 0,03292 | 26,78 | 0,07740 | 0,09620 | 0,11050 | 0,15370 | 0,19002 |
| SiO ₂ Alimentação_Flot II | 21 | 0 | 0,4598 | 0,0111 | 0,0507 | 11,03 | 0,4011 | 0,4169 | 0,4431 | 0,5006 | 0,5652 |
| SiO ₂ Concentrado_Flot II | 21 | 0 | 0,018767 | 0,000991 | 0,004542 | 24,20 | 0,012100 | 0,015550 | 0,017500 | 0,022050 | 0,028400 |
| SiO ₂ rejeito_Flot II | 21 | 0 | 0,7883 | 0,0114 | 0,0520 | 6,60 | 0,6505 | 0,7493 | 0,7999 | 0,8283 | 0,8647 |

A análise dos resultados revelou que, nos dois circuitos estudados, os teores médios de Ferro e Sílica na alimentação apresentam valores similares, com coeficientes de variação de magnitude semelhante tanto para o Ferro (9,9% no Circuito de Flotação I e 10,17% no Circuito de Flotação II) quanto para a Sílica (10,74% no Circuito de Flotação I e 11,03% no Circuito de Flotação II).

Ao analisar as mesmas variáveis no concentrado, constatou-se que o Circuito de Flotação II apresentou um percentual médio de ferro superior ao do Circuito de Flotação I, com 67,07% contra 64,98%. Em contrapartida, o teor de sílica foi inferior, apresentando 1,88% no Circuito de Flotação II, em comparação a 2,52% no Circuito de Flotação I. Além disso, o Circuito de Flotação II apresentou um desvio padrão menor nas mesmas variáveis em relação ao Circuito de Flotação I, embora os coeficientes de variação sejam relativamente semelhantes podendo ser observado nas tabelas IV.1 e IV.2. No rejeito, por outro lado, foram observadas diferenças significativas tanto nas médias quanto nos coeficientes de variação. No Circuito de Flotação I, os valores médios foram de 18,99% de Fe e 67,75% de SiO₂, enquanto no Circuito de Flotação II foram 12,29% de Fe e 78,83% de SiO₂. Em relação aos coeficientes de variação do rejeito, o Circuito de Flotação I apresentou 37,83% para Fe e 14,89% para SiO₂, enquanto no Circuito de Flotação II, os valores foram de 26,78% para Fe e 6,6% para SiO₂.

Para avaliar estatisticamente as similaridades e diferenças entre os teores médios de Ferro e Sílica nas correntes de alimentação, concentrado e rejeito dos Circuitos de Flotação I e II, foram realizados testes t, cujos resultados são apresentados na Figura 4.3.

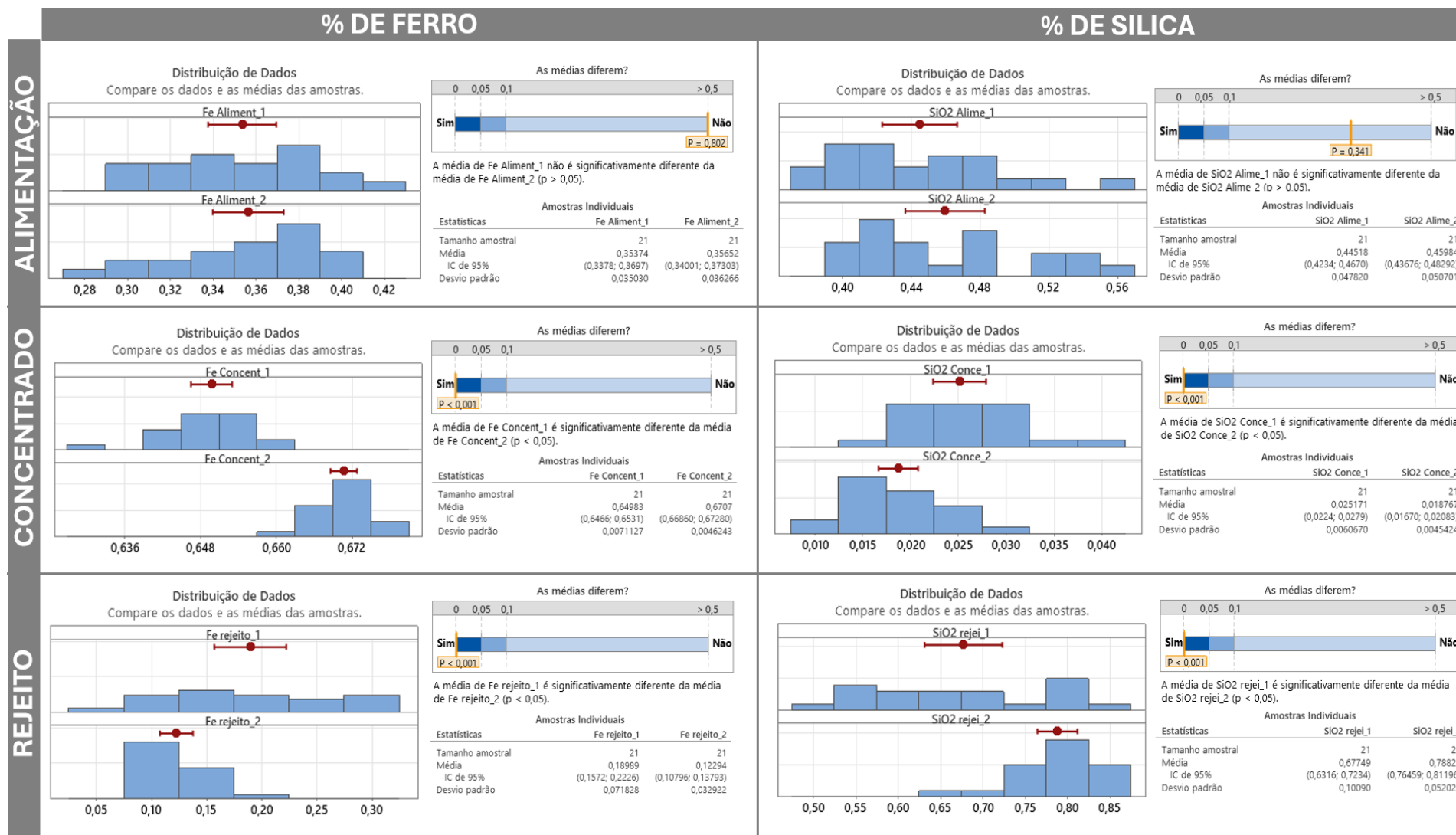


Figura 4.3 – Resultados do teste t para comparação das médias de %Fe e %SiO₂ na alimentação, concentrado e rejeito dos Circuitos de Flotação I e II.

Os testes estatísticos revelaram que os índices $p > 0,05$ ($p = 0,802$ para o % de Fe e $p = 0,341$ para SiO_2) indicam que os teores médios de Ferro e Sílica na alimentação dos dois circuitos não apresentam diferenças significativas. No Circuito de Flotação I, o teor de ferro é de 35,37%, enquanto no Circuito de Flotação II é de 35,65%. Já os teores de SiO_2 são de 44,52% no Circuito de Flotação I e 45,98% no Circuito de Flotação II. Por outro lado, ao compararmos as mesmas variáveis no concentrado e no rejeito, observam-se diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,001$ para o % de Fe e % de SiO_2 no concentrado, assim como no rejeito).

Diante dessas observações, constatou-se que, embora os teores de Ferro e Sílica na alimentação dos circuitos sejam similares, a diferença expressiva nas concentrações dessas variáveis no concentrado e no rejeito, associada à maior variabilidade do Ferro no rejeito e da Sílica no concentrado, sugere a necessidade de avaliar se tais resultados estão correlacionados com variações desses elementos na alimentação. Para tanto, foram conduzidos testes de regressão linear, cujos resultados estão representados nas Figuras 4.4 e 4.5.

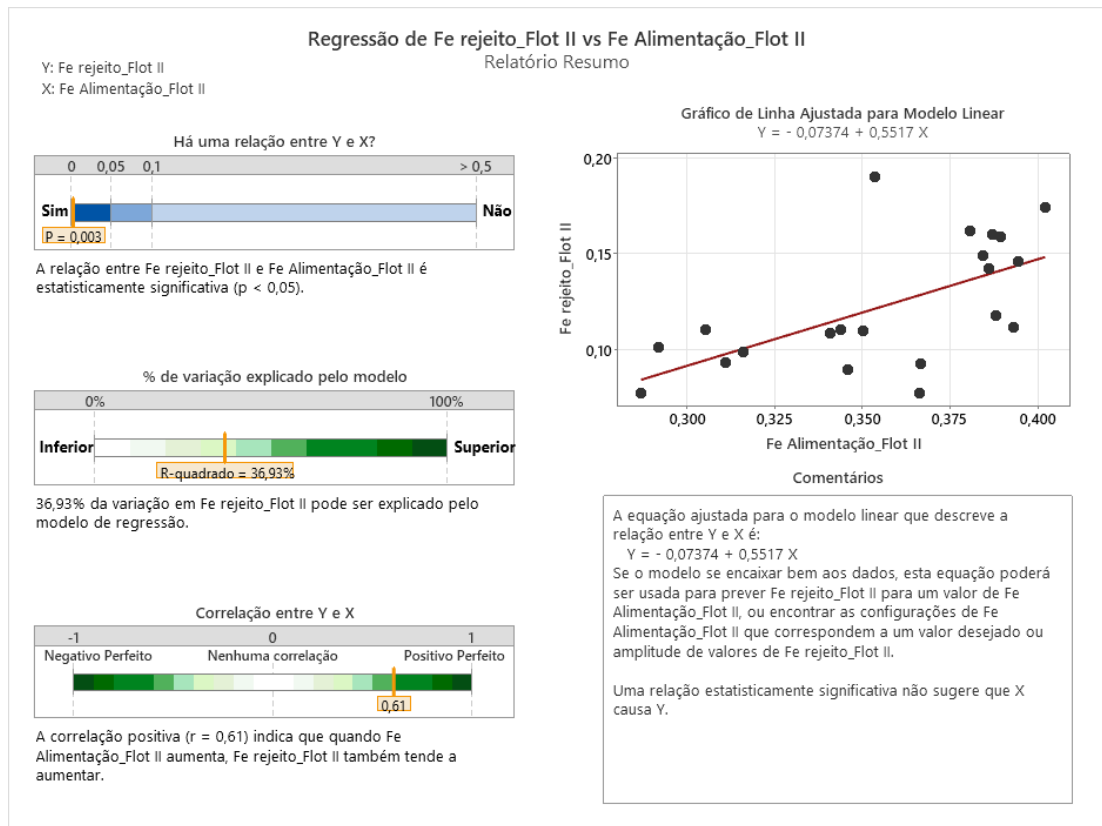
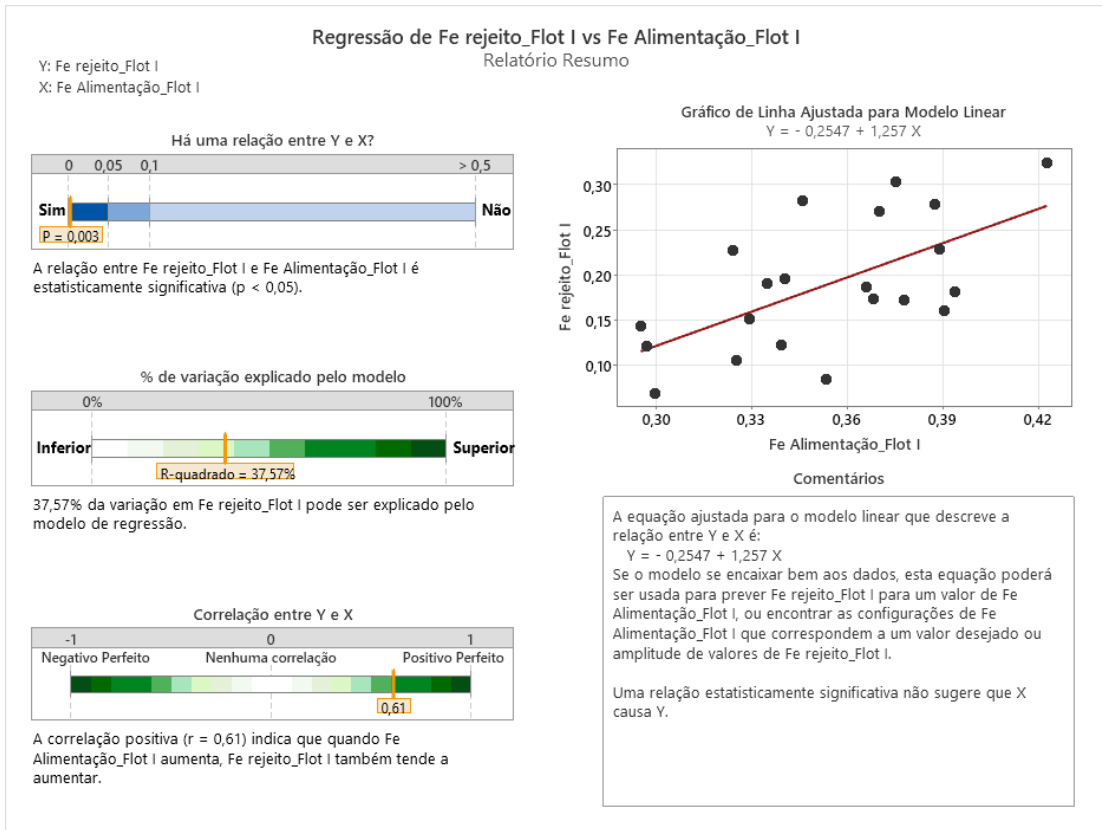


Figura 4.4 – Regressão linear entre o %Fe na alimentação e o %Fe no rejeito dos Circuitos de Flotação I e II

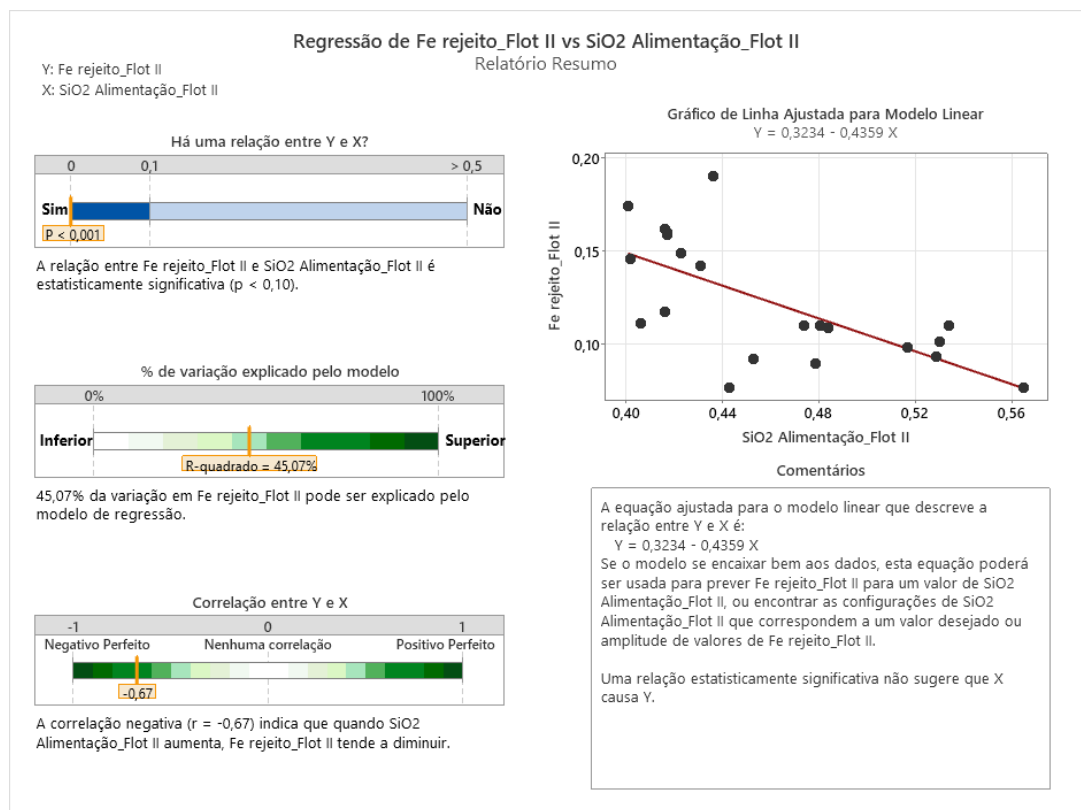
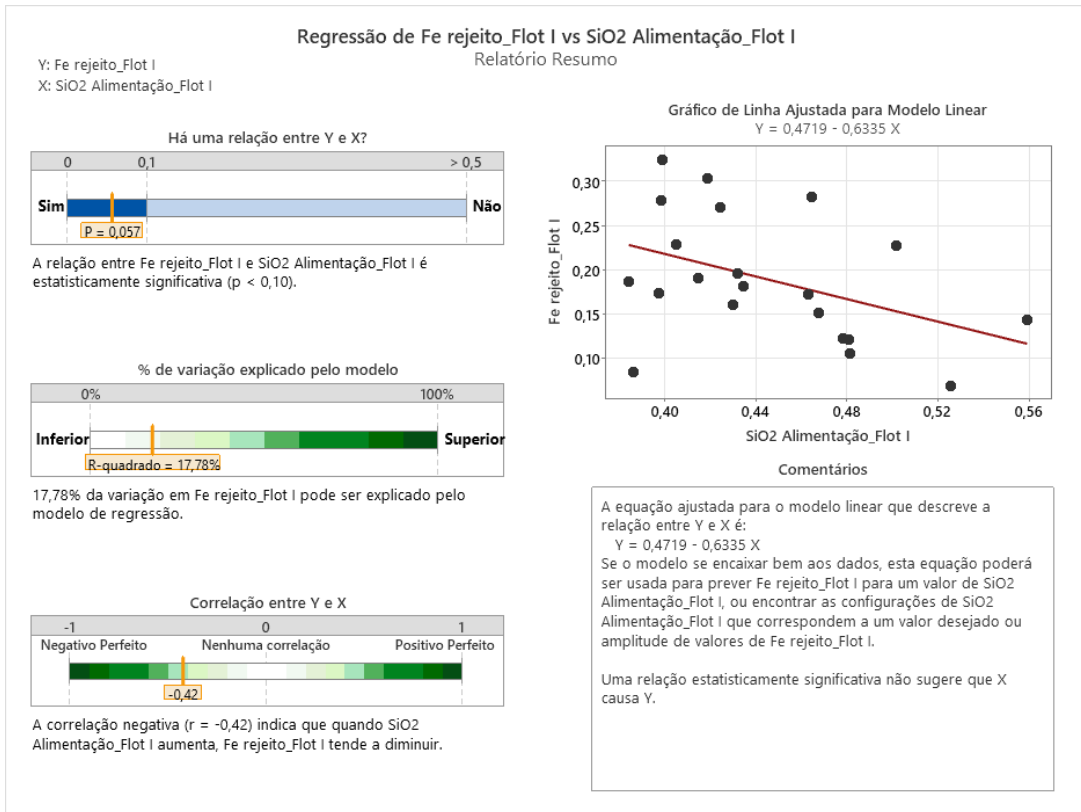


Figura 4.5 – Regressão linear entre o %SiO₂ na alimentação e o %Fe no rejeito dos Circuitos de Flotação I e II

A Figura 4.4 mostra que, em ambos os circuitos, a variável Ferro na alimentação apresentou um coeficiente de correlação (r) superior a 0,6, indicando que o aumento do teor de Ferro na alimentação tende a resultar em um aumento do teor de Ferro no rejeito.

Por outro lado, a Figura 4.5 revela uma correlação negativa entre a Sílica na alimentação e o Ferro no rejeito, sugerindo que um aumento no teor de Sílica na alimentação está associado à redução do teor de Ferro no rejeito (coeficiente de correlação iguais a -0,42 e -0,67 para os Circuitos de Flotação I e II respectivamente). Esse efeito foi mais evidente no Circuito de Flotação II.

Após a análise individual das variáveis, procedeu-se ao cálculo dos indicadores de Recuperação Mássica, Recuperação Metalúrgica e Índice de Seletividade, cujos valores estão apresentados na Tabela IV.3. Posteriormente, realizou-se uma análise estatística descritiva desses indicadores, sintetizada na Tabela IV.4.

Tabela IV.3 – Indicadores dos circuitos Flotação I e Flotação II

| Circuito de Flotação I | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|
| Indicador | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 | M11 | M12 | M13 | M14 | M15 | M16 | M17 | M18 | M19 | M20 | M21 |
| Recuperação Mássica | 40% | 45% | 43% | 34% | 38% | 41% | 47% | 31% | 38% | 46% | 35% | 31% | 30% | 30% | 17% | 41% | 31% | 23% | 28% | 41% | 21% |
| Recuperação Metalúrgica | 86% | 74% | 74% | 89% | 64% | 72% | 87% | 60% | 68% | 78% | 70% | 60% | 50% | 66% | 32% | 78% | 47% | 46% | 47% | 81% | 36% |
| Índice de Seletividade | 18,5 | 12,4 | 11,0 | 20,0 | 7,8 | 8,8 | 15,5 | 10,2 | 10,5 | 11,3 | 12,4 | 10,4 | 6,4 | 11,0 | 7,5 | 16,0 | 7,6 | 8,0 | 6,0 | 11,3 | 6,8 |

| Circuito de Flotação II | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Indicador | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 | M7 | M8 | M9 | M10 | M11 | M12 | M13 | M14 | M15 | M16 | M17 | M18 | M19 | M20 | M21 |
| Recuperação Mássica | 34% | 43% | 46% | 46% | 46% | 48% | 51% | 35% | 47% | 44% | 38% | 38% | 48% | 34% | 48% | 35% | 43% | 44% | 41% | 45% | 41% |
| Recuperação Metalúrgica | 65% | 76% | 80% | 77% | 79% | 81% | 86% | 77% | 87% | 85% | 81% | 81% | 84% | 77% | 89% | 83% | 82% | 77% | 81% | 78% | 81% |
| Índice de Seletividade | 10,0 | 12,3 | 14,8 | 11,4 | 12,6 | 11,6 | 14,5 | 13,1 | 19,4 | 18,9 | 18,3 | 16,7 | 19,2 | 13,9 | 21,4 | 22,3 | 17,0 | 14,6 | 20,3 | 13,7 | 19,5 |

Tabela IV.4 – Estatística descritiva dos indicadores de Recuperação Mássica, Recuperação Metalúrgica e Índice de Seletividade dos Circuitos de Flotação I e II

| Variável | N | N* | Média | EP Média | DesvPad | CoefVar | Mínimo | Q1 | Mediana | Q3 | Máximo |
|----------------------|----|----|--------|----------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|
| Rec Massa_Flot I | 21 | 0 | 0,3474 | 0,0183 | 0,0839 | 24,16 | 0,1701 | 0,2990 | 0,3496 | 0,4106 | 0,4694 |
| Rec Metal_Flot I | 21 | 0 | 0,6425 | 0,0347 | 0,1589 | 24,73 | 0,3216 | 0,4839 | 0,6827 | 0,7611 | 0,8713 |
| Índ Selet_Flot I | 21 | 0 | 10,500 | 0,711 | 3,260 | 31,04 | 6,041 | 7,689 | 10,550 | 11,817 | 18,469 |
| Rec Massa_Flot II | 21 | 0 | 0,4267 | 0,0113 | 0,0519 | 12,16 | 0,3379 | 0,3775 | 0,4386 | 0,4678 | 0,5066 |
| Rec Metal_Flot II | 21 | 0 | 0,8026 | 0,0112 | 0,0513 | 6,39 | 0,6459 | 0,7699 | 0,8081 | 0,8343 | 0,8911 |
| Índ de Selet_Flot II | 21 | 0 | 15,984 | 0,788 | 3,610 | 22,59 | 10,047 | 12,857 | 14,777 | 19,299 | 22,294 |

A partir da Tabela IV.4, observa-se certa variabilidade nos indicadores analisados, além de diferenças relevantes nas medidas de tendência central entre os circuitos. A fim de evidenciar essas diferenças de maneira visual, foi gerado um gráfico boxplot, apresentado na Figura 4.6.

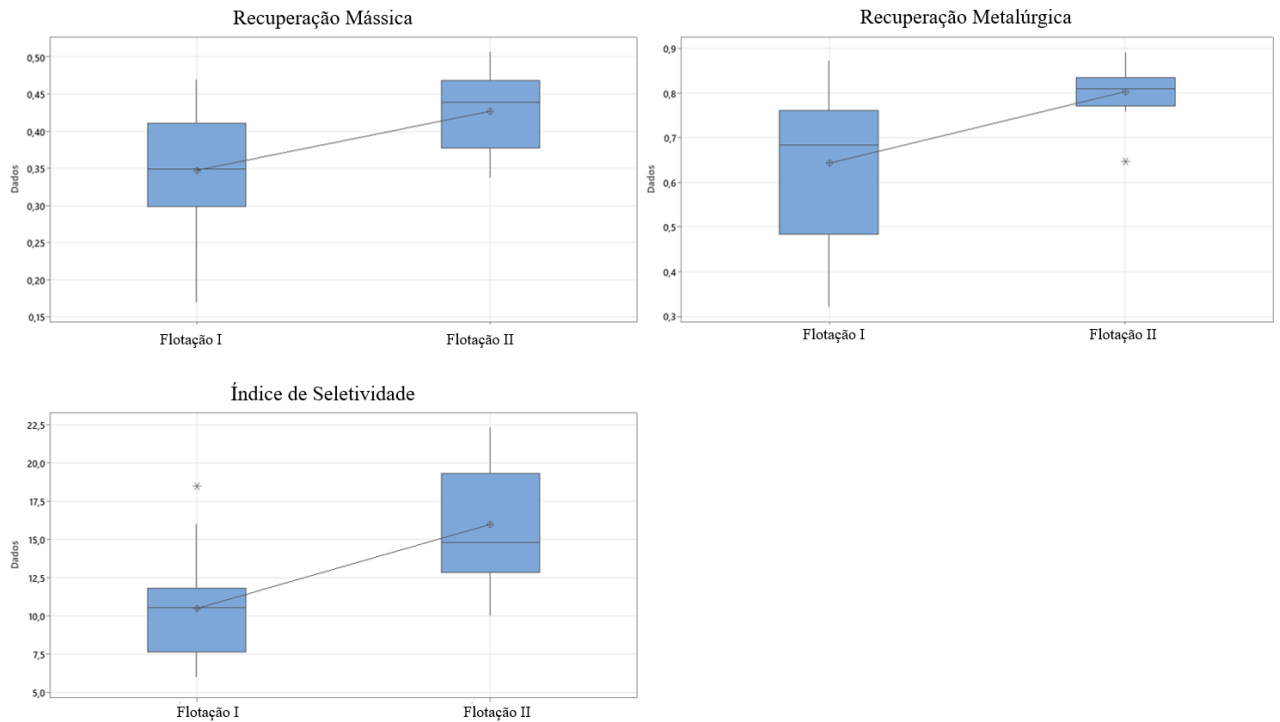


Figura 4.6 – Boxplot comparando os indicadores dos Circuitos de Flotação I e II

Os resultados obtidos demonstram que o Circuito de Flotação II apresentou maior eficiência em comparação ao Circuito de Flotação I. Esse ponto é evidenciado pelas médias e medianas superiores nas métricas de Recuperação Mássica (42,67% de RM para o Circuito II em comparação a 34,74% do Circuito I; mediana de 43,86% contra 34,96%) e Recuperação Metalúrgica (80,26% de RMet no Circuito II em relação a 64,25% do Circuito I; mediana de 80,81% frente a 68,27%). Além disso, o Circuito II demonstrou menor variabilidade, como indicado pelos desvios padrão e coeficientes de variação mais baixos (conforme apresentado na Tabela IV.4).

No que diz respeito ao Índice de Seletividade, observou-se um padrão semelhante nas medidas de tendência central entre os circuitos: o Circuito de Flotação II apresentou uma média de 15,98, enquanto o Circuito I teve 10,5; as medianas foram de 14,78 e 10,55, respectivamente. No entanto, em relação à variabilidade, os valores se mostraram comparáveis, com desvios padrão de 3,26 para o Circuito I e 3,61 para o Circuito II, apresentando coeficientes de variação de 31,04% e 22,59%, respectivamente.

Considerando as análises preliminares e as evidências de uma possível influência das variáveis estudadas sobre o Ferro no rejeito, e tendo em vista que esse parâmetro compõe o Índice de Seletividade, construiu-se um correlograma para avaliar a correlação entre os indicadores de

Recuperação Mássica, Recuperação Metalúrgica, Índice de Seletividade, %Fe na alimentação e %SiO₂ na alimentação. Os resultados são apresentados na Figura 4.7.

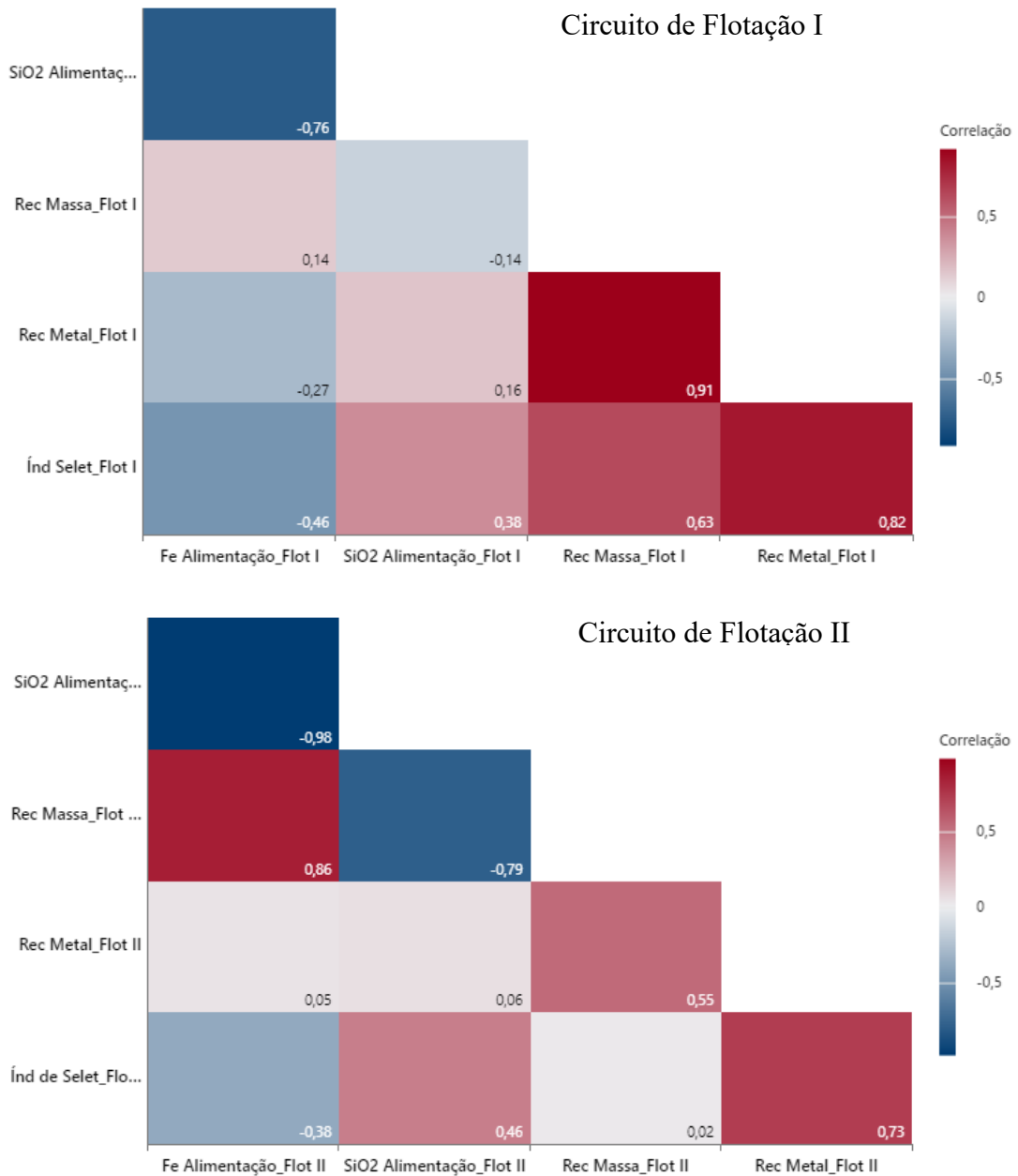


Figura 4.7 – Correlograma das variáveis %Fe na alimentação, %SiO₂ na alimentação, Recuperação Mássica, Recuperação Metalúrgica e Índice de Seletividade nos Circuitos de Flotação I e II

Algumas correlações destacam-se por serem consistentes entre os dois circuitos:

1. O Índice de Seletividade apresentou correlação positiva com a Recuperação Metalúrgica e o %SiO₂ na alimentação, indicando que o aumento desses fatores tende a elevar o Índice de Seletividade.
2. O Índice de Seletividade apresentou correlação negativa com o %Fe na alimentação, sugerindo que um aumento no teor de Ferro na alimentação reduz esse índice.

Além disso, verificou-se uma correlação positiva entre Recuperação Mássica e Recuperação Metalúrgica nos dois circuitos. A Recuperação Mássica também apresentou uma correlação positiva relevante com o Índice de Seletividade apenas no Circuito de Flotação I.

Para aprofundar a análise das correlações identificadas, foi feita uma modelagem de regressão múltipla considerando as variáveis %Fe na alimentação, %SiO₂ na alimentação, Recuperação Mássica e Recuperação Metalúrgica como preditores do Índice de Seletividade. Os resultados são apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9.

Equação de Regressão

$$\text{Índ Selet_Flot I} = -47,1 + 119,1 \text{ Fe Alimentação_Flot I} + 12,0 \text{ SiO}_2 \text{ Alimentação_Flot I} - 131,7 \text{ Rec Massa_Flot I} + 86,9 \text{ Rec Metal_Flot I}$$

Coeficientes

| Termo | Coef | EP de Coef | Valor-T | Valor-P | VIF |
|-------------------------|--------|------------|---------|---------|--------|
| Constante | -47,1 | 20,2 | -2,33 | 0,034 | |
| Fe Alimentação_Flot I | 119,1 | 51,1 | 2,33 | 0,033 | 28,04 |
| SiO2 Alimentação_Flot I | 12,0 | 10,9 | 1,10 | 0,286 | 2,36 |
| Rec Massa_Flot I | -131,7 | 48,4 | -2,72 | 0,015 | 144,40 |
| Rec Metal_Flot I | 86,9 | 26,3 | 3,30 | 0,004 | 152,58 |

Sumário do Modelo

| S | R2 | R2(aj) | R2(pred) |
|---------|--------|--------|----------|
| 1,51294 | 82,76% | 78,46% | 68,15% |

Análise de Variância

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Regressão | 4 | 175,872 | 43,968 | 19,21 | 0,000 |
| Fe Alimentação_Flot I | 1 | 12,417 | 12,417 | 5,42 | 0,033 |
| SiO2 Alimentação_Flot I | 1 | 2,792 | 2,792 | 1,22 | 0,286 |
| Rec Massa_Flot I | 1 | 16,927 | 16,927 | 7,39 | 0,015 |
| Rec Metal_Flot I | 1 | 24,979 | 24,979 | 10,91 | 0,004 |
| Erro | 16 | 36,624 | 2,289 | | |
| Total | 20 | 212,496 | | | |

Figura 4.8 – Análise de Regressão Múltipla para o Circuito de Flotação I

Equação de Regressão

$$\text{Índ de Selet_Flot II} = -198,8 + 532,2 \text{ Fe Alimentação_Flot II} - 27,6 \text{ SiO2 Alimentação_Flot II} - 511,7 \text{ Rec Massa_Flot II} + 319,1 \text{ Rec Metal_Flot II}$$

Coeficientes

| Termo | Coef | EP de Coef | Valor-T | Valor-P | VIF |
|--------------------------|--------|------------|---------|---------|--------|
| Constante | -198,8 | 36,3 | -5,48 | 0,000 | |
| Fe Alimentação_Flot II | 532,2 | 87,6 | 6,08 | 0,000 | 171,82 |
| SiO2 Alimentação_Flot II | -27,6 | 34,0 | -0,81 | 0,429 | 50,66 |
| Rec Massa_Flot II | -511,7 | 73,2 | -6,99 | 0,000 | 245,64 |
| Rec Metal_Flot II | 319,1 | 39,1 | 8,15 | 0,000 | 68,63 |

Sumário do Modelo

| S | R2 | R2(aj) | R2(pred) |
|---------|--------|--------|----------|
| 1,08383 | 92,79% | 90,99% | 84,45% |

Análise de Variância

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|--------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Regressão | 4 | 241,886 | 60,4714 | 51,48 | 0,000 |
| Fe Alimentação_Flot II | 1 | 43,357 | 43,3567 | 36,91 | 0,000 |
| SiO2 Alimentação_Flot II | 1 | 0,773 | 0,7725 | 0,66 | 0,429 |
| Rec Massa_Flot II | 1 | 57,374 | 57,3739 | 48,84 | 0,000 |
| Rec Metal_Flot II | 1 | 78,084 | 78,0837 | 66,47 | 0,000 |
| Erro | 16 | 18,795 | 1,1747 | | |
| Total | 20 | 260,681 | | | |

Figura 4.9 – Análise de Regressão Múltipla para o Circuito de Flotação II

Os modelos apresentaram R^2 ajustado de 78,46% para o Circuito de Flotação I e 90,99% para o Circuito de Flotação II, indicando que a variabilidade do Índice de Seletividade é explicada, nesses percentuais, pelas variáveis predictoras. Em ambos os circuitos, os coeficientes das variáveis independentes sugerem que a Recuperação Mássica, a Recuperação Metalúrgica e o % de Fe na alimentação exercem influência significativa no Índice de Seletividade, sendo essa relação estatisticamente relevante (p -valor < 0,05).

Por outro lado, o teor de Sílica na alimentação não demonstrou influência estatisticamente significativa na previsão do Índice de Seletividade (p -valor igual 0,286 no Circuito de Flotação I e 0,429 no Circuito de Flotação II), o que indica que sua variação isolada não tem impacto relevante sobre esse parâmetro. Esse resultado reforça a hipótese de que a eficiência da flotação é mais sensível às variações dos teores de Ferro na alimentação e ao desempenho do circuito em termos de recuperação.

Além disso, a maior explicabilidade do modelo no Circuito de Flotação II (R^2 ajustado de 90,99%) sugere que os fatores analisados possuem um efeito mais consistente sobre o Índice de Seletividade nesse circuito, possivelmente devido a uma operação mais estável ou a um melhor controle dos parâmetros operacionais. Dessa forma, os resultados obtidos evidenciam que ajustes nas condições operacionais que favoreçam uma maior recuperação metálica podem contribuir para um aumento na seletividade do processo, especialmente no Circuito de Flotação II.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo analisar a recuperação metalúrgica e o índice de seletividade no processo de beneficiamento de minério de ferro, buscando identificar os impactos dessa relação e compreender a influência de variáveis operacionais e composicionais sobre esses indicadores. Com base nos resultados obtidos, as principais conclusões deste trabalho podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- Foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente sobre os conceitos envolvidos e um estudo de caso aplicado a circuitos industriais de flotação catiônica reversa relativamente similares tanto em termos de arranjo quanto em termos das variáveis % de Ferro e % de SiO₂ na alimentação.
- A análise estatística realizada nos circuitos de flotação revelou que a recuperação metalúrgica média do Circuito de Flotação II foi de 80,26%, enquanto a do Circuito de Flotação I foi de apenas 64,25%. Isso indica uma diferença significativa na eficiência dos processos, corroborando a hipótese de que circuitos otimizados podem aumentar a recuperação de Ferro.
- O índice de seletividade médio foi de 15,98 para o Circuito II e 10,5 para o Circuito I, indicando que o Circuito II não apenas recupera mais ferro, mas também o faz com maior eficiência em relação às impurezas. Os coeficientes de variação foram 22,59% para o Circuito II e 31,04% para o Circuito I, sugerindo maior estabilidade nos resultados do Circuito II.
- Os resultados obtidos demonstram que a variação no teor de ferro na alimentação tem uma influência direta e significativa no desempenho dos circuitos, como evidenciado pelo coeficiente de correlação (r) superior a 0,6, que sugere que aumentos no teor de ferro na alimentação resultam em aumentos correspondentes no teor de ferro no rejeito. Por outro lado, a análise de regressão mostrou que a sílica na alimentação não apresentou impacto estatisticamente significativo no índice de seletividade (p -valor igual a 0,286 no Circuito I e 0,429 no Circuito II), sugerindo que a eficiência da separação está mais correlacionada às recuperações mássica, metalúrgica e ao teor de ferro na alimentação.
- Os resultados também indicaram diferenças de desempenho entre os circuitos analisados, com o Circuito de Flotacão II apresentando menor variabilidade, refletida em menores coeficientes de variação (12,16% para RM, 6,39% para RMet e 22,59%

para IS no Circuito de Flotação II, em comparação com 24,16%, 24,73% e 31,04% do Circuito de Flotação I). Esse aspecto reforça a importância do controle operacional na otimização dos resultados, possibilitando melhorias no processo por meio da gestão dos parâmetros de operação.

- Do ponto de vista prático, este estudo contribuiu para a compreensão da interação entre recuperação metalúrgica e seletividade, fornecendo subsídios para o aprimoramento dos processos industriais. A correlação entre os indicadores analisados permite avanços na tomada de decisão, promovendo operações mais eficientes e sustentáveis.

Portanto, a aplicação desses conhecimentos pode contribuir para a redução de perdas de ferro no rejeito, maximizando a eficiência da planta de beneficiamento e alinhando-se às demandas de mercado e sustentabilidade.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos achados deste trabalho, sugere-se que estudos futuros explorem a influência de outros fatores operacionais, como o consumo de reagentes, a distribuição granulométrica da alimentação e as interações entre variáveis do processo. Além disso, a aplicação de métodos avançados de otimização pode contribuir para o desenvolvimento de modelos preditivos mais robustos, permitindo ajustes dinâmicos no circuito de flotação e aprimorando ainda mais a eficiência operacional do beneficiamento de minério de ferro.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. A. M.; FURTADO, R. M.; PERES, A. E. C. Seletividade na flotação catiônica reversa de minério de ferro. **HOLOS**, vol. 6, p. 126-135, 2017.

BATISTA, S. P.; SOUZA, F. R.; LIMA, H. M. Evolução dos indicadores de desempenho na mineração. **Research, Society and Development**, vol. 11, no. 17, p. 1-18, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i17.39273>.

CALDEIRA, J. **100 Indicadores da Gestão: Key Performance Indicators**. 1ª ed. Coimbra: Actual, 2012.

CAMPOS, V. F. **Gerenciamento da Rotina do trabalho do dia a dia**. 9. ed. Nova Lima: Falconi Editora, 2013. 266 p.

CHAVES, A. P. **Partição**. Texto adicional à prova de erudição. Concurso para professor titular. São Paulo: EPUSP, 1992.

CHAVES, A. P. (Org). **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: A Flotação no Brasil**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 511 p.

CHAVES, A. P. et al. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Bombeamento de Polpa e Classificação**. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 303 p.

COSTA, J. L. **Seletividade na flotação de minérios ferríferos dolomíticos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2009.

CUNHA, J. V. M.; PAPINI, R. M.; APARECIDO, L. F. B.; BOTTOSSO, N. 21 Setembro 2023. **Avaliação da etapa de pré-concentração de um minério de ferro oxidado de baixo teor**. XXIX Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa.

FASTMARKETS. **Iron ore pricing explained**. Fastmarkets, 7 jun. 2018. Disponível em: <https://www.fastmarkets.com/insights/iron-ore-pricing-explained/>. Acesso em: 11 fev. 2025.

JURAN, J. M. **A qualidade desde o projeto: Novos passos para o planejamento da qualidade em produtos e serviços**. 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2009. 551 p.

LUZ, A. B. da; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios**. 6. Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. 958 p.

PERES, A. E. C.; SALUM, M. J. G. **Métodos de concentração**. In: **APOSTILA DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia da UFMG, 2004. p. 109-149.

QUARESMA, L. F. (2001) Ferro. In: **Sumário Mineral 2001**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, p.63-64.

RABELO, P. J. B. **Estudos de caracterização e redução do teor de fósforo do minério de ferro da mina de Alegria, Mariana, MG**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) — Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 1994.

ROSIER, C. A.; CHEMALE JR., F. **Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do quadrilátero ferrífero – uma visão geral e discussão**. Revista Geonomos, v. 8, n. 2, p. 27-43, fev. 2013.

S&P GLOBAL. **Specifications Guide Global Iron Ore**. S&P Global, dez. 2024. Disponível em: https://www.spglobal.com/commodityinsights/PlattsContent/_assets/_files/en/our-methodology/methodology-specifications/global_iron_ore.pdf. Acesso em: 08 fev. 2025.

SANTANA, P. P. **Flotação direta de minério de ferro itabirítico**. 2012. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2012.

SANTOS, L. M. M. dos. **Siderurgia para Cursos Tecnológicos**. 1. ed. Ouro Preto: ETFOP, 2007. 154 p.

SILVA, G. M. A. **Estudos sobre o estado de agregação de suspensões de um minério de ferro**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1994.

WANG, Y. et al. **Iron Ore Price Prediction Based on Multiple Linear Regression Model**. Sustainability, v. 15, n. 22, p. 15864, 12 nov. 2023.